



UNIFACS

UNIVERSIDADE SALVADOR

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES*

MESTRADO EM ENERGIA

MANOEL MOREIRA NETO

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO NORDESTE BRASILEIRO:
APLICAÇÃO DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PARA SISTEMAS
HÍBRIDOS RENOVÁVEIS**

Salvador
2018

MANOEL MOREIRA NETO

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO NORDESTE BRASILEIRO:
APLICAÇÃO DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PARA SISTEMAS
HÍBRIDOS RENOVÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia, da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Souza da Silva.

Salvador
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador
UNIFACS, Laureate International Universities.

Moreira Neto, Manoel

Geração de energia elétrica no Nordeste brasileiro: aplicação de método de dimensionamento para sistemas híbridos renováveis./ Manoel Moreira Neto. – Salvador, 2018.

81 f.: il.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Energia da Universidade Salvador UNIFACS, Laureate International Universities, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Souza da Silva.

1. Energia eólica. 2. Energia solar. 3. Biomassa. I. Silva, Paulo Alexandre Souza da, orient. II. Título.

CDD: 621.45

MANOEL MOREIRA NETO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO NORDESTE BRASILEIRO: APLICAÇÃO DE
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PARA SISTEMAS HÍBRIDOS RENOVÁVEIS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia,
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities, apresentada à seguinte
banca examinadora:

Paulo Alexandre Souza da Silva – Orientador _____
Doutor em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities

Kleber Freire da Silva _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP, Brasil
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo _____
Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ
Universidade de São Paulo - USP
UNIFACS Universidade Salvador Laureate Internacional Universities

Victor Menezes Vieira _____
Doutor em Geologia Ambiental, Recursos Hídricos e Hidrogeologia pela Universidade Federal
da Bahia
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities

Salvador, 27 de abril de 2018.

Para Luciana, Henrique e Leonardo, com meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo, sempre!

À minha família, principalmente minha esposa Luciana e meus filhos Henrique e Leonardo, pelo apoio e compreensão nos diversos momentos de ausência e de minha pouca disponibilidade ao longo dessa jornada;

Aos meus pais, Teresinha e Manoel (*in memoriam*), com quem aprendi os valores básicos sobre os quais busco construir minha vida;

À Braskem, pela parceria e confiança depositada, em especial ao colega e amigo Robson Casali;

Aos meus colegas de Mestrado, pela companhia na primeira fase deste caminho;

Às amigas Ana Christina Rigobello e Tânia Amorim, pelas longas conversas sobre a motivação deste trabalho, e a Railda Barbosa que muito contribuiu para a revisão final do texto;

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Britto Guimarães, meu primeiro orientador, pela sua perseverança nos momentos mais difíceis, quando meus compromissos profissionais limitavam meu tempo e, principalmente, por me ajudar a manter a determinação para prosseguir;

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Souza da Silva, cujo incentivo e motivação foram essenciais à finalização deste trabalho;

Aos Profs. Kleber Freire e Daniel Barbosa e aos amigos Eduardo Allatta e Rafael Valverde, que sempre acreditaram em mim e apoiaram a ideia;

E a todos que contribuíram para que este trabalho pudesse ser elaborado e concluído.

“A vida é constituída de lições que se repetem até fixarem-se corretamente.”

Divaldo Franco/Joana de Ângelis

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo.”

José de Alencar.

“Quando a pessoa alcança seus objetivos deve ter a humildade... e, quando encontra adversidades deve ter determinação.”

João Carlos Martins

RESUMO

Este trabalho discorre sobre a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, considerando a intermitência das fontes eólica e solar, vista como fator impeditivo para uma maior participação dessas fontes na matriz energética; também analisa a complementariedade entre essas fontes como alternativa para redução da variabilidade de geração em um sistema híbrido. Quanto aos procedimentos metodológicos, trata-se de uma pesquisa explicativa, desenvolvida a partir de levantamento bibliográfico e documental, permitindo a análise da variabilidade das fontes renováveis, com o intuito de eliminar a intermitência percebida pelo sistema elétrico. Para isso, utilizando-se dados reais de geração eólica e de simulação computacional para a geração solar, é desenvolvido um conjunto de informações que viabilizam o dimensionamento de uma geração híbrida proposta para instalação no município de Brotas de Macaúbas/BA. É proposta a utilização da geração por biomassa como fonte adicional ao sistema híbrido proposto, tendo sido aplicado um método de dimensionamento da capacidade ótima instalada para cada fonte do sistema, baseado em avaliação gráfica e analítica do conjunto de dados obtido pela pesquisa. Por fim, o resultado obtido demonstra que a combinação das fontes em um sistema híbrido permite a redução do valor da energia gerada, quando comparado à geração individual de cada uma das fontes, além de reduzir a intermitência causada ao sistema elétrico. O valor da energia é comparado com referências internacionais relativas ao custo de geração, inclusive quando considerados aspectos socioambientais.

Palavras-chave: Energia eólica. Energia solar. Biomassa. Sistema híbrido. Intermitência. Complementariedade.

ABSTRACT

This paper discusses the generation of electricity from renewable sources, considering the intermittence of wind and solar sources, seen as an impediment to a greater participation of these sources in the energy matrix; also analyzes the complementarity between these sources as an alternative to reduce generation variability in a hybrid system. As for the methodological procedures, it is an explanatory research, developed from a bibliographical and documentary survey, allowing the analysis of the variability of the renewable sources, with the purpose of eliminating the intermittent perceived by the electric system. For this, using a real wind generation data and a computer simulation for solar generation, a set of information is developed that allows the sizing of a hybrid generation proposed for installation in the city of Brotas de Macaúbas / BA. It is proposed the use of biomass generation as an additional source to the proposed hybrid system, and a method of sizing the optimum capacity installed for each system source was applied, based on a graphical and analytical evaluation of the data set obtained by the research. Finally, the obtained result shows that the combination of the sources in a hybrid system allows the reduction of the value of the energy generated when compared to the individual generation of each one of the sources, besides reducing the intermittence caused to the electrical system. The value of energy is compared with international references related to generation costs, including when considering socio-environmental aspects.

Keywords: Wind. Solar. Biomass. Hybrid systems. Intermittence. Complementarity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade instalada de geração da matriz elétrica brasileira por fontes.....	19
Figura 2 - Configuração das linhas de transmissão do SIN em 2005 e 2015	21
Figura 3 - Fluxo de energia elétrica BEN 2016 – relatório síntese	23
Figura 4 - Comportamento da geração eólica e hídrica na região do rio São Francisco	35
Figura 5 - Geração eólica e solar base horária em dia típico.....	36
Figura 6 - Geração eólica em dia típico no estado da Bahia	38
Figura 7 - Geração eólica em dia típico no estado do Rio Grande do Norte.....	38
Figura 8 - Geração eólica em dia típico no estado do Ceará	39
Figura 9 - Esquemático típico para sistemas híbridos renováveis.....	47
Figura 10 - Localização e informações sobre a central eólica Seabra.....	49
Figura 11 - Fator de Capacidade médio UEE Seabra, 2015	49
Figura 12 - Fator de Capacidade médio solar em Brotas de Macaúbas/BA, 2015.....	50
Figura 13 - Fator de capacidade médio eólica e solar, em Brotas de Macaúbas/BA	55
Figura 14 - Fator de Capacidade médio central híbrida, em Brotas de Macaúbas/BA	55
Figura 15 - Curva de dimensionamento híbrido eólico-solar proposta	59
Figura 16 - Curva de dimensionamento, equação da curva e ponto ótimo econômico híbrido.....	60
Figura 17 - Comparativo entre dimensionamentos híbridos possíveis.....	61
Figura 18 - Comportamento de geração de base necessário para biomassa.....	64
Figura 19 - Indicativo de custo de geração das fontes renováveis	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações sobre leilões de geração de energia	26
Tabela 2 - Participação de renováveis na matriz energética dos países	29
Tabela 3 - Participação da energia eólica no consumo da região nordeste brasileira	30
Tabela 4 - Fator de capacidade médio UEE Seabra, 2015	51
Tabela 5 - Fator de capacidade médio solar em Brotas de Macaúbas/BA, 2015	52
Tabela 6 - Variabilidade horária UEE Seabra, 2015	53
Tabela 7 - Variabilidade horária solar Brotas de Macaúbas, 2015.....	54
Tabela 8 - Capacidade eólica para atendimento de 1 MW em Brotas de Macaúbas/BA	57
Tabela 9 - Capacidade solar para atendimento de 1 MW em Brotas de Macaúbas/BA.....	58
Tabela 10 - Investimento para instalação de usinas eólica e solar	60
Tabela 11 - Preços de venda ofertado por fonte, dos vencedores nos leilões de geração	62
Tabela 12 - Custo de geração para central híbrida em diferentes cenários de dimensionamento	62
Tabela 13 - Investimento para instalação de centrais a biomassa	64
Tabela 14 - Preço de venda nos leilões de geração pela fonte biomassa.....	64
Tabela 15 - Custo de geração central híbrida incluindo biomassa	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ACL	Ambiente de Contratação Livre
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MEB	Matriz Energética Brasileira
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
UEE	Usina Elioelétrica
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	14
1.2 METODOLOGIA.....	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 ASPECTOS REGULATÓRIOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE	17
2.1 A MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.....	19
2.2 POLÍTICA ENERGÉTICA NACIONAL.....	21
2.3 NORMAS REGULATÓRIAS RELACIONADAS ÀS CENTRAIS DE GERAÇÃO.....	23
2.4 LEILÕES DE ENERGIA NO BRASIL	25
3 SISTEMAS HÍBRIDOS DE FONTES RENOVÁVEIS APLICÁVEIS AO NORDESTE BRASILEIRO	27
3.1 INTERMITÊNCIA EÓLICA E SOLAR E SEUS CUSTOS ASSOCIADOS	28
3.2 COMPLEMENTARIEDADE ENTRE FONTES RENOVÁVEIS.....	34
3.2.1 Complementariedade eólico-solar no nordeste brasileiro	37
3.2.2 O papel da biomassa como fonte adicional	39
3.3 OPORTUNIDADES RELACIONADAS A SISTEMAS HÍBRIDOS	41
3.3.1 Métodos de dimensionamento e otimização de sistemas elétricos híbridos	43
4 APLICAÇÃO DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PARA SISTEMAS HÍBRIDOS	48
4.1 O POTENCIAL DE COMPLEMENTARIEDADE EÓLICO-SOLAR NA BAHIA	48
4.2 DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR EM BROTAS DE MACAÚBAS/BA.....	56
4.2.1 Comparativo econômico entre diferentes cenários de dimensionamento	61
4.3 O USO DA BIOMASSA PARA ENERGIA COMO TERCEIRA FONTE RENOVÁVEL.....	63
4.4 ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS RELEVANTES	66
5 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A - MÉTODOS DE CÁLCULO UTILIZADOS.....	76
APÊNDICE B - DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE MARKVART.....	80

1 INTRODUÇÃO

“O aumento da demanda de energia está diretamente relacionado ao crescimento populacional, à urbanização e ao desenvolvimento industrial [...] fazendo com que seja necessário o uso de fontes renováveis [...] dependentes de condições ambientais como a velocidade do vento e a irradiação solar [...]” conforme constatado por Krishna e Kumar (2015, p. 907).

O esperado esgotamento das fontes primárias fósseis como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural, além dos impactos que o seu uso causa ao meio-ambiente, faz com que seja necessária a busca por novas soluções energéticas. Dentre as alternativas hoje possíveis, as fontes renováveis despontam como principais opções, por possuírem baixa emissão de poluentes, quando comparadas às fontes fósseis.

Assim, as fontes de energia renováveis, principalmente a eólica, a solar e a biomassa, apresentam-se hoje como alternativas concretas para conciliar o atendimento às demandas energéticas de longo prazo, com as necessárias medidas ambientais de controle da emissão de gases de efeito estufa. Entretanto desafios econômicos, operacionais e também ambientais precisam ser superados para que essas fontes tenham, de forma abrangente e definitiva, aumento da sua participação nas matrizes energéticas.

Dentre esses desafios, o custo de geração superior em relação ao das fontes fósseis ainda se apresenta como a maior barreira ao aumento da participação das renováveis, embora, como observado por Shayani, Oliveira e Camargo (2006, p. 5), quando se consideram todos os aspectos associados ao processo produtivo, a simplicidade dessas fontes possibilita menores custos de geração.

No cenário mundial, ações de incentivo para uma maior aplicação das fontes renováveis, através de condições mais atrativas para o financiamento de novas instalações, ou para o desenvolvimento das cadeias produtivas associadas a estas fontes, tornam-se cada vez mais frequentes. Também se observa um maior desenvolvimento das tecnologias de geração, por meio de pesquisas que objetivam o aumento da eficiência na transformação da radiação solar em eletricidade, as quais vêm sendo realizadas com constante e crescente sucesso.

A partir de novas técnicas de fabricação e de construção, geradores baseados nessas fontes renováveis passam a ter gradativamente mais participação de mercado e, com isso, permitem redução do custo de produção e aumento da escala produtiva. Como verificado por

Empresa de Pesquisa Energética (2012, p. 53), “[...] a curva de aprendizado da indústria no mundo está em evolução e os custos associados têm apresentado decréscimos significativos”.

No aspecto ambiental, os processos de transformação utilizados para o uso final das energias renováveis também resultam em impactos, sejam estes decorrentes, por exemplo, do alagamento provocado pela formação dos reservatórios das grandes hidrelétricas, com consequente emissão de CO₂, do descarte de baterias ou, ainda, pela competição por terras agricultáveis, entre as florestas de biomassa para energia e outras culturas destinadas à alimentação.

Além dos aspectos econômicos e ambientais mencionados, o desafio operacional também se apresenta como relevante, junto com a redução do custo de geração. Trata-se, no aspecto operacional, do desafio de se conciliar a imprevisibilidade de geração, decorrente principalmente da intermitência natural das fontes primárias eólica e solar, que provocam instabilidade ao atendimento das cargas elétricas e, por consequência, impõem a necessidade da existência de: (i) outras fontes de geração com característica de resposta rápida; ou (ii) imposição de limites à participação das fontes intermitentes a um montante total, cuja variação possa ser compensada pelas demais fontes.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é propor uma solução para a geração de energia elétrica, a partir da integração das fontes intermitentes, como a eólica e solar, com outras fontes renováveis, de forma a eliminar a intermitência percebida pelo sistema elétrico, que atualmente é fator limitante para uma maior participação das referidas fontes na composição da matriz elétrica nacional. A solução proposta considera fatores técnicos, econômicos e socioambientais, voltados para a estabilidade sustentável do atendimento às cargas.

Para atender ao objetivo geral proposto, buscou-se especificamente identificar e compreender a intermitência das fontes eólica e solar em diversas regiões do Brasil, com o intuito de selecionar local com boa característica de complementariedade para a concepção de um sistema híbrido. Para a solução da variabilidade da geração decorrente das fontes intermitentes, foi acrescentada uma terceira fonte renovável.

Neste contexto, o presente trabalho contempla os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar método de dimensionamento ótimo econômico para a capacidade de geração;
- b) analisar comparativamente o método identificado com outros cenários de dimensionamento;
- c) aplicar o método identificado para o dimensionamento de um sistema híbrido proposto para instalação no município de Brotas de Macaúbas/BA; e
- d) aprimorar o sistema híbrido dimensionado, com a inserção da biomassa como terceira fonte participante, e assim eliminar a variabilidade da geração percebida pelo sistema elétrico.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia científica utilizada contou com uma fase inicial de revisão bibliográfica em que se buscou identificar as referências mais relevantes sobre o tema do trabalho, após a qual foram coletados dados e selecionada a técnica de dimensionamento que envolveu, inclusive, a realização de simulação da geração solar, pela utilização de softwares específicos para esta fonte pois, desta forma, a metodologia proposta melhor se adequou às variáveis do problema enfrentado na pesquisa.

Em seguida, foram analisadas, de forma comparativa, as soluções encontradas para cada cenário de dimensionamento, no âmbito daqueles identificados na revisão bibliográfica, tendo sido aplicada esta metodologia ao sistema híbrido proposto, no caso específico do município de Brotas de Macaúbas/BA, após essa localidade ter sido avaliada quanto ao padrão de complementariedade, conforme descrito no capítulo 4 deste trabalho.

Diante dos resultados encontrados, em uma última etapa, foi introduzido um aprimoramento ao sistema híbrido dimensionado inicialmente, com a inserção da biomassa como terceira fonte participante, eliminando, de fato, a variabilidade da geração percebida pelo sistema elétrico.

No Apêndice A é apresentado o processo de cálculo utilizado para a avaliação da complementariedade, da variabilidade de geração e para a determinação do valor da energia gerada pelo sistema híbrido proposto neste trabalho.

Maiores detalhes a respeito do método de dimensionamento proposto por Markvart (1996), e utilizado com adaptações neste trabalho, encontram-se no Apêndice B.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está assim estruturada:

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução quanto à necessidade de aumento do uso de fontes renováveis, em face das dificuldades para sua utilização, devido, principalmente, a fatores econômicos e operacionais. Neste capítulo, também são introduzidos os objetivos gerais e específicos, a metodologia utilizada e a maneira como o trabalho ficou organizado.

No capítulo 2, são apresentados aspectos regulatórios relacionados aos sistemas híbridos de geração de eletricidade, abordando características da Matriz Elétrica Brasileira e do Sistema Interligado Nacional relativos às fontes eólica, solar e biomassa. Ainda neste capítulo são apresentados o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e os principais atos normativos da política energética brasileira, com ênfase na sua importância para o desenvolvimento sustentável, nas dimensões ambientais e sociais e na classificação e enquadramento das centrais de geração.

No capítulo 3, são definidos e identificados os fatores de intermitência e complementariedade das fontes renováveis, associadas aos sistemas híbridos, assim como são também pesquisados os possíveis métodos de dimensionamento para a capacidade de geração, obtidos a partir de pesquisa bibliográfica.

O capítulo 4 é utilizado para apresentar a aplicação e o aprimoramento do método selecionado para o dimensionamento de um sistema híbrido, proposto para instalação no município de Brotas de Macaúbas/BA e seus respectivos aspectos socioambientais, bem como são discutidos os resultados alcançados neste trabalho.

No capítulo 5, são apresentadas as contribuições realizadas e potenciais, as dificuldades enfrentadas para o desenvolvimento deste trabalho, ao mesmo tempo em que são sugeridos recomendações e trabalhos futuros, diretamente relacionados ou complementares ao tema desta dissertação.

Ao final do trabalho são apresentadas as referências utilizadas, seguidas pelos Apêndices A – Métodos de cálculo utilizados e Apêndice B – Dimensionamento pelo método de Markqvart.

2 ASPECTOS REGULATÓRIOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Diversos aspectos relacionados às centrais híbridas carecem de regulamentação apropriada na legislação do setor elétrico brasileiro, aspectos que necessitam da devida clareza, ou mesmo de simples definição, para permitir que esse tipo de sistema seja viabilizado e, com isso, a sua agregação de valor seja efetivamente aproveitada no Brasil.

Um primeiro aspecto que necessita de clareza nas regras diz respeito a qual deve ser a capacidade instalada de um sistema híbrido e, conseqüentemente, a definição da garantia física assegurada que, na prática representa o montante de potência que o sistema híbrido é capaz de entregar ao sistema elétrico, dentro de determinado planejamento de despacho.

Por exemplo, hoje a definição da garantia física assegurada para uma Usina Termelétrica (UTE) se baseia na capacidade instalada total, abatendo-se o consumo próprio e considerando-se a expectativa de despacho desse ativo ao longo do período de utilização contratado, enquanto para centrais eólicas, a garantia física equivale à disponibilidade média da energia informada pelo empreendedor, conforme apresentado por Castro, Brandão e Dantas (2010, p. 24), e, “para centrais solares, refere-se ao valor de geração de energia anual, com uma probabilidade de ocorrência igual ou maior que cinquenta por cento [...] resultando sempre menor que a capacidade máxima de geração”, como apresentado por Lazzareschi (2014, p. 63).

Desta forma, cada fonte individualmente possui sua própria regra para a definição da garantia física. Entretanto, em um sistema híbrido, como o proposto neste trabalho, várias fontes de geração estão presentes, sendo que cada uma delas tem sua própria capacidade instalada e tecnologia específica de geração.

Assim, a definição da capacidade instalada para um sistema híbrido hoje, na prática, se baseia na soma das capacidades instaladas de cada uma das fontes presentes, quando se refere à definição da capacidade do ponto de conexão ao sistema elétrico, atendendo às regras estabelecidas nos Procedimentos de Rede e, conforme a regra de cada fonte, para a definição da garantia física.

Na realidade, a geração plena simultânea, a partir de cada uma das fontes, não ocorre, sendo inclusive a compensação da redução de uma fonte, com a ocorrência da geração por outra, uma das razões pelas quais se propõe a inclusão de fontes adicionais em sistemas híbridos, pois, dessa maneira, é possível o aumento da geração total.

Assim, sugere-se que a definição da capacidade instalada de um sistema híbrido deva ser objeto de um estudo específico, no qual se mensure a complementariedade existente entre as fontes participantes e, com base nessa complementariedade, seja estabelecido o perfil de geração esperado.

Na elaboração do estudo de complementariedade, e conseqüente para a definição da capacidade instalada, entende-se ser necessário, além da compreensão das características locais, a definição da configuração do sistema híbrido proposto dentre os seguintes modelos:

- a) exclusivamente a partir de fontes intermitentes;
- b) com existência de armazenamento de energia; e
- c) com participação de fontes adicionais despacháveis controladamente, de origem renovável ou não.

Em casos específicos, com a inclusão de terceira fonte como a biomassa para energia, enquadrando-se na categoria (c) acima mencionada, deve também o estudo estabelecer qual o regime de operação da fonte de base, neste caso a biomassa, a fim de ser estabelecido qual a resultante de geração entregue ao sistema e, por conseguinte, permitir inclusive a avaliação das características de segurança do sistema decorrentes da geração máxima possível.

Outro ponto diretamente afetado pela definição da capacidade instalada do sistema híbrido está relacionado ao próprio sistema de transmissão e serviços ancilares associados. Entende-se que as definições correlatas necessárias ao sistema de transmissão também devem considerar o resultado do estudo de complementariedade, conforme já proposto. Entretanto ressalta-se que, nas categorizações (b) e (c) mencionadas, o estudo resulta na definição de uma capacidade instalada que, no limite, pode ser considerada como equivalente à capacidade instalada de outro tipo de central despachável, não representando, assim, adicional de complexidade ao processo de expansão do sistema de transmissão e de operação do próprio sistema elétrico, além daquele necessário ao correto entendimento do próprio estudo de complementariedade.

Assim, como já citado, um melhor entendimento das características específicas dos sistemas híbridos pode vir a corroborar para uma melhor utilização desse tipo de usina no sistema elétrico brasileiro. Entretanto tal entendimento demandará modificações na forma estabelecida de avaliação, estudo e operação do sistema como um todo, significando assim a necessidade de rompimento com eventuais paradigmas associados que, uma vez vencidos, poderiam permitir uma evolução representativa do tema.

2.1 A MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

A matriz energética brasileira iniciou sua transição saindo do consumo de lenha e passando para o consumo de eletricidade a partir da década de 1940, com a fundação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e o início dos investimentos em hidrelétricas. Foi apenas a partir do aumento da participação da eletricidade no consumo nacional que a matriz elétrica brasileira passou a ser relevante e a composição de suas fontes objeto de estudo.

No ano de 2001, o Brasil passou pelo último grande racionamento de eletricidade. Naquela época, a matriz elétrica era composta das seguintes capacidades instaladas por fontes: hidráulica – 62.409 MW, térmica – 10.481 MW, eólica – 21 MW e nuclear – 1.966 MW, como pode ser visto na Figura 1, caracterizando-se, dessa forma, como uma matriz hidrotérmica.

Figura 1 - Capacidade instalada de geração da matriz elétrica brasileira por fontes

	HIDRO ¹ HYDRO			TERMO THERMO			EÓLICA WIND			SOLAR ⁴ SOLAR ⁴			NUCLEAR NUCLEAR		TOTAL TOTAL	
	SP e/ou PIE ²	APE ³	TOTAL	SP e/ou PIE	APE	TOTAL	SP e/ou PIE	APE	TOTAL	SP e/ou PIE	APE	TOTAL	SP e/ou PIE	APE	TOTAL	
1995	50.680	687	51.367	4.197	2.900	7.097	1	0	1				657	55.535	3.587	59.122
1996	52.432	687	53.119	4.105	2.920	7.025	1	0	1				657	57.195	3.607	60.802
1997	53.987	902	54.889	4.506	2.920	7.426	1	0	1				657	59.151	3.822	62.973
1998	55.857	902	56.759	4.793	2.995	7.788	6	0	6				657	61.313	3.897	65.210
1999	58.085	912	58.997	5.198	3.309	8.507	19	0	19				657	63.959	4.221	68.180
2000	60.095	968	61.063	6.548	4.075	10.623	19	0	19				1.966	68.628	5.043	73.671
2001	61.439	970	62.409	6.751	3.730	10.481	21	0	21				1.966	70.177	4.700	74.877
2002	63.324	1.150	64.474	9.714	4.099	13.813	22	0	22				2.007	75.066	5.249	80.315
2003	66.494	1.204	67.698	11.292	4.838	16.130	22	0	22				2.007	79.815	6.042	85.857
2004	67.659	1.429	69.088	14.405	5.151	19.556	27	2	29				2.007	84.097	6.582	90.679
2005	69.472	1.588	71.060	14.627	5.143	19.770	27	2	29				2.007	86.132	6.733	92.865
2006	72.006	1.672	73.678	13.886	6.486	20.372	235	2	237				2.007	88.136	8.159	96.295
2007	73.620	3.249	76.869	14.206	7.023	21.229	245	2	247				2.007	90.078	10.274	100.352
2008	74.235	3.310	77.545	14.766	8.233	22.999	396	2	398				2.007	91.404	11.545	102.949
2009	74.853	3.757	78.610	16.276	9.074	25.350	600	2	602				2.007	93.735	12.834	106.569
2010	76.631	4.072	80.703	17.659	12.030	29.689	925	2	927	1		1	2.007	97.223	16.104	113.327
2011	78.023	4.436	82.459	17.906	13.337	31.243	1.423	2	1.425	1		1	2.007	99.359	17.775	117.135
2012	79.673	4.621	84.294	18.558	14.220	32.778	1.890	2	1.892	2		2	2.007	102.131	18.842	120.973
2013	81.213	4.805	86.018	21.426	15.102	36.528	2.200	2	2.202	2	3	5	1.990	106.831	19.913	126.743
2014	84.330	4.863	89.193	21.800	16.027	37.827	4.886	2	4.888	6	9	15	1.990	113.011	20.901	133.913
2015	86.766	4.884	91.650	21.607	17.956	39.563	7.631	2	7.633	6	15	21	1.990	118.000	22.858	140.858

SP - Serviço Público
 SP - Public Service
 PIE - Produção Independente de Energia
 PIE - Independent Energy Producer
 APE - Autoprodução de energia
 APE - Self-producer
¹ Inclui metade da Usina de Itaipu / ¹ It includes half of Itaipu Power Plant.
² Não inclui a potência referente à participação acionária de consumidores tradicionalmente APE. / ² Does not include part of traditional APE power capacity.
³ Plantas PIE, tradicionalmente APE, estão classificadas em APE. / ³ Plants PIE, traditionally APE, are classified as APE.
⁴ Solar Fotovoltaicas. / ⁴ Photovoltaic.

Fonte: Balanço energético nacional (EPE, 2016).

O racionamento ocorrido em 2001 despertou no Brasil a preocupação com a diversificação das fontes de geração, algo que no mundo já havia acontecido quase 30 anos antes, devido às duas crises do petróleo; fez surgir também maior interesse pelo desenvolvimento das fontes alternativas, especificamente a eólica, a biomassa e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

O desenvolvimento dessas fontes foi incentivado através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado pela Lei 10.438/2002 e hoje reconhecido como marco histórico da expansão da fonte eólica. Ainda observando a Figura 1, relativamente aos anos de 2005 e 2006, é possível verificar a importância do PROINFA para a expansão da capacidade instalada da fonte eólica.

Atualmente, a eólica continua sua evolução acentuada, apesar de alguns percalços recentes, devidos à ausência de novas contratações nos anos de 2015 e 2016, mas agora já sem o incentivo do PROINFA. A partir de 2014, observa-se que a fonte solar inicia um aumento de participação na matriz elétrica, embora ainda pouco representativo em valores absolutos, contudo já significativo em termos de evolução percentual da própria fonte.

Por consequência, em 2015 a matriz elétrica brasileira apresentava a capacidade instalada total de 140.858 MW, representando assim um aumento de 46% em relação ao ano de 2006. Desse total instalado, 7.633 MW são de origem eólica, indicando uma participação de 5,4%, enquanto a solar possuía 21 MW de capacidade instalada, com participação inferior a 1%.

A ampliação necessária da matriz elétrica brasileira causou, dessa forma, a necessidade de ampliação do sistema elétrico nacional, representado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), no sentido de permitir a expansão territorial e a integração de novas fontes de geração para, com isso, buscar o atendimento com qualidade do fornecimento de energia elétrica.

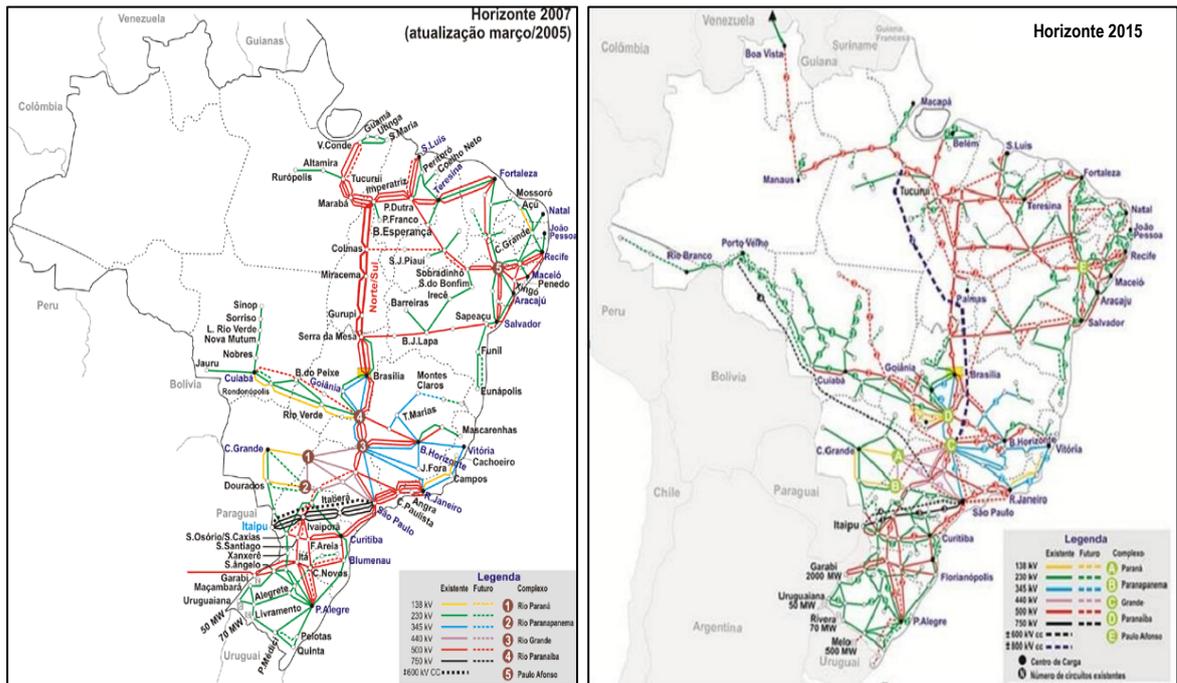
O SIN é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, sendo composto, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em 16 bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (2018).

O Brasil é um país de grande extensão territorial e, como dito anteriormente, expandiu sua capacidade de geração com base na exploração do recurso hídrico, através de usinas naturalmente afastadas dos grandes centros de consumo. Isso fez com que, ao mesmo tempo, fosse necessário transmitir blocos de energia por longas distâncias e também permitiu a exploração da diversidade dos regimes hidrológicos das diferentes bacias que compõem o SIN, proporcionando ganhos sinérgicos ao país.

Conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018) “Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado”. Na

Figura 2 observa-se a configuração das linhas de transmissão do SIN nos anos de 2005 e 2015, sendo possível verificar a expansão da rede de transmissão, principalmente em 500 kV e 230 kV, com maior participação, principalmente, na região nordeste, demonstrando a expansão ocorrida para atender ao crescimento da geração mencionada, principalmente nesta região do Brasil.

Figura 2 - Configuração das linhas de transmissão do SIN em 2005 e 2015



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2018).

2.2 POLÍTICA ENERGÉTICA NACIONAL

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), instituído pela Lei 9.478/1997, é um órgão de assessoramento da Presidência da República para a formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia (BRASIL, 2018).

Destaca-se, dentre suas atribuições, a responsabilidade de propor ao Presidente da República medidas específicas destinadas a:

- promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos do País;
- assegurar, em função das características regionais, o suprimento de insumos energéticos nas áreas mais remotas ou de difícil acesso do País; e

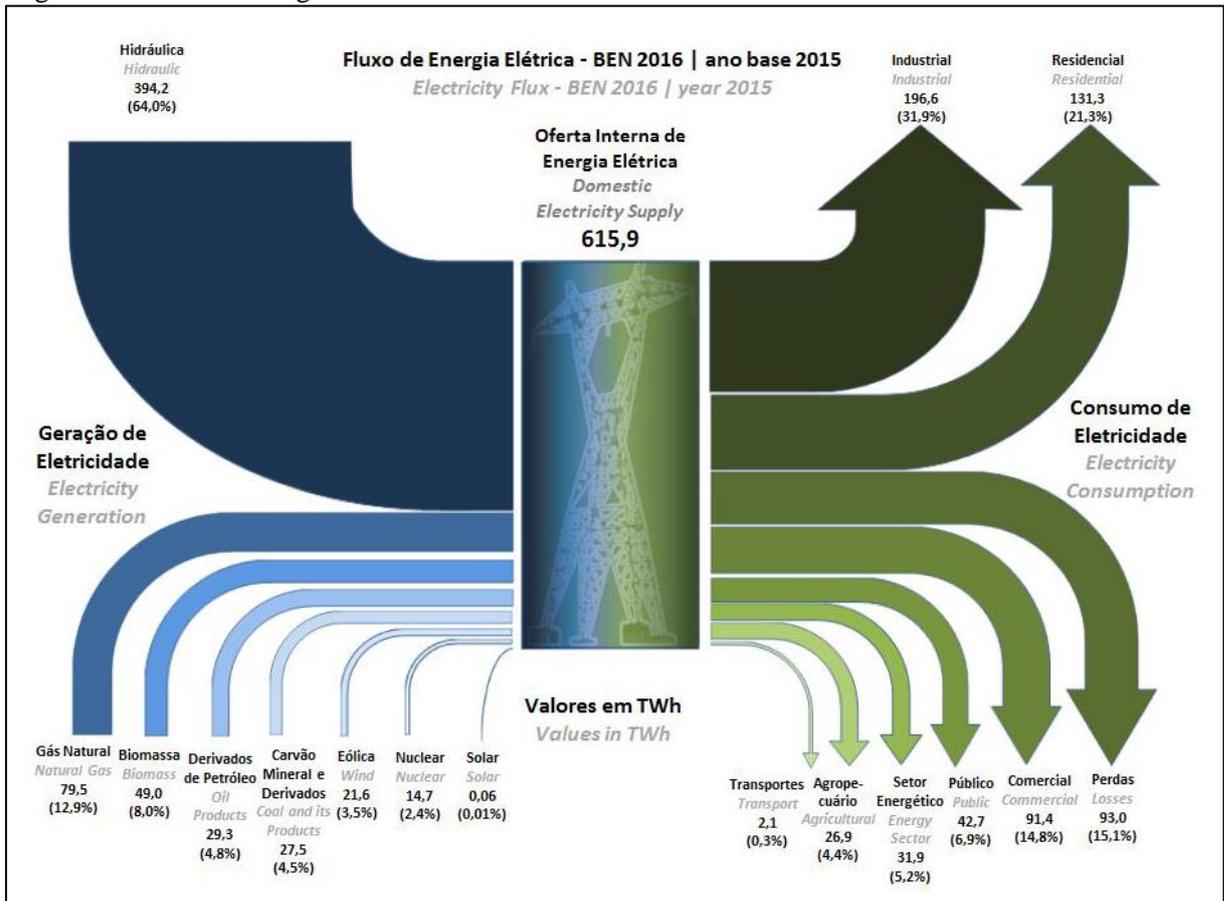
- c) rever periodicamente as matrizes energéticas aplicadas às diversas regiões do País, considerando as fontes convencionais e alternativas bem como as tecnologias disponíveis. Para essa função, o CNPE conta com o apoio técnico dos órgãos reguladores do setor energético, dentre eles o Ministério das Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cujos presidentes participam como membros natos do CNPE.

Em 2007, o MME e a EPE publicaram o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), composto por inúmeros estudos que “[...] consideram o estado da arte e as perspectivas do desenvolvimento tecnológico e as condições de sustentabilidade socioambiental e [...] documentam as análises e pesquisas realizadas no sentido de fornecer subsídios para a formulação de uma estratégia para a expansão da oferta de energia”. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007, p. 24 e 26).

Nesse Plano Nacional, está preconizado pelo EPE (2007, p. 178) que “[...] o emprego em uma escala maior das fontes alternativas (renováveis e não convencionais, como os resíduos urbanos, observará a conciliação entre dois direcionamentos estratégicos: incentivar a busca de soluções ‘limpas’ e sustentáveis para a matriz energética brasileira e minimizar o impacto do custo de produção de energia para o consumidor”.

A projeção apresentada pelo PNE 2030 indica que, no horizonte desse estudo, “[...] as fontes renováveis (ou não convencionais) não hidráulicas (biomassa da cana, centrais eólicas e resíduos urbanos) também experimentarão um crescimento expressivo, passando a responder por mais de 4% da oferta interna de eletricidade”, como pode ser visto em EPE (2007, p. 251). Esta projeção foi superada em face do desenvolvimento mais rápido da fonte eólica que em 2015 já correspondia sozinha a 3,5% da geração de eletricidade, conforme Figura 3.

Figura 3 - Fluxo de energia elétrica BEN 2016 – relatório síntese



Fonte: EPE (2016).

2.3 NORMAS REGULATÓRIAS RELACIONADAS ÀS CENTRAIS DE GERAÇÃO

As Resoluções Normativas ANEEL nº 391/2009 e 676/2015 estabelecem terminologias e conceitos relacionados às fontes eólica e solar fotovoltaica, sem, entretanto, defini-los para os sistemas híbridos. A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2009, p. 2) define que “[...] usina eólica é a instalação de produção de energia elétrica a partir da energia cinética dos ventos”, enquanto em ANEEL (2015, p. 2) estabelece que “[...] central geradora fotovoltaica é a instalação de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da radiação solar sob a aplicação do efeito fotovoltaico”.

Para ambos os casos, tanto a usina eólica quanto a central geradora fotovoltaica, com capacidade instalada reduzida, são aquelas cuja potência instalada é inferior a 5.000 kW.

Para que uma central de geração seja constituída, primeiramente se faz necessária a obtenção de outorga para a geração junto à ANEEL e, para tanto, como a energia gerada normalmente se destina ao atendimento de cargas estabelecidas no Ambiente de Contratação

Regulada (ACR), essas centrais precisam ser vencedoras nos leilões de compra de energia promovidos pela EPE.

Para participarem dos leilões, tanto as usinas eólicas quanto as centrais geradoras fotovoltaicas devem obter seu cadastro e habilitação, mediante o envio de informações de forma organizada e apropriada, como preconizado na Portaria MME nº 102, de 22 de março de 2016, com a disponibilização de dados que serão usados no cálculo das garantias físicas dos empreendimentos eólicos e fotovoltaicos, na composição dos contratos de compra e venda no ACR e nos documentos que constituirão os Atos de Autorização do Poder Concedente, como se verifica em EPE (2017a, p.7, 2017b, p.7).

Dentre as informações fornecidas, ressalta-se a importância da Licença Ambiental, dos Estudos e Relatórios de Impactos Ambientais (EIA/RIMA), do Parecer de Acesso que atesta a possibilidade de acesso ao SIN e das certificações de dados anemométricos, para as usinas eólicas, e de dados solarimétricos, para as centrais fotovoltaicas, assim como da certificação de produção de anual de energia para ambos os tipos de centrais.

Para centrais de geração baseadas em sistemas híbridos, Leoni e outros (2017, p. 5) apontam que “[...] a carência de regulação específica dificulta a inserção de projetos de sistemas híbridos na matriz energética brasileira [...], fazendo com que sinergias como o efetivo compartilhamento da infraestrutura, da obtenção de licenças e autorizações e o aproveitamento da complementariedade energética, deixem de ser exploradas”.

Entretanto, uma vez que, segundo EPE (2018, p. 1) “a EPE tem observado um interesse crescente de diversos empreendedores no desenvolvimento de projetos de geração de energia elétrica que combinem duas ou mais fontes [...] sob a denominação de ‘usinas híbridas’ [sendo que] a concepção que mais tem tido visibilidade é a que envolve a combinação de geração eólica e fotovoltaica [...]”, esta entidade do setor elétrico brasileiro percebeu que “é necessário amadurecer a discussão sobre o tema e propor uma metodologia consistente para a avaliação da complementariedade entre as fontes [...] que seja adequada para estudos de otimização do sistema de transmissão”, conforme EPE (2017, p. 1)

2.4 LEILÕES DE ENERGIA NO BRASIL

Os leilões regulados de geração e transmissão de energia são componentes fundamentais da nova legislação do setor elétrico brasileiro, introduzida pela Lei 10.848 de 2004 [...] têm promovido a concorrência entre agentes do setor e induzido a entrada de empreendedores [...], resultando em redução de custos e prazos para a construção de novas instalações de geração e transmissão, o que tem beneficiado o consumidor por meio da modicidade tarifária. (LEILÕES..., 2012, p. 2).

Os leilões de geração buscam contratar energia para períodos de fornecimento de 25 a 35 anos, e que sejam capazes de iniciar operação que pode ser no ano seguinte à realização do leilão, denominado Leilão “A-0”, ou até 6 anos após sua realização, denominado Leilão “A-6”. Neles, pode ser contratado o fornecimento de energia em diferentes modalidades quanto à sua forma de entrega, por exemplo, as usinas com características de despachabilidade controlada, tipo usinas hidrelétricas, normalmente são contratadas pela modalidade “quantidade”, que significa, em termos gerais, que a remuneração será proporcional à quantidade de energia entregue ao sistema.

Na modalidade “disponibilidade”, a entrega da energia ocorre apenas mediante solicitação, visando atender a necessidades especificadas pelo planejamento da operação do sistema elétrico. Contudo, nessa modalidade, a usina recebe remuneração especial por estar disponível, a qualquer tempo, para ser utilizada.

Para as centrais geradoras de fontes renováveis como a eólica e solar, considerando-se que sua geração é função da disponibilidade do recurso primário utilizado, e por isso se apresenta como não despachável, essas centrais vêm sendo contratadas nos leilões de geração pela modalidade “disponibilidade”.

O mecanismo de leilão confere a característica de transparência às contratações realizadas por meio da divulgação de informações sobre os ativos contratados e, dessa forma, torna-se possível saber dados importantes sobre as centrais contratadas, como: o valor do investimento a ser realizado e o custo da energia contratada, como pode ser visto na Tabela 1, e que mais adiante, neste trabalho, nos permitirá realizar algumas análises econômicas.

Tabela 1 - Informações sobre leilões de geração de energia

Leilão (1)	Tipo de leilão	Produto	Nome da usina (4)	Submercado do registro do contrato (5)	Tipo de usina	UF da usina	Fonte energética	Combustível / Rio da usina	Potência da usina (MW) (6)	Potência Final Instalada C.C. (MWp) (235)	Garantia Física da usina (MW médio) (7)	Tipo de contrato (QTD/DIS)	Preço de Venda ou ICB na data do leilão (R\$/MWh) (55)	Data de Realização do leilão	Receita fixa por contrato na data do leilão para o ano A (R\$/ano) (39)	Receita fixa por contrato na data do leilão para o ano A+1 (R\$/ano) (39)	Receita fixa por contrato na data do leilão para os demais anos (R\$/ano) (39)	Data do Início de Suprimento	Data do Fim de Suprimento
20%LEN	LEN	DIST-2019	ACRE	SE	UTE	AC	Biomassa	Cavaco de Madeira	163,999	0,000	135,100	DIS	206,90	28/11/2014	2.039.720,88	2.039.720,88	2.039.720,88	01/01/2019	31/12/2043
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	ASSURUÁ III	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	12,000	0,000	5,900	QTD	142,90	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	ASSURUÁ IV	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	30,000	0,000	13,100	QTD	142,90	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 01	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	27,000	0,000	14,200	DIS	135,50	28/11/2014	224.689,00	224.689,00	224.689,00	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 02	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	27,000	0,000	11,300	DIS	135,50	28/11/2014	178.999,31	178.999,31	178.999,31	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 03	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	27,000	0,000	13,500	DIS	135,50	28/11/2014	213.611,66	213.611,66	213.611,66	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 04	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	27,000	0,000	12,900	DIS	135,50	28/11/2014	205.587,87	205.587,87	205.587,87	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 05	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	24,000	0,000	10,300	DIS	135,50	28/11/2014	162.800,27	162.800,27	162.800,27	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 06	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	27,000	0,000	11,900	DIS	135,50	28/11/2014	189.373,01	189.373,01	189.373,01	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA LAGOA DO BARRO 07	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	27,000	0,000	13,800	DIS	135,50	28/11/2014	218.582,84	218.582,84	218.582,84	01/01/2019	31/12/2038
19%LEN	LEN	DIS-2017	AURA MANGUEIRA VII	S	UEE	RS	Eólica	Vento	22,000	0,000	9,600	DIS	129,50	06/06/2014	532.477,54	532.477,54	532.477,54	01/01/2017	31/12/2036
19%LEN	LEN	DIS-2017	AURA MIRIM II	S	UEE	RS	Eólica	Vento	26,000	0,000	10,800	DIS	129,50	06/06/2014	597.081,87	597.081,87	597.081,87	01/01/2017	31/12/2036
20%LEN	LEN	DISES-2019	AURA QUEIMADA NOVA 03	NE	UEE	PI	Eólica	Vento	9,000	0,000	4,500	DIS	135,50	28/11/2014	71.293,80	71.293,80	71.293,80	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	BOA ESPERANÇA I	NE	UEE	RN	Eólica	Vento	28,000	0,000	14,400	DIS	135,48	28/11/2014	226.044,24	226.044,24	226.044,24	01/01/2019	31/12/2038
21%LEN	LEN	DIS-2020	BOLTBH	NE	UTE	BA	Biomassa	Cavaco de Madeira	50,000	0,000	41,400	DIS	272,01	30/04/2015	7.301.135,64	7.301.135,64	7.301.135,64	01/01/2020	31/12/2044
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	CAETITÉ I	NE	UES	BA	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	29,750	0,000	6,500	QTD	220,30	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	CAETITÉ II	NE	UES	BA	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	29,750	0,000	6,500	QTD	220,30	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	CAETITÉ IV	NE	UES	BA	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	29,750	0,000	6,500	QTD	220,30	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	CAETITÉ V	NE	UES	BA	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	10,500	0,000	2,300	QTD	220,30	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
19%LEN	LEN	DIS-2017	CALANGO 6	NE	UEE	RN	Eólica	Vento	30,000	0,000	18,500	DIS	128,98	06/06/2014	1.027.896,09	1.027.896,09	1.027.896,09	01/01/2017	31/12/2036
20%LEN	LEN	DISES-2019	CAMPO LARGO III	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	29,370	0,000	13,800	DIS	135,49	28/11/2014	217.450,03	217.450,03	217.450,03	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	CAMPO LARGO IV	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	29,370	0,000	13,400	DIS	135,48	28/11/2014	211.289,10	211.289,10	211.289,10	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	CAMPO LARGO V	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	29,370	0,000	13,800	DIS	135,47	28/11/2014	217.127,79	217.127,79	217.127,79	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	CAMPO LARGO VI	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	29,370	0,000	14,100	DIS	135,46	28/11/2014	222.100,67	222.100,67	222.100,67	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	CAMPO LARGO VII	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	29,370	0,000	14,100	DIS	135,45	28/11/2014	222.979,55	222.979,55	222.979,55	01/01/2019	31/12/2038
20%LEN	LEN	DISES-2019	CANOAS	NE	UEE	PB	Eólica	Vento	30,000	0,000	17,100	DIS	136,24	28/11/2014	257.985,45	257.985,45	257.985,45	01/01/2019	31/12/2038
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	CAPOEIRAS III	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	28,000	0,000	11,600	QTD	142,92	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
03%LFA	LFA	BIO-2016	CLEALCO QUEIROZ	SE	UTE	SP	Biomassa	Bagaço de Cana	45,000	0,000	14,100	DIS	206,52	27/04/2015	284.828,69	284.828,69	284.828,69	01/01/2016	31/12/2035
20%LEN	LEN	DIST-2019	CNE	SE	UTE	GO	Biomassa	Bagaço de Cana	105,000	0,000	59,800	DIS	205,23	28/11/2014	1.019.503,59	1.019.503,59	1.019.503,59	01/01/2019	31/12/2043
21%LEN	LEN	DIS-2020	CODORA	SE	UTE	GO	Biomassa	Bagaço de Cana	20,000	0,000	6,200	DIS	278,50	30/04/2015	1.568.184,41	1.568.184,41	1.568.184,41	01/01/2020	31/12/2044
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	COREMAS I	NE	UES	PB	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	30,000	0,000	6,900	QTD	219,78	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
20%LEN	LEN	DIST-2019	COSTA RICA I	SE	UTE	MS	Biomassa	Cavaco de Madeira	163,999	0,000	135,100	DIS	207,32	28/11/2014	2.044.907,49	2.044.907,49	2.044.907,49	01/01/2019	31/12/2043
03%LFA	LFA	EOL-2017	CRISTALÂNDIA I	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	30,000	0,000	14,100	DIS	177,47	27/04/2015	83.110,07	164.902,43	164.902,43	01/07/2017	30/06/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	CURRAL DE PEDRAS I	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	20,000	0,000	9,000	QTD	142,90	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	CURRAL DE PEDRAS II	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	30,000	0,000	13,500	QTD	142,90	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	DELFINA I	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	30,000	0,000	13,600	QTD	138,89	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	DELFINA II	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	30,000	0,000	13,600	QTD	138,87	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	DELFINA V	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	30,000	0,000	13,600	QTD	138,88	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
20%LEN	LEN	DIST-2019	DELTA	SE	UTE	MG	Biomassa	Bagaço de Cana	30,000	0,000	6,400	DIS	197,00	28/11/2014	150.017,40	150.017,40	150.017,40	01/01/2019	31/12/2043
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	DIAMANTE II	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	18,000	0,000	7,700	QTD	142,91	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UEE-ER20	DIAMANTE III	NE	UEE	BA	Eólica	Vento	18,000	0,000	7,900	QTD	142,90	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	DRACENA 1	SE	UES	SP	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	30,000	0,000	5,900	QTD	217,75	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	DRACENA 2	SE	UES	SP	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	30,000	0,000	5,900	QTD	217,75	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	DRACENA 3	SE	UES	SP	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	30,000	0,000	5,900	QTD	217,75	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037
06%LER	LER	QTD-UES-ER20	DRACENA 4	SE	UES	SP	Solar Fotovoltaica	Radiação Solar Global	30,000	0,000	5,900	QTD	217,75	31/10/2014	0,00	0,00	0,00	01/10/2017	30/09/2037

Fonte: Adaptado de Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2017).

3 SISTEMAS HÍBRIDOS DE FONTES RENOVÁVEIS APLICÁVEIS AO NORDESTE BRASILEIRO

Atualmente, as fontes eólica e solar apresentam elevado e importante potencial de aplicação, devido à sua grande abundância na natureza e aos favoráveis fatores ambientais de que dispõem, conforme identificou Hart e outros (2012, p. 322). Contudo suas fontes primárias, o vento e a radiação solar, que são intrinsecamente intermitentes, quando associados à característica de consumo variável dos sistemas elétricos tradicionais, tornam a operação desses sistemas uma tarefa ainda mais desafiadora, por necessitarem de boa previsibilidade e disponibilidade de geração.

Entretanto as dificuldades operacionais, apresentadas para os sistemas elétricos com elevada participação de energias renováveis intermitentes, precisam ser estudadas e entendidas como forma para viabilizar as condições necessárias a uma maior participação dessas fontes na matriz energética. Segundo Hart e outros (2012, p. 323) “A dificuldade na análise de sistemas elétricos com renováveis como a eólica e a solar situa-se na correta caracterização da intermitência da fonte e na habilidade do sistema para acomodar essa intermitência”.

A variabilidade e a incerteza são características inerentes a qualquer sistema elétrico e podem ter origem tanto em fatores naturais, como na irradiação solar, na velocidade dos ventos ou na quantidade de chuvas, quanto no desempenho de equipamentos, como geradores e linhas de transmissão e também no próprio comportamento de consumo das cargas. Tais dificuldades devem ser abordadas exclusivamente como fatores que tornam mais onerosa a sua participação, uma vez que implicam a necessidade de serviços ancilares, para que sua participação seja suportada pelo sistema elétrico, demandando uma atenção especial quando envolve planejamento, projeto e implementação.

A possibilidade da complementariedade entre essas fontes, a dispersão geográfica dos geradores, submetendo-os a distintas condições naturais, e a aplicabilidade de sistemas híbridos, baseados em duas ou mais fontes gerando concomitantemente, apresentam-se como alternativas para a mitigação dessas dificuldades.

3.1 INTERMITÊNCIA EÓLICA E SOLAR E SEUS CUSTOS ASSOCIADOS

Conforme foi citado anteriormente, as fontes renováveis eólica e solar têm padrões de intermitência específicos e que variam em decorrência da localidade em que estão disponíveis, do período do dia e também das estações do ano.

No caso específico da fonte eólica, a intermitência decorre principalmente da variação da velocidade do vento, em escalas de tempo que vão desde o intervalo horário, até a variação diária e mensal, apresentando assim uma modulação temporal e também uma sazonalidade anual. Tal variabilidade decorre basicamente do aquecimento da superfície terrestre, o qual ocorre de maneira não uniforme e que, por conseguinte, é o responsável pela característica estocástica da geração eólica.

Entretanto, mesmo com tal comportamento estocástico, é possível, a partir de uma apropriada coleta amostral e de tratamento estatístico dos dados, elaborar previsões assertivas sobre a velocidade estimada dos ventos e, conseqüentemente, da possível geração de energia elétrica nas turbinas eólicas. Como apresentado por Trancoso, Domingos e Pestana (2006, p. 1), a previsibilidade, baseada apenas em séries temporais aplicadas a um modelo de persistência, pode ser suficiente, caso sua finalidade seja apenas o ajuste fino do balanço consumo-produção.

Para a energia solar, a intermitência de geração também está diretamente relacionada à irradiação terrestre, assim como a outros fatores, como apresentado por Pinho (2014, p. 300): “Um gerador fotovoltaico tem suas características elétricas dependentes basicamente da irradiância e da temperatura dos módulos [sendo que] a influência da irradiância solar é muito mais significativa do que a da temperatura”.

O conhecimento dos fatores responsáveis pela intermitência presente nas fontes primárias eólica e solar permite compreender a dificuldade que sua maior inserção pode causar para a operação de sistemas elétricos, uma vez que, para esses sistemas, cuja operação se baseia no balanço de geração e consumo, a necessidade de previsibilidade de geração ou da existência de capacidade de resposta, através de reserva ou fontes com características de rápida resposta, é fator primordial para garantir o correto atendimento das cargas.

Em face das dificuldades impostas para o aumento da participação da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, estudos como NREL (2010a) e NREL (2010b) buscam avaliar a inserção das fontes renováveis intermitentes e indicam a possibilidade da

participação da eólica e da solar nos sistemas interconectados dos Estados Unidos, tanto da região oeste, quanto da região leste, em percentuais da ordem de 30% a 35%, desde que:

- a) ocorra reforço na infraestrutura das redes de transmissão, para disponibilizar alta capacidade e abranger longas distâncias, viabilizando um maior intercâmbio energético entre as regiões; e
- b) desenvolvam-se novas estratégias operacionais para melhor aproveitamento dos recursos de geração já existentes.

No que se refere à participação de fontes renováveis na composição de uma matriz energética, é conveniente, neste ponto do trabalho, analisar qual a efetiva participação dessas fontes. A Tabela 2 apresenta a participação da energia renovável nos países com maior consumo desse tipo de energia, destacando-se que praticamente todos os países mencionados estão no continente europeu e a elevada participação, já há alguns anos, de fontes renováveis na matriz energética da Dinamarca. Ressalta-se que o sistema elétrico dinamarquês possui facilidades para realizar importação e exportação de energia em grandes blocos com países vizinhos, como a Suécia, a Noruega e a Alemanha.

Tabela 2 - Participação de renováveis na matriz energética dos países

	2013	2014	2015
	Renováveis (%)	Renováveis (%)	Renováveis (%)
Dinamarca	20,1%	23,4%	25,4%
Finlândia	10,7%	11,0%	12,0%
Alemanha	9,0%	10,4%	12,5%
Irlanda	8,0%	9,5%	11,0%
Portugal	14,5%	14,6%	14,5%
Espanha	12,2%	12,1%	11,5%
Suécia	9,4%	9,7%	11,7%
Nova Zelândia	10,1%	11,1%	11,4%

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de *BP Statistics* (2015, 2016).

No Brasil, a região nordeste apresenta um cenário de participação das fontes renováveis semelhante ao visto para a Dinamarca, como pode ser observado na Tabela 3, apesar das representativas diferenças existentes entre essa região e aquele país europeu, tanto em termos de área ocupada, quanto em tamanho da carga elétrica existente, o que por si só já seria um dificultador maior para a participação expressiva das fontes renováveis no nordeste brasileiro.

Observa-se que, de forma semelhante à situação da Dinamarca, a região Nordeste do Brasil conta com a possibilidade de intercâmbio de energia, neste caso entretanto, ao contrário

da Dinamarca, o intercâmbio energético ocorre com as demais regiões do próprio país. Essa constatação ratifica o argumento sobre a capacidade de transmissão de grandes blocos de energia entre regiões como um fator essencial para permitir uma maior inserção de fontes renováveis intermitentes.

Tabela 3 - Participação da energia eólica no consumo da região nordeste brasileira

Participação eólica (NE)	2013	2014	2015
Janeiro	3,1%	5,0%	15,4%
Fevereiro	3,4%	4,8%	13,0%
Março	3,0%	4,2%	10,3%
Abril	1,8%	3,8%	9,2%
Maio	2,4%	4,2%	15,5%
Junho	2,2%	8,2%	17,3%
Julho	3,1%	11,6%	21,3%
Agosto	4,1%	14,1%	27,2%
Setembro	5,3%	13,2%	24,0%
Outubro	5,2%	15,9%	24,2%
Novembro	5,2%	13,3%	20,2%
Dezembro	4,6%	14,2%	22,1%
Total	3,6%	9,4%	18,2%

Fonte: Elaboração própria, com base em dados disponíveis do Operador Nacional do Sistema Elétrico (2016).

Apesar de influenciados, seja pela disponibilidade existente dos recursos renováveis ou pela eventual escassez momentânea de outros recursos, de fato observa-se, tanto para a Dinamarca quanto para o nordeste brasileiro, um maior uso das fontes renováveis intermitentes, apesar das dificuldades operacionais decorrentes da variabilidade e imprevisibilidade dessas fontes. Situações como a observada para a Dinamarca e para o nordeste brasileiro ainda são casos excepcionais no mundo.

Outro ponto importante para se destacar diz respeito aos custos operacionais adicionados pela inserção dessas fontes renováveis intermitentes que não são decorrentes exclusivamente da necessidade de reforços na infraestrutura de transmissão, mas também de outras ações já necessárias ao balanceamento, em tempo real, do equilíbrio carga e geração, como a necessidade de reserva de capacidade de geração disponível.

Essa reserva é utilizada, sempre que necessário, para garantir o atendimento das cargas durante eventos de redução da geração por interrupções não programadas dos geradores ou, também, quando acontecem elevações rápidas do consumo pelas cargas, por exemplo, decorrentes do aumento da temperatura ambiente que implica uma maior utilização de sistemas

de refrigeração. Essas reservas fazem parte do sistema como um todo e, portanto, já compõem o custo de geração desses sistemas.

Neste trabalho, não será abordada de forma quantitativa a relação custo-benefício da expansão da capacidade instalada por meio de fontes fósseis ou renováveis, pois tal abordagem exigiria informações adicionais sobre outras variáveis fora do objetivo deste trabalho, como: conhecimento sobre a possibilidade de escassez dos recursos fósseis e sobre a necessidade ambiental de adequação das emissões de gases de efeito estufa e de poluentes para patamares sustentáveis que interferem diretamente na decisão de expansão através das fontes renováveis.

Dessa forma, o foco está concentrado nas ações necessárias para uma maior geração de eletricidade por meio de fontes renováveis intermitentes. Nesta linha de raciocínio, para sistemas com alta penetração de renováveis, Hart e outros (2012, p. 327) observou que:

Vários estudos têm demonstrado que a agregação de múltiplos geradores intermitentes pode reduzir a variabilidade e a incerteza de um *portfólio*, seja pela suavização estatística em uma única tecnologia empregada em grandes áreas geográficas ou da combinação de tecnologias que utilizam recursos renováveis diferentes (e muitas vezes não correlacionados) [...] reduzindo o custo médio da energia, apesar do aumento nos custos com transmissão.

Em seu trabalho, Lueken, Cohen e Apt (2012, p. 9.761) constataram que a intermitência dos geradores eólicos e solares adiciona custos devido à necessidade de energia para balancear o sistema e a outros serviços ancilares, calculando o custo dessa intermitência para geradores eólicos, solares térmicos e fotovoltaicos, localizados no estado da Califórnia, nos Estados Unidos, em 2010, obtendo, como resultados, percentuais de aumento do custo em 10,2%, 11,9% e 18,9-26,5%, respectivamente.

Não é propósito deste trabalho reproduzir para a realidade brasileira o cálculo de custo da intermitência das fontes renováveis apresentado, devido à ausência de fontes públicas para obtenção do custo dos serviços ancilares necessários. Esses resultados serão utilizados tão somente de forma argumentativa para correlacionar com a necessidade ou, ainda melhor, com a oportunidade de, ao integrar as fontes renováveis intermitentes ao sistema elétrico brasileiro, já com sua característica de intermitência amortecida, evitar o aumento dos custos associados a essa geração.

Até determinado patamar de inserção, as fontes renováveis intermitentes tendem a causar pequeno aumento nos custos operacionais do sistema elétrico, uma vez que a variação de geração causada pela intermitência pode ser absorvida pelas reservas já existentes e

necessárias à operação normal dos sistemas elétricos convencionais. Entretanto, a partir de um determinado patamar dessa inserção, as fontes renováveis passam a requerer maiores custos operacionais, seja pela necessidade de expansão das redes elétricas, até onde estejam disponíveis os recursos primários, ou ainda pela imposição de aumento na reserva operativa do sistema, como anteriormente explicado.

A definição do patamar de inserção, a partir do qual os custos adicionais se tornam relevantes, é de difícil obtenção e depende da configuração de cada sistema. No Brasil, devido à característica hidrotérmica do sistema elétrico, espera-se que o aumento de custo operacional devido à intermitência das energias renováveis seja menor, em relação ao de outros países, onde a configuração existente está baseada em energia térmica nuclear e a carvão.

Todavia, para que um elevado patamar de inserção das fontes renováveis intermitentes seja obtido de forma sustentável, será necessário avançar nas questões relacionadas à conservação de energia e à eficiência energética, garantindo um melhor aproveitamento dos recursos atuais, assim como a implementação das chamadas redes inteligentes – smart grids – com suas facilidades de comunicação e ferramentas de controle para otimização do uso desses mesmos recursos.

Uma participação das fontes renováveis em larga escala demandará maior conhecimento das sinergias possíveis para sua utilização no setor energético como um todo, ao invés apenas de participação no setor elétrico. O conceito de sistemas de energia inteligentes – smart energy system –, apresentado por Lund (2014) se baseia nas flexibilidades decorrentes da junção dos setores elétrico, térmico e de transportes, para compensar a falta de flexibilidade de fontes renováveis, como a eólica e a solar. Essa abordagem se mostra importante para a inserção das fontes eólica e solar, assim como as demais renováveis intermitentes, em larga escala, estando alinhada com o objetivo de redução das emissões de CO₂ e poluentes do ar.

O pior efeito que a variabilidade e a incerteza podem causar aos sistemas elétricos é o não atendimento de cargas e, neste contexto, a previsibilidade da geração tem relevância para o processo de planejamento da operação dos sistemas elétricos, pois implica dimensionar corretamente a geração necessária para o atendimento às cargas. A disponibilidade de geração é uma característica importante na operação dos sistemas elétricos, pois adapta no tempo a geração efetiva à variação do consumo pelas cargas alimentadas.

Dessa forma, as fontes primárias que permitam uma maior previsibilidade e disponibilidade de geração são as fontes preferenciais para garantir a segurança da operação

dos sistemas elétricos em situações de variabilidade, planejadas ou não. Dentre essas fontes preferenciais, as usinas hidrelétricas (UHE), com reservatórios, e as usinas termelétricas (UTE) são as que mais se destacam no histórico e na atualidade do sistema elétrico brasileiro. Ambas contam com elevada previsibilidade, basicamente em função de possuírem armazenamento, seja na forma de água ou de combustível. Esses tipos de usinas também apresentam resposta rápida às variações instantâneas de consumo, pois são capazes de variar sua injeção de potência na rede elétrica, com velocidade compatível com as variações requeridas pelas cargas.

Diante do cenário da utilização de fontes com diferentes perfis de geração, o planejamento operacional assume grande importância nos sistemas elétricos, pois visa proporcionar um equilíbrio adequado entre carga e geração, dentro de parâmetros aceitáveis, sob a ótica operacional e também de custos. Um bom planejamento operacional se baseia inicialmente em um adequado entendimento do comportamento da carga, entendendo seu comportamento passado e projetando sua demanda futura, ao mesmo tempo em que acondiciona variáveis, como as indisponibilidades planejadas de geração e os requisitos de segurança e da qualidade necessários ao fornecimento.

Para tanto, em sistemas convencionais, tenta-se adequar a variabilidade da carga a partir do acionamento da reserva operativa girante ou estacionária e de redundâncias na transmissão e distribuição, em um processo de planejamento operacional que objetiva uma otimização econômica para o atendimento atual e futuro. Nos sistemas elétricos com maior participação de fontes renováveis, onde a frequência e a magnitude da variabilidade são maiores, a mitigação da intermitência deve compreender ambas as características por meio dos devidos cuidados na realização das programações de dia anterior e da necessidade de existência de geração adicional, com capacidade para atender às reduções não programadas e às elevações da carga, conforme proposto por Hart e outros (2012, p. 323).

Assim, uma avaliação comparativa entre o planejamento operacional em sistemas convencionais e com elevada participação de renováveis demonstra a similaridade existente entre ambos os processos, porém com uma maior frequência de atualização das informações de entrada necessária ao planejamento dos sistemas com renováveis, devido à intermitência dessas fontes que se adiciona às características naturais de variação das cargas convencionais para ambos os tipos de sistemas.

Por fim, em seu trabalho, Sovacool (2008, p. 289) constata, a partir de pesquisa realizada com envolvidos no setor, que a real barreira limitante para uma participação em larga escala de

fontes renováveis intermitentes, no sistema elétrico dos Estados Unidos, é a inércia social, política e prática, por familiaridade em relação ao sistema tradicional existente, uma vez que a intermitência das fontes renováveis pode ser prevista, gerenciada e mitigada.

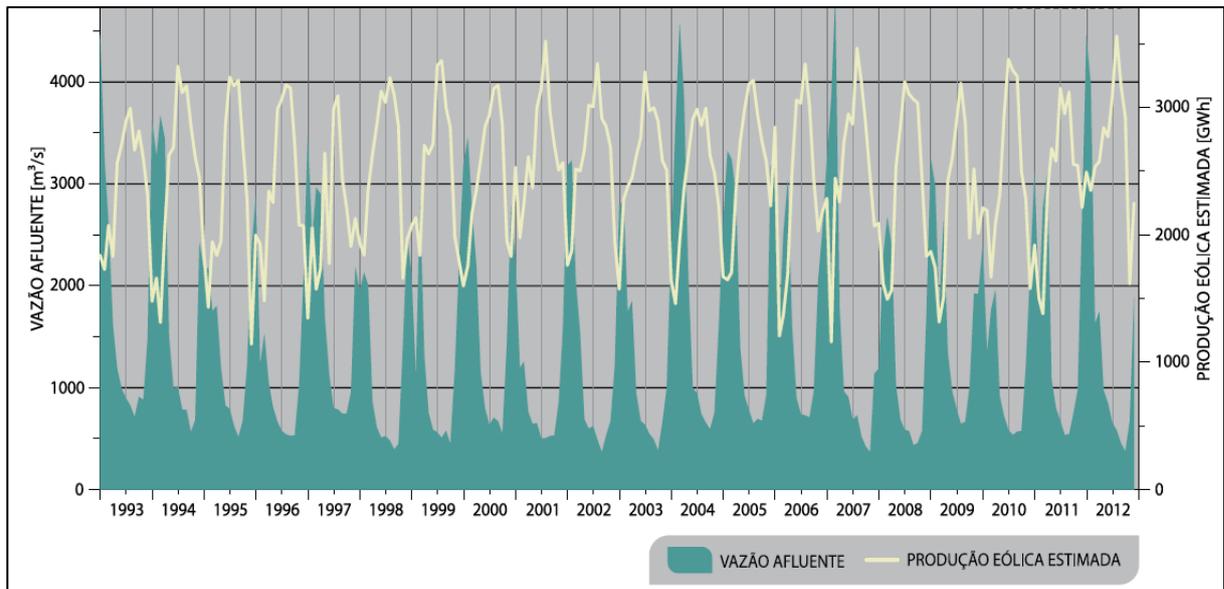
3.2 COMPLEMENTARIEDADE ENTRE FONTES RENOVÁVEIS

A complementariedade entre fontes renováveis pode ser definida como a combinação de uma ou mais fontes, estejam elas próximas ou geograficamente dispersas, conforme apresentado por Hoicka e Rowlands (2011, p. 98). Assim, a utilização dessa técnica é vista como uma opção para lidar com a variabilidade das fontes renováveis intermitentes e, por isso, diversos pesquisadores, ao redor do mundo, vêm se dedicando a estudar a complementariedade com o intuito de melhor lidar com a intermitência das fontes renováveis. Estudos já realizados apontam para a existência de elevado grau de correlação entre as fontes eólica-solar e eólica-hidráulica nessas regiões, como os apresentados por Jeréz e outros (2013), Hoicka e Rowlands, (2011), Li, Agelidis e Shrivastava (2009) e Schmidt, Cancelli e Pereira Jr (2016).

Além da correlação entre as fontes, os resultados observados apresentaram que a complementariedade existente reduz a intermitência isolada de uma das fontes, quando analisada em separado.

No Nordeste do Brasil, verifica-se que, durante o período das chuvas, ocorrem menos ventos e vice-versa, sugerindo haver complementariedade entre os regimes de chuvas e de ventos. Como pode ser visto na Figura 4, o comportamento dos ventos e do regime de chuvas na Bahia, em específico para a região do rio São Francisco, que é o principal constituinte dos reservatórios hídricos da região, leva a acreditar que a complementariedade entre essas fontes permitirá um melhor atendimento à demanda elétrica do sistema, mesmo a partir de fontes intermitentes, reduzindo a necessidade de serviços ancilares e, conseqüentemente, os desafios e os custos operativos.

Figura 4 - Comportamento da geração eólica e hídrica na região do rio São Francisco

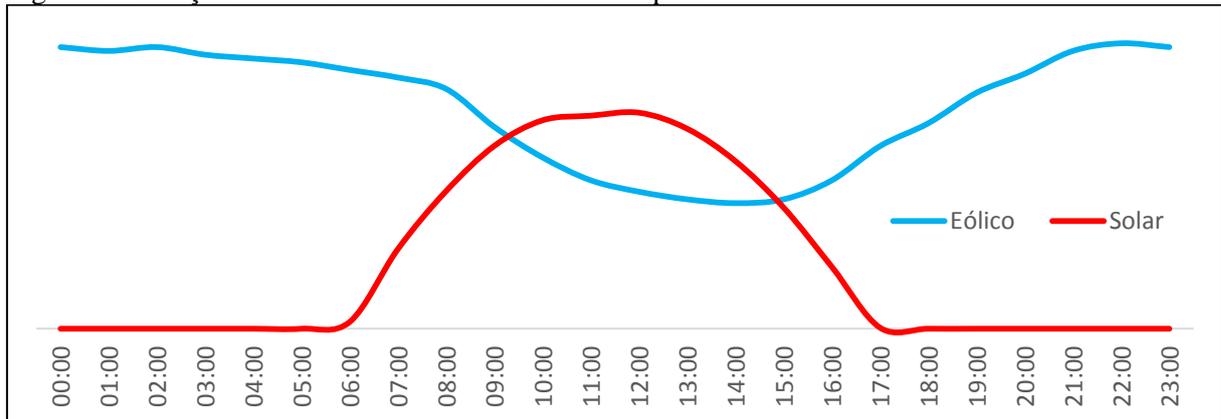


Fonte: Atlas eólico Bahia (2013).

A complementariedade eólica-hidráulica se apresenta com maior relevância, principalmente para a região nordeste brasileira, pois, como água do rio São Francisco, principal constituinte da bacia hidrográfica desta região, está sendo utilizada, cada vez mais, para outras finalidades econômicas, a exemplo da irrigação e também da própria geração de eletricidade, tornando a recuperação dos reservatórios desta região mais difícil e, fazendo com que, dessa forma, a complementariedade possa representar auxílio à manutenção dos reservatórios da região.

Quanto à complementariedade eólica-solar, o comportamento de geração dessas fontes demonstra que o regime solar e dos ventos, em certas regiões, é naturalmente complementar, conforme pode ser observado na Figura 5, onde são apresentadas curvas de geração em base horária para um dia típico, em uma mesma localidade.

Figura 5 - Geração eólica e solar base horária em dia típico



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Assim, a complementariedade eólica-solar demonstra fortes indícios de ser uma alternativa viável para exploração em certas partes da região nordeste brasileira.

Diante do observado, a partir da investigação da literatura sobre a complementariedade entre fontes renováveis intermitentes distintas, conclui-se que Li, Agelidis e Shrivastava (2009, p. 3.624) está correto ao dizer: “Os resultados apresentados mostram que a instalação de eólicas e solares em um mesmo local devem ser coordenadas para se obter maiores benefícios [...]”.

Outra forma possível de complementariedade é a agregação geográfica de geradores de uma mesma fonte. Em seu trabalho, Hart e outros (2012, p. 328) indica que o aumento do número de fazendas eólicas dispersas geograficamente dentro de um sistema reduz o custo médio da eletricidade produzida, apesar de adicionar custos com transmissão, como também reduz os erros de previsão de geração.

Katzenstein e Apt (2010), citados por Lueken, Cohen e Apt (2012, p. 9.761), examinaram a variabilidade eólica através do espectro de potência e demonstraram que a variabilidade de uma única fazenda eólica pode ser reduzida em 87% pela interconexão com outras quatro fazendas. De forma semelhante, espera-se que a agregação de diversas usinas solares também apresente redução da variabilidade da geração total em relação à de apenas uma usina, porém em menor proporção que a eólica.

Assim, a agregação geográfica se apresenta como uma estratégia de diversificação a ser aplicada na implementação de usinas eólicas ou solares, para reduzir a variabilidade individual dessas fontes, mediante uma dispersão geográfica dos geradores, em relação aos recursos primários, enquanto a agregação de fontes distintas em uma mesma usina busca a redução da

variabilidade total, por meio de uma equalização da curva de geração, através da compensação decorrente das diferenças entre os regimes de cada fonte primária.

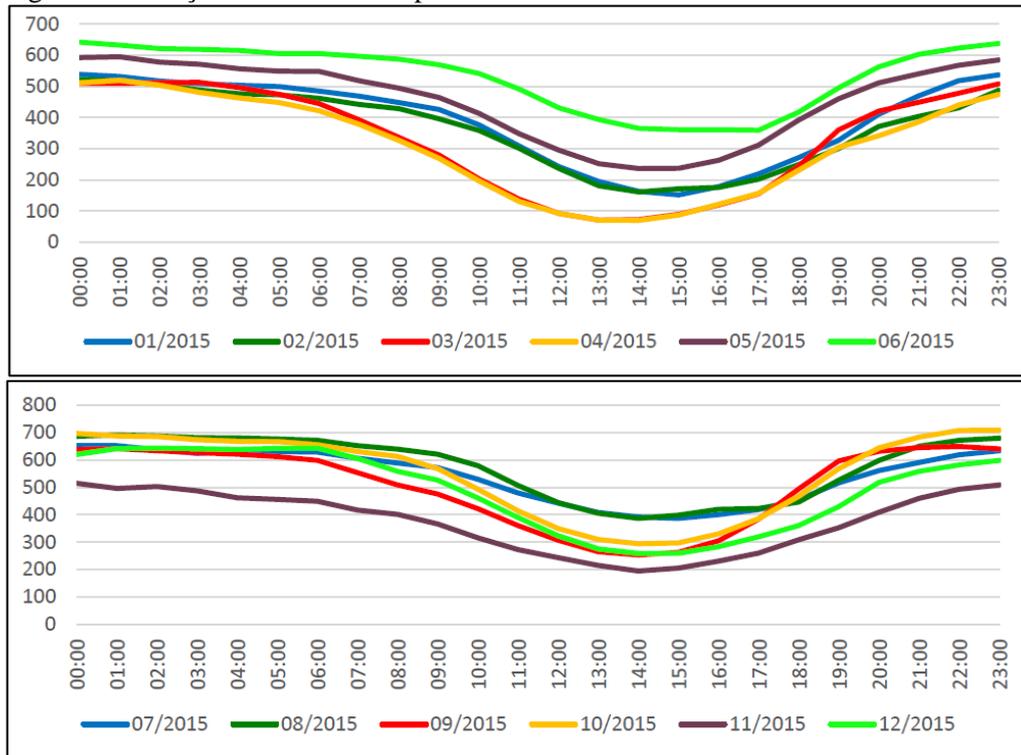
3.2.1 Complementariedade eólico-solar no nordeste brasileiro

Entendendo que as fontes renováveis intermitentes são um caminho para o futuro energético mais sustentável, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, este trabalho optou pelas fontes eólica e solar, devido à sua natureza onipresente e à fácil disponibilidade, o que faz com que elas sejam consideradas as mais promissoras das energias alternativas existentes, conforme Mahesh e Sandhu (2015, p. 1.136).

Assim, busca-se entender pela análise dos Boletins Mensais de Geração Eólica, relativos ao ano de 2015, publicados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2015), qual o comportamento da geração das centrais eólicas no Brasil, com o objetivo de identificar região que favoreça a possibilidade de complementariedade de geração dessa fonte com a fonte solar.

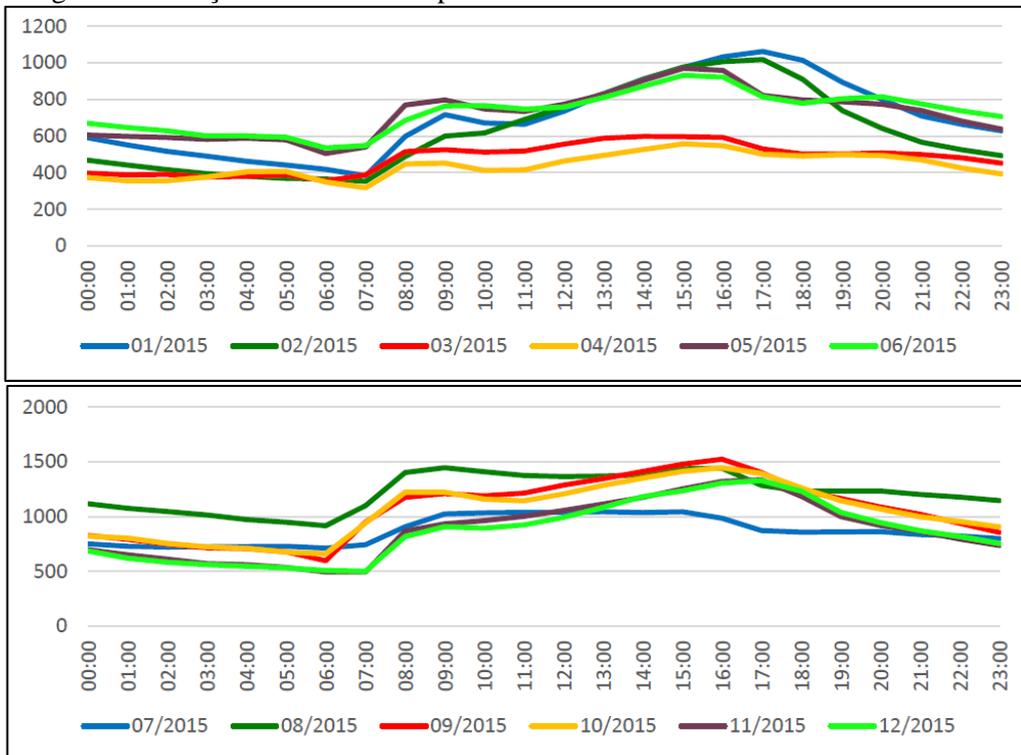
As Figuras 6, 7 e 8 ilustram o comportamento de geração nos estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará, respectivamente, que são os que apresentam atualmente a maior capacidade instalada para a fonte eólica. A partir delas, evidencia-se que o comportamento da geração eólica, no Rio Grande do Norte e Ceará, é maior no período diurno, enquanto que para a Bahia a maior geração ocorre durante a noite, intensificando a elevação de geração a partir 18h até atingir um patamar máximo por volta das 23h e iniciando redução acentuada por volta das 6h, até alcançar um patamar mínimo no período situado entre 13h e 15h, para então repetir o ciclo no dia seguinte.

Figura 6 - Geração eólica em dia típico no estado da Bahia



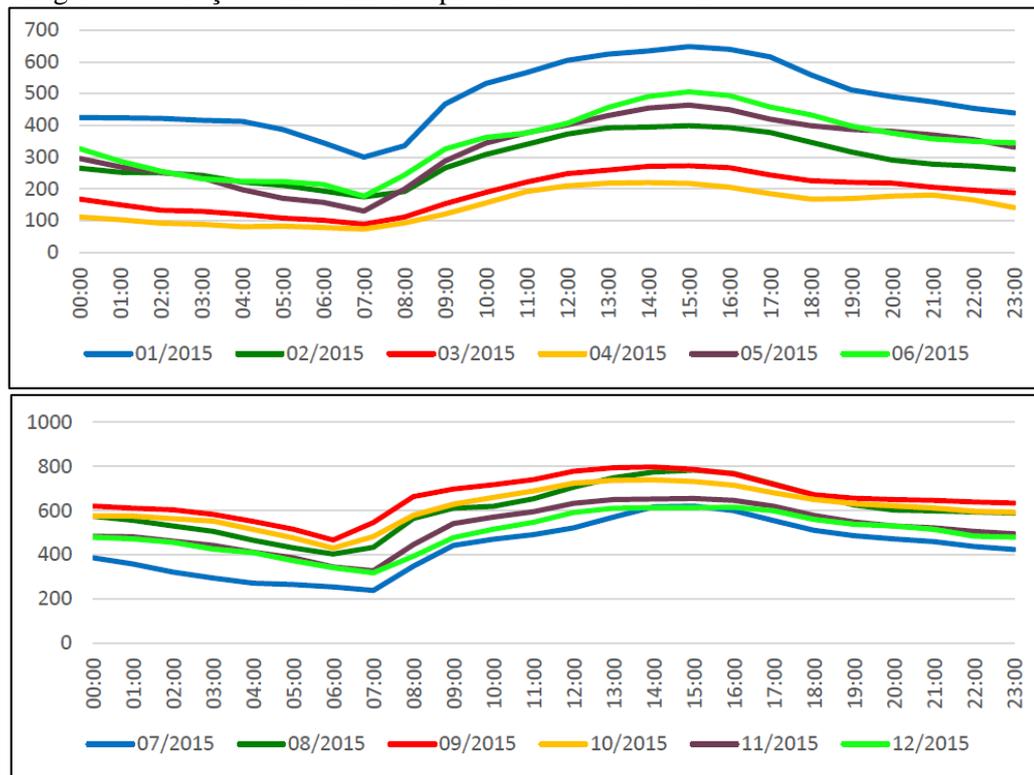
Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2015).

Figura 7 - Geração eólica em dia típico no estado do Rio Grande do Norte



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2015)

Figura 8 - Geração eólica em dia típico no estado do Ceará



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2015).

Dessa forma, o comportamento típico da geração eólica para o estado da Bahia se apresenta fortemente favorável à complementariedade com a fonte solar, cujo comportamento típico se inicia entre 6h e 7h e se encerra entre 17h e 18h, conforme é apresentado na Figura 5.

Convém, neste ponto, esclarecer que os Boletins Mensais de Geração Eólica apresentam, em periodicidade mensal, informações sobre a capacidade total instalada e a geração das principais usinas eólicas, agregadas por submercados e também por estados, permitindo uma melhor compreensão sobre o comportamento da fonte eólica. Este trabalho utilizou como base o ano de 2015, quando já é possível acessar dados de pelo menos 12 meses consecutivos das centrais representativas do que se considera o estado da arte em termos tecnológicos para os parques eólicos existentes no Brasil.

3.2.2 O papel da biomassa como fonte adicional

O aumento da inserção de fontes renováveis intermitentes encontra, nas dificuldades operacionais esperadas para o sistema elétrico, um argumento retórico que dificulta sua aceitação, conforme pode ser visto no trabalho apresentado por Sovacool (2008).

A inserção de uma fonte adicional a um sistema híbrido já é objeto de diversos estudos por proporcionar maior confiabilidade. Com maior frequência, observa-se a proposição de inserção de meios para o armazenamento de energia, através de bancos de baterias estacionárias, como fonte adicional aos sistemas híbridos, pois, na maioria dos casos, trata-se de sistemas de pequeno porte, localizados em regiões remotas e com objetivo de atendimento a cargas não essenciais, como pode ser visto em Motaleb, Bekdache e Barrios (2016).

Para se obter um sistema híbrido eólico-solar de escala comercial que apresente uma curva de geração estabilizada, sugere-se neste trabalho que seja adicionado ao sistema uma terceira fonte, também renovável, porém com características operacionais que permitam o controle de sua geração, em regime complementar à geração simultânea das fontes eólica e solar.

Assim, considerando-se, adicionalmente aos fatores tecnológicos e econômicos, os fatores socioambientais, como a disponibilidade ou não de água para irrigação na região, a possibilidade de geração de empregos localmente para manejo agrícola e a redução de gases de efeito estufa, identifica-se neste trabalho que a fonte biomassa para energia, baseada na produção de madeira, através do cultivo de espécies arbóreas como o eucalipto e pinus, com a finalidade específica para servir como combustível para queima, é a alternativa mais adequada para ser a terceira fonte renovável do sistema híbrido proposto, diferentemente, por exemplo, da opção hídrica, mesmo que PCH, pois esta necessitaria também estar disponível no mesmo sítio.

A proposição dessa fonte adicional visa permitir que o sistema híbrido proposto apresente um comportamento de geração semelhante ao verificado nas usinas térmicas ou hídricas com reservatório, possibilitando que sua presença no sistema elétrico seja percebida de forma semelhante ao comportamento de geração dessas últimas fontes e, dessa forma, permita a expansão do sistema, por meio das fontes renováveis em questão, sem que sua inserção seja limitada a um patamar máximo, por eventuais dificuldades relacionadas à operação do sistema.

Uma central térmica a biomassa opera com tecnologia já conhecida e dominada, há vários anos, possibilitando a minimização de eventuais riscos tecnológicos. Sua capacidade de modulação de geração é definida pela capacidade de reação da caldeira utilizada para a queima da biomassa que, apesar de ser mais lenta quando comparada à das caldeiras a gás natural, normalmente apresenta tempo de resposta adequado. Seu comportamento como fonte contínua

está diretamente relacionado à disponibilidade de biomassa e também de água para a geração de vapor.

Por se tratar de biomassa para energia, isso implica diretamente a existência de floresta cultivada de forma adequada e exclusiva, para proporcionar a disponibilidade necessária da biomassa como combustível. Assim, entende-se que o dimensionamento da capacidade instalada para a fonte biomassa do sistema híbrido é uma tarefa relativamente fácil. A limitante água demanda avaliação específica do local, embora já se tenha conhecimento de usinas com tecnologia de resfriamento a ar, que são adequadas para utilização em regiões com baixa disponibilidade ou com água em padrão inadequado ao processo de geração de vapor.

A dificuldade operacional existente para a modulação da geração a partir de biomassa pode ser avaliada como aceitável para esse tipo de fonte, uma vez que é normal em usinas térmicas, inclusive, naquelas à biomassa, operar como fonte de energia de reserva, com despacho centralizado por operadores de sistemas elétricos, cuja operação se realiza inclusive para atendimento de horário de ponta caracterizado por poucas horas diárias de geração. Por conseguinte, entende-se que a modulação parcial da geração significará um menor desafio operacional para a usina híbrida do que para a térmica de energia de reserva e, dessa forma, terá menor custo de manutenção.

3.3 OPORTUNIDADES RELACIONADAS A SISTEMAS HÍBRIDOS

Um sistema híbrido renovável pode ser definido como aquele que consiste de duas ou mais fontes renováveis, de tal forma que a energia gerada seja mais confiável e menos onerosa, podendo ser ou não integrado à rede, conter equipamentos para armazenamento de energia e contar com a participação de fontes convencionais, conforme apresentado por Mahesh e Sandhu (2015, p. 1.136), aproveitando adequadamente os benefícios de suas características operativas, para obter eficiências maiores do que a eficiência de apenas uma das fontes, como apontado por Khare, Nema e Baredar (2016, p. 24).

Os sistemas híbridos podem ser classificados segundo seu porte e ter sua aplicação definida a partir do tipo de carga que se deseja alimentar, por exemplo: cargas domiciliares em localidades isoladas ou sistemas de telecomunicação remotos, pequenas comunidades isoladas ou ainda para atendimento de cargas regionais.

A disponibilidade de rede de transmissão próxima ao local de instalação pode ser também fator determinante para a escolha da configuração a ser utilizada, permitindo a obtenção de energia a partir do sistema elétrico local, em momentos de baixa geração e também o escoamento de energia adicional em situações de geração elevada, eliminando a necessidade de facilidades para armazenamento de energia e simplificando tecnicamente o dimensionamento e a operação, além de reduzir o custo do sistema híbrido e da energia por ele gerada.

Diversos critérios de avaliação devem ser considerados quando se trata de sistemas híbridos. Em seu trabalho, Upadhyay e Sharma (2014, p. 50) sugeriram utilizar um conjunto composto por:

- a) fatores tecnológicos, como viabilidade, risco e confiabilidade;
- b) fatores econômicos, tipo custos de implantação, disponibilidade de fundos e valor econômico;
- c) fatores sociopolíticos, a exemplo da compatibilidade com os objetivos da política nacional de energia, aceitação política e social e impacto na geração de empregos; e
- d) fatores ambientais, relacionados à emissão de poluentes do ar, ao uso necessário de terras e à disposição de rejeitos.

Dentre os fatores propostos anteriormente, ressalta-se especial atenção para o alinhamento com a política energética, assim como o impacto na geração de empregos. No caso específico do sistema híbrido proposto neste trabalho, a inserção de geração a partir das fontes eólica e solar, além de ser objetivo da política energética nacional, atende também à intenção de aumento na geração de empregos, sejam estes especializados para a indústria de fabricação de aerogeradores e painéis fotovoltaicos e seus componentes associados, ou para os serviços de instalação, operação e manutenção, necessários para ambas as fontes, caracterizando-se, assim, como benefício social decorrente diretamente da existência desse tipo de central de geração.

Quando se trata de empregos na manutenção das centrais geradoras, viabiliza-se inclusive, de forma mais localizada, a criação de empregos na própria região da instalação, assim como também se fomenta o aumento de renda dos proprietários de terras, onde se situam as fazendas eólicas e solares, através do montante pago a título de arrendamento, representando benefício econômico e social para a região de instalação do sistema híbrido.

Para a avaliação da viabilidade técnico-econômica de um sistema híbrido eólico-solar, a disponibilidade de informações sobre a velocidade de ventos e a radiação solar na localidade é essencial para o dimensionamento da capacidade de geração. A qualidade das informações, seja pelo longo prazo de horizonte temporal analisado, ou pela base de tempo em menor escala possível para ambas as fontes, permite maior precisão na definição da geração possível e, portanto, melhor dimensionamento dos equipamentos e da avaliação econômica da operação esperada.

3.3.1 Métodos de dimensionamento e otimização de sistemas elétricos híbridos

O dimensionamento de sistemas elétricos compreende um conjunto de aspectos técnicos e econômicos de complexidade elevada para a obtenção de uma solução satisfatória, permitindo uma maior geração de eletricidade a um menor custo. Nesse sentido, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, com o intuito de estabelecer métodos capazes de definir a capacidade de geração ótima econômica, com confiabilidade de atendimento das cargas por sistemas híbridos; por exemplo: Pérez Navarro e outros (2016), Tina, Gagliano e Raiti (2006), Xu e outros (2013) e Yang, Lu e Zhou (2007).

Do ponto de vista técnico-econômico, o dimensionamento de sistemas elétricos envolve inicialmente a escolha da tecnologia mais adequada para a usina, considerando, nesta decisão, a disponibilidade e o custo do combustível a ser utilizado e também a definição da melhor configuração para o parque gerador, com atenção especial quanto à quantidade e à topologia do arranjo de geradores, a fim de buscar a maior geração possível ao menor custo e, por consequência, a solução ótima econômica.

As fontes renováveis trouxeram desafios adicionais para o dimensionamento de sistemas elétricos que decorrem em muito da característica de intermitência natural dessas fontes, em especial a eólica e a solar, cuja geração é fortemente influenciada pelos regimes de vento e da irradiação solar.

Entretanto, como apontado por Sinha e Chandel (2015, p. 756), as fontes eólica e solar são as mais promissoras para a geração de eletricidade, devido a sua vantajosa complementariedade natural. Decorrente disso, a utilização destas fontes, em um sistema híbrido, se apresenta como uma alternativa cada vez mais utilizada, apesar de tornar o dimensionamento e a sua otimização uma tarefa ainda mais complexa.

Para Busaidi, Kazem e Al-Badi (2016, p. 186)

A necessidade de um método prático para o dimensionamento e otimização da configuração [de sistemas híbridos] se torna um fator relevante na medida que a incerteza das fontes renováveis, com suas características não lineares e de complexidade elevada, busca atender às incertezas da demanda de uma carga.

Segundo Luna-Rubio e outros (2012, p. 1.079), o dimensionamento apropriado de cada componente de um sistema híbrido é fator chave para sua viabilidade técnico-econômica, reforçando ainda mais a importância dos métodos de dimensionamento, quando se trata de usinas geradoras com a participação de fontes renováveis intermitentes.

Existem diversas técnicas aplicáveis ao dimensionamento de sistemas híbridos, destacando-se, dentre elas, o dimensionamento a partir:

- a) da média anual, quando se dimensiona a capacidade de geração a partir da disponibilidade média dos recursos e, com isso, se incorre em subdimensionamento nas ocorrências de disponibilidade abaixo desta média;
- b) do mês mais desfavorável individualmente para cada fonte, quando as capacidades de geração são definidas a partir da pior ocorrência de disponibilidade do recurso;
- c) do mês mais desfavorável em conjunto, quando a capacidade de geração é dimensionada pela maior soma das gerações individuais, e
- d) da probabilidade de não suprimento, sendo que, para esta última, segundo Busaidi, Kazem e Al-Badi (2016, p. 187), é possível a utilização de métodos baseados em simulações cronológicas ou probabilísticas que incorporem a natureza intermitente da fonte e da carga, eliminando a necessidade de dados temporais.

Os métodos de dimensionamento que se baseiam em uma média de geração possível dos recursos eólico e solar proporcionam ao mesmo tempo uma facilidade de desenvolvimento, pela simplicidade de raciocínio, e demandam menores recursos computacionais, porém incorrem em dimensionamentos que normalmente não garantem o pleno atendimento da carga ao longo de todo o período analisado, enquanto os dimensionamentos pelo mês mais desfavorável, seja individualmente ou em conjunto, resultam em dimensionamento de sobre capacidade de geração e, conseqüentemente, em investimento mais oneroso e menos eficiente.

Em seu trabalho, Protogeropoulos, Brinkworth e Marshall (1997) propuseram que o dimensionamento da capacidade de geração fosse definido com base no atendimento da carga durante o pior mês renovável, que na prática significa aquele mês no qual é necessária a maior capacidade instalada conjunta dos recursos eólico e solar. Neste trabalho, foi realizada uma otimização, a partir da seleção da menor quantidade de geradores eólico e solar, dentre aqueles comercialmente disponíveis e, posteriormente, da inserção do uso de baterias estacionárias para complementar o atendimento da carga, permitindo que seja atingido um determinado grau de confiabilidade no fornecimento, cuja capacidade foi dimensionada para se obter o menor custo total do sistema.

Posteriormente, Celik (2003) acrescentou ao método um novo cenário, baseado na capacidade de geração média anual de cada fonte renovável, acrescida de um desvio padrão, e concluiu que este novo cenário representa a solução de menor custo total, pois reduz o sobredimensionamento dos geradores eólico e solar, e também do banco de baterias utilizado.

O dimensionamento proposto por Markvart (1996), a partir de uma metodologia gráfica e analítica, utiliza a teoria de programação linear para garantir que o atendimento de uma determinada carga ocorra a partir dos recursos eólicos e solar existentes. Neste sentido, inicialmente, são definidas, no mesmo gráfico no plano x-y, as retas representativas da fronteira de atendimento à carga, traçadas com a interligação dos pontos representativos da capacidade instalada necessária de cada uma das fontes, para o atendimento pleno da carga, referentes a cada mês do ano e, por consequência, é estabelecida uma curva de dimensionamento, formada pela junção dos segmentos de reta mais à direita do eixo y. Uma vez conhecida a curva de dimensionamento, calcula-se qual a combinação ótima econômica das capacidades instaladas, a partir de um critério econômico referente ao custo de instalação individual das fontes.

Diversas outras técnicas de otimização podem ser aplicadas, apresentando um maior ou menor grau de complexidade e de utilização de recursos computacionais, além de demandar dados climatológicos. Entretanto suas exigências superiores são também reflexo de sua capacidade em atender aos objetivos de otimização ainda mais sofisticados como, por exemplo, atendimento a determinado patamar de confiabilidade e de custo mais econômico ou de menor emissão de poluentes e de gases de efeito estufa.

As técnicas de otimização mais atualizadas, denominadas por Sinha e Chandel (2015, p. 763) como “abordagem de nova geração”, se apresentam, com destaque, por ampliarem a possibilidade de otimização para uma configuração global, mantendo relativa simplicidade

computacional, quando comparadas às demais técnicas. Dentre essas técnicas, segundo Al Busaidi, Kazem e Al-Badi (2016, p. 188), a otimização baseada em redes neurais e em lógica fuzzy, mas principalmente em algoritmo genético, para projetos de sistemas de grande porte, é amplamente usada por maximizar os benefícios econômicos dos sistemas híbridos, devido à sua habilidade em considerar problemas complexos, através de funções econômicas lineares e não lineares.

Mais recentemente, Sinha e Chandel (2015, p. 765) observaram que a pesquisa sobre algoritmos de otimização híbridos, a partir da junção de dois ou mais outros algoritmos, vem se desenvolvendo progressivamente, viabilizando cada vez mais soluções para obtenção de uma maior quantidade de variáveis otimizadas, ao mesmo tempo, enquanto se aproveitam pontos fortes de um determinado algoritmo para fortalecer eventuais pontos fracos de outro, permitindo uma sinergia favorável ao processo de otimização global.

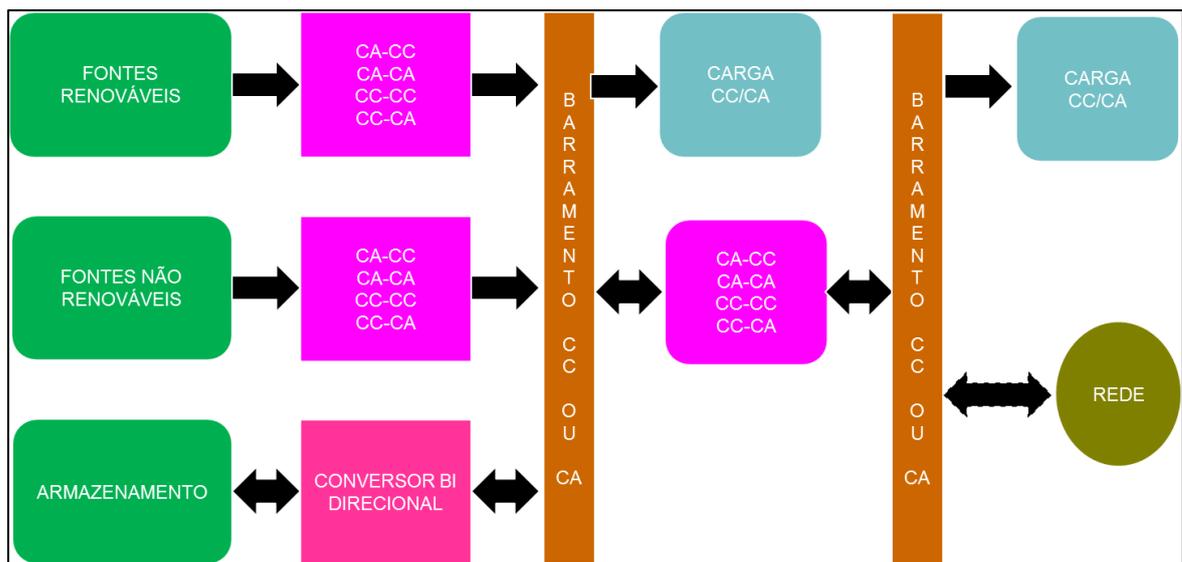
Em sua revisão de literatura, o trabalho apresentado por Sinha e Chandel (2015, p. 766) observou uma quantidade superior de trabalhos baseados no algoritmo genético, em relação aos demais algoritmos híbridos, apesar de que este apresenta desvantagens, quanto à sua velocidade de convergência. A relativa simplicidade computacional necessária para que o algoritmo genético obtenha uma solução ótima global é apontada como sua grande vantagem de utilização, conforme relatam em seu trabalho Hongxing, Wei e Chengzhi (2009, p. 168).

A utilização de técnicas de dimensionamento mais avançadas e também de algoritmos de otimização mais poderosos, do ponto de vista da quantidade de variáveis otimizadas, apresenta-se como um grande desafio, principalmente quando há pouca disponibilidade de dados sobre os recursos eólico e solar. Dessa forma, uma abordagem para a avaliação da viabilidade de um sistema híbrido, que aproveite a complementariedade natural existente entre as fontes eólica e solar, pode ser mais facilmente feita com a aplicação de métodos gráficos e analíticos, como o proposto por Markvart (1996), para posterior refinamento, a partir do uso desses métodos mais sofisticados.

Atenção especial deve ser dada às questões envolvendo a análise do comportamento da carga a ser alimentada, quando da modelagem do sistema eólico e do sistema solar, assim como às restrições e técnicas utilizadas para a otimização do sistema a ser proposto. Em função da diversidade das fontes que integram um sistema híbrido, alguns desafios técnicos devem ser enfrentados, para a obtenção de maior eficiência de geração e de um comportamento com menor variabilidade.

Dentre esses desafios, destacam-se aqueles relacionados aos conversores de energia que podem vistos na Figura 9. A energia eólica é gerada normalmente, em corrente alternada, enquanto que, para a energia solar fotovoltaica, a geração ocorre em corrente contínua. A integração dessas gerações em um mesmo barramento e a maximização dessas gerações são os principais motivos do uso dos conversores CA-CC, que, entretanto, trazem consigo a necessidade do uso de estratégias de controle complexas e sofisticadas.

Figura 9 - Esquemático típico para sistemas híbridos renováveis



Fonte: Krishna e Kumar (2015).

4 APLICAÇÃO DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PARA SISTEMAS HÍBRIDOS

Neste capítulo será estudada a aplicação de um sistema híbrido eólico-solar, concebido para ser instalado em município do estado da Bahia. Para tanto, foi inicialmente selecionada qual a localização adequada, com base na complementariedade possível entre as fontes para, na sequência, ser efetuada uma proposta de dimensionamento da capacidade de geração ótima. Após o dimensionamento, adicionou-se a fonte biomassa ao sistema híbrido proposto, com o objetivo de eliminar o efeito percebido no sistema elétrico pela intermitência das fontes eólica e solar, constituintes desse sistema híbrido.

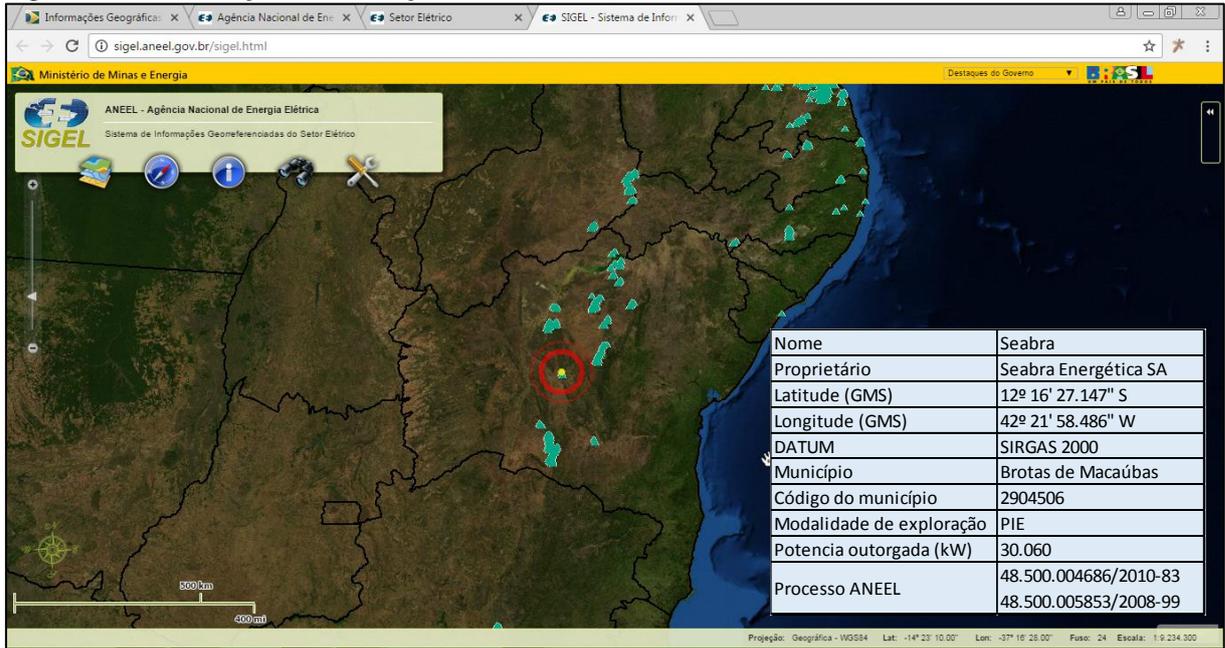
Ao final do capítulo serão apresentados os principais aspectos socioeconômicos relacionados ao sistema proposto.

4.1 O POTENCIAL DE COMPLEMENTARIEDADE EÓLICO-SOLAR NA BAHIA

No capítulo 3, a complementariedade eólico-solar foi tratada de forma qualitativa e, a partir da constatação de que o estado da Bahia apresenta, em geral, um regime de vento noturno, busca-se identificar, neste capítulo, dentre as centrais eólicas existentes neste estado, uma que disponha de dados publicamente disponíveis, em período de pelo menos um ano e que também apresente perfil de geração com maior utilização da capacidade instalada, ou seja, um maior fator de capacidade médio.

A central eólica Seabra (UEE Seabra), localizada no município de Brotas de Macaúbas/BA, cujos dados de localização e autorização pela ANEEL podem ser vistos na Figura 10, foi selecionada por atender aos critérios já mencionados.

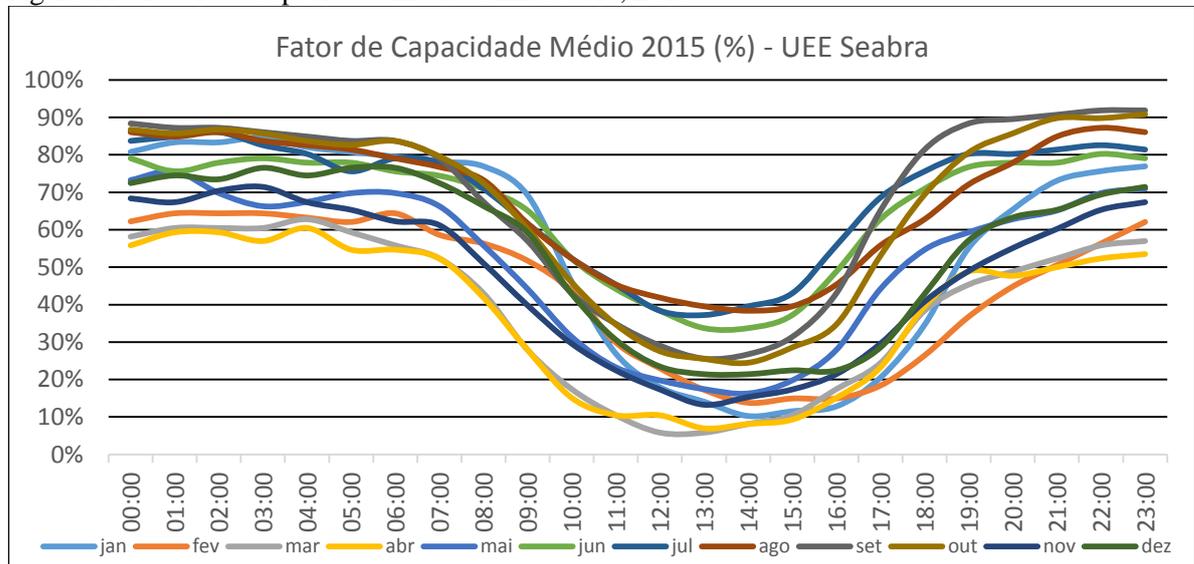
Figura 10 - Localização e informações sobre a central eólica Seabra



Fonte: ANEEL (2017).

A UEE Seabra apresentou, no ano de 2015, como pode ser visto na Figura 11, um perfil de geração com fator de capacidade médio superior a 50%.

Figura 11 - Fator de Capacidade médio UEE Seabra, 2015



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de ONS (2015).

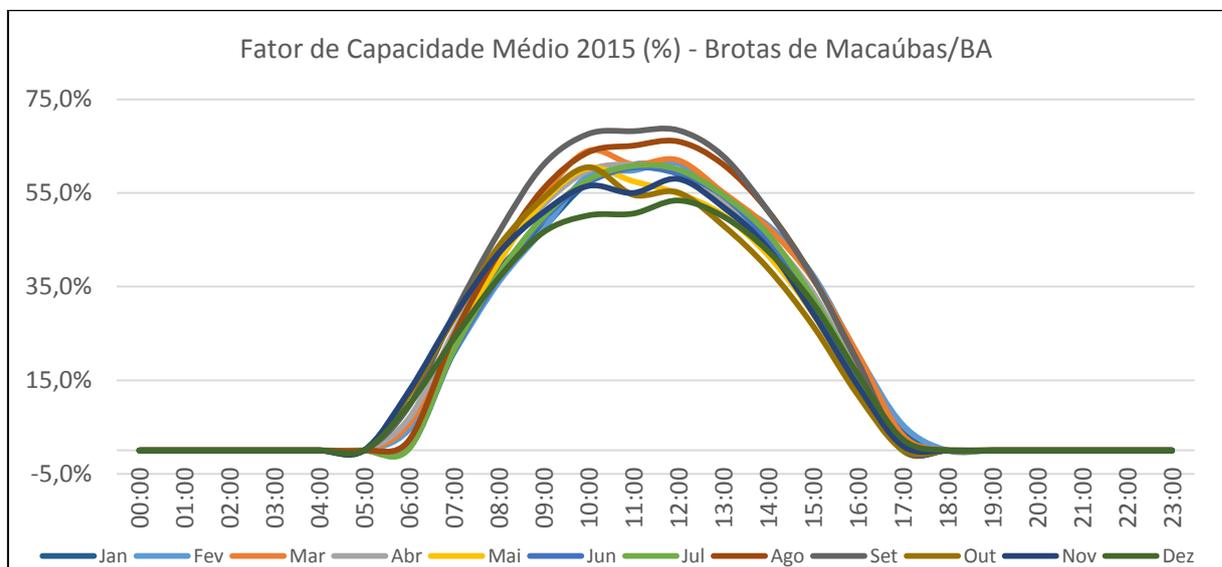
Uma vez selecionado o município de Brotas de Macaúbas/BA, para que a complementariedade eólico-solar fosse avaliada, foi necessário estabelecer, em base horária, o fator de capacidade eólico desta usina, pelo levantamento de dados dos gráficos disponíveis nos

Boletins Mensais da Geração Eólica, publicados pelo ONS para o referido ano. Este trabalho permitiu a confecção da Figura 11 e também da Tabela 4.

Para a fonte solar, uma vez que não foi possível achar dados de geração reais para o município selecionado, realizou-se uma simulação computacional com o software PySyst e com os dados meteorológicos retirados da plataforma Meteonorm, para se obter qual a geração de energia elétrica esperada em uma hipotética central fotovoltaica, localizada nas mesmas coordenadas geográficas da UEE Seabra. Com os resultados dessa simulação, foi possível traçar o perfil do fator de capacidade da hipotética central solar, que está apresentado na Figura 12 e na Tabela 5.

Destaca-se que a variabilidade máxima observada entre duas horas consecutivas para o fator de capacidade, no período de análise utilizado, foi de 23,1 pontos percentuais para a fonte eólica e de 22,3 pontos percentuais para a fonte solar. As Tabelas 6 e 7 demonstram os resultados obtidos para a variação horária de cada fonte, segundo o critério de avaliação já apresentado.

Figura 12 - Fator de Capacidade médio solar em Brotas de Macaúbas/BA, 2015



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do ONS (2015).

Tabela 4 - Fator de capacidade médio UEE Seabra, 2015

Fator de Capacidade médio horário EOL (%) - UEE Seabra (BA)/2015

	Capacidade Instalada (MW)	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
jan	30,06	80,77	83,33	83,33	84,62	82,05	80,77	79,49	78,21	76,92	69,23	46,15	26,92	17,95	14,10	10,26	11,54	12,82	20,51	34,62	55,13	65,38	73,08	75,64	76,92
fev	30,06	62,22	64,37	64,37	64,37	63,22	62,07	64,37	58,62	56,32	51,72	43,68	29,89	22,99	17,24	13,79	14,94	14,94	18,39	26,44	36,78	44,83	50,57	56,32	62,07
mar	30,06	58,14	60,47	60,47	60,47	62,79	59,30	55,81	52,33	43,02	27,91	17,44	10,47	5,81	5,81	8,14	10,47	17,44	24,42	38,37	45,35	48,84	52,33	55,81	56,98
abr	30,06	55,81	59,30	59,30	56,98	60,47	54,65	54,65	52,33	41,86	27,91	15,12	10,47	10,47	6,98	8,14	9,30	15,12	23,26	39,53	48,84	47,67	50,00	52,33	53,49
mai	30,06	73,26	75,58	69,77	66,28	67,44	69,77	69,77	66,28	55,81	44,19	31,40	23,26	19,77	17,44	16,28	19,77	27,91	44,19	54,65	59,30	62,79	65,12	69,77	70,93
jun	30,06	79,07	75,58	77,91	79,07	77,91	77,91	75,58	74,42	70,93	65,12	52,33	44,19	38,37	33,72	33,72	37,21	48,84	62,79	70,93	76,74	77,91	77,91	80,23	79,07
jul	30,06	83,72	84,88	86,05	82,56	80,23	75,58	79,07	77,91	70,93	61,63	52,33	45,35	38,37	37,21	39,53	43,02	55,81	68,60	75,58	80,23	80,23	81,40	82,56	81,40
ago	30,06	86,05	84,88	86,05	83,72	82,56	81,40	79,07	76,74	73,26	61,63	52,33	45,35	41,86	39,53	38,37	39,53	45,35	55,81	62,79	72,09	77,91	84,88	87,21	86,05
set	30,06	88,37	87,21	87,21	86,05	84,88	83,72	83,72	79,07	67,44	56,98	43,02	34,88	29,07	25,58	26,74	31,40	43,02	65,12	81,40	88,37	89,53	90,70	91,86	91,86
out	30,06	86,73	85,71	86,73	85,71	83,67	82,65	83,67	79,59	72,45	60,20	45,92	34,69	27,55	25,51	24,49	28,57	34,69	53,06	69,39	80,61	85,71	89,80	89,80	90,82
nov	30,06	68,37	67,35	70,41	71,43	67,35	65,31	62,24	61,22	51,03	39,80	29,59	22,45	17,35	13,27	15,31	17,35	21,43	29,59	40,82	48,98	55,10	60,20	65,31	67,35
dez	30,06	72,45	74,49	73,47	76,53	74,49	76,53	76,53	72,45	66,33	59,18	42,86	30,61	23,47	21,43	21,43	22,45	22,45	28,57	42,86	57,14	63,27	65,31	69,39	71,43

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 5 - Fator de capacidade médio solar em Brotas de Macaúbas/BA, 2015

Fator de Capacidade médio horário SOL (%) - Brotas de Macaúbas (BA)/2015																									
	Capacidade Instalada (kW)	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
jan	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	22,1	38,5	47,6	57,3	61,1	59,8	52,7	43,5	31,8	18,9	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
fev	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	20,8	35,9	47,2	58,8	59,8	61,3	53,6	48,1	37,5	20,5	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
mar	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	24,7	42,5	54,7	64,0	61,1	62,0	55,1	47,6	36,6	20,6	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
abr	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8	25,3	42,0	52,5	59,8	61,0	59,1	53,5	45,5	33,8	16,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
mai	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	22,8	40,1	53,2	60,3	57,5	54,9	50,3	41,7	29,3	13,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jun	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	20,9	36,9	49,4	57,2	60,4	59,1	54,4	44,8	31,6	14,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jul	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	21,3	37,6	49,9	57,8	60,8	60,0	54,6	46,2	32,7	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ago	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	24,4	42,1	55,9	63,7	65,1	66,0	61,1	51,2	37,0	18,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
set	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	29,0	46,5	61,0	67,6	68,2	68,4	62,9	51,2	36,9	18,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
out	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,9	28,1	43,6	53,9	60,5	54,6	55,1	48,1	38,9	26,7	11,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
nov	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,6	28,6	42,1	50,9	56,5	55,0	58,0	52,0	43,2	29,4	13,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
dez	1.000,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,7	23,8	36,8	46,6	50,2	50,6	53,4	50,0	42,6	31,5	16,3	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6 - Variabilidade horária UEE Seabra, 2015

	Cap. Inst. (MW)	Variabilidade EOL (pp) - UEE Seabra (BA)/2015																							Variab. Máx	
		00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00		23:00
jan	30,06		2,56	0,00	1,28	2,56	1,28	1,28	1,28	1,28	7,69	23,08	19,23	8,97	3,85	3,85	1,28	1,28	7,69	14,10	20,51	10,26	7,69	2,56	1,28	23,1
fev	30,06	14,70	2,15	0,00	0,00	1,15	1,15	2,30	5,75	2,30	4,60	8,05	13,79	6,90	5,75	3,45	1,15	0,00	3,45	8,05	10,34	8,05	5,75	5,75	5,75	13,8
mar	30,06	3,93	2,33	0,00	0,00	2,33	3,49	3,49	3,49	9,30	15,12	10,47	6,98	4,65	0,00	2,33	2,33	6,98	6,98	13,95	6,98	3,49	3,49	3,49	1,16	15,1
abr	30,06	1,16	3,49	0,00	2,33	3,49	5,81	0,00	2,33	10,47	13,95	12,79	4,65	0,00	3,49	1,16	1,16	5,81	8,14	16,28	9,30	1,16	2,33	2,33	1,16	16,3
mai	30,06	19,77	2,33	5,81	3,49	1,16	2,33	0,00	3,49	10,47	11,63	12,79	8,14	3,49	2,33	1,16	3,49	8,14	16,28	10,47	4,65	3,49	2,33	4,65	1,16	16,3
jun	30,06	8,14	3,49	2,33	1,16	1,16	0,00	2,33	1,16	3,49	5,81	12,79	8,14	5,81	4,65	0,00	3,49	11,63	13,95	8,14	5,81	1,16	0,00	2,33	1,16	14,0
jul	30,06	4,65	1,16	1,16	3,49	2,33	4,65	3,49	1,16	6,98	9,30	9,30	6,98	6,98	1,16	2,33	3,49	12,79	12,79	6,98	4,65	0,00	1,16	1,16	1,16	12,8
ago	30,06	4,65	1,16	1,16	2,33	1,16	1,16	2,33	2,33	3,49	11,63	9,30	6,98	3,49	2,33	1,16	1,16	5,81	10,47	6,98	9,30	5,81	6,98	2,33	1,16	11,6
set	30,06	2,33	1,16	0,00	1,16	1,16	1,16	0,00	4,65	11,63	10,47	13,95	8,14	5,81	3,49	1,16	4,65	11,63	22,09	16,28	6,98	1,16	1,16	1,16	0,00	22,1
out	30,06	5,13	1,02	1,02	1,02	2,04	1,02	1,02	4,08	7,14	12,24	14,29	11,22	7,14	2,04	1,02	4,08	6,12	18,37	16,33	11,22	5,10	4,08	0,00	1,02	18,4
nov	30,06	22,45	1,02	3,06	1,02	4,08	2,04	3,06	1,02	10,19	11,23	10,20	7,14	5,10	4,08	2,04	2,04	4,08	8,16	11,22	8,16	6,12	5,10	5,10	2,04	11,2
dez	30,06	5,10	2,04	1,02	3,06	2,04	2,04	0,00	4,08	6,12	7,14	16,33	12,24	7,14	2,04	0,00	1,02	0,00	6,12	14,29	14,29	6,12	2,04	4,08	2,04	16,3

Fonte: Dados da pesquisa.

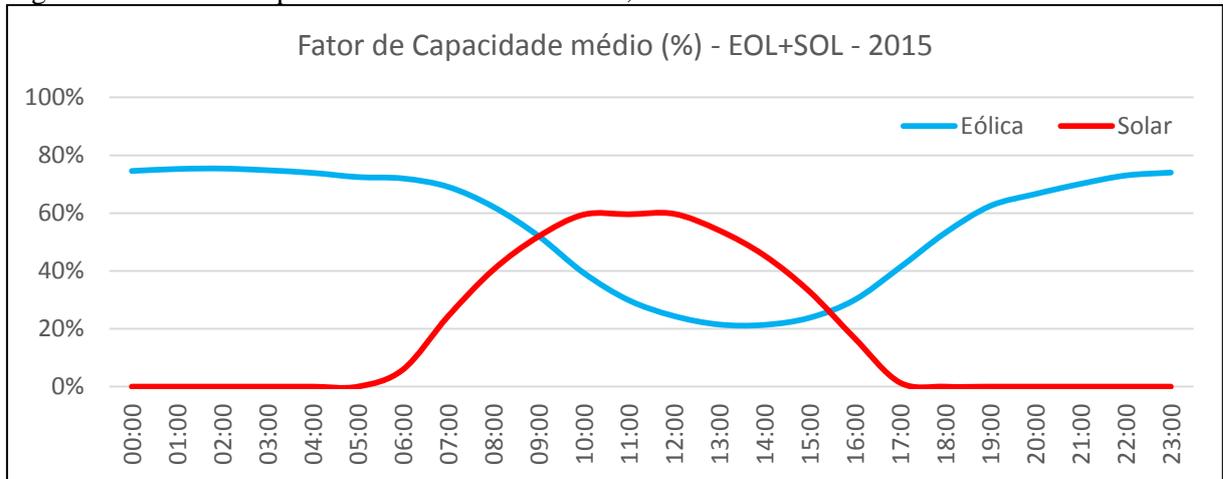
Tabela 7 - Variabilidade horária solar Brotas de Macaúbas, 2015

	Capacidade Instalada (kW)	Variabilidade SOL (pp) - Brotas de Macaúbas (BA)/2015																							Variabilidade Máxima		
		00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00		23:00	
jan	1.000,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,70	16,40	16,40	9,10	9,70	3,80	1,30	7,10	9,20	11,70	12,90	15,10	3,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,4
fev	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,40	16,40	15,10	11,30	11,60	1,00	1,50	7,70	5,50	10,60	17,00	15,00	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,0
mar	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,60	19,10	17,80	12,20	9,30	2,90	0,90	6,90	7,50	11,00	16,00	17,30	3,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,1
abr	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,80	18,50	16,70	10,50	7,30	1,20	1,90	5,60	8,00	11,70	17,30	16,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,5
mai	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	21,30	17,30	13,10	7,10	2,80	2,60	4,60	8,60	12,40	15,70	13,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,3
jun	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	20,50	16,00	12,50	7,80	3,20	1,30	4,70	9,60	13,20	16,70	14,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,5
jul	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	21,00	16,30	12,30	7,90	3,00	0,80	5,40	8,40	13,50	16,50	16,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,0
ago	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10	22,30	17,70	13,80	7,80	1,40	0,90	4,90	9,90	14,20	18,10	18,60	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,3
set	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,40	19,60	17,50	14,50	6,60	0,60	0,20	5,50	11,70	14,30	18,00	18,50	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,6
out	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,90	16,20	15,50	10,30	6,60	5,90	0,50	7,00	9,20	12,20	14,80	11,70	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,2
nov	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,60	16,00	13,50	8,80	5,60	1,50	3,00	6,00	8,80	13,80	15,50	12,90	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,0
dez	1.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,70	14,10	13,00	9,80	3,60	0,40	2,80	3,40	7,40	11,10	15,20	13,90	2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,2

Fonte: Dados da pesquisa.

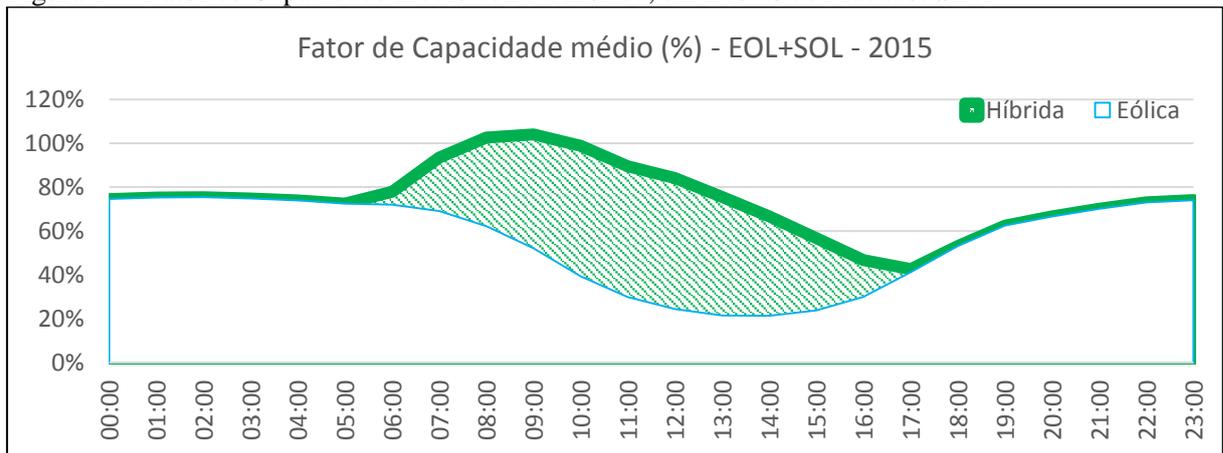
Uma vez caracterizado individualmente o perfil de geração típico eólico e solar, o trabalho executado consistiu em juntar as duas fontes em um mesmo sistema de geração, constituindo um sistema híbrido. Para isso, considerou-se que tanto a fonte eólica quanto a fonte solar dispõem da mesma capacidade instalada para, dessa forma, avaliar o potencial máximo de complementariedade natural existente entre elas. O resultado obtido para o ano de 2015 pode ser visto na Figura 13 para cada fonte, e na Figura 14 para o sistema híbrido proposto.

Figura 13 - Fator de capacidade médio eólica e solar, em Brotas de Macaúbas/BA



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 14 - Fator de Capacidade médio central híbrida, em Brotas de Macaúbas/BA



Fonte: Dados da pesquisa.

O resultado obtido com o sistema híbrido representa um potencial de complementariedade natural, equivalente a um aumento de geração em relação à geração apenas da usina eólica, identificado na figura 14 pela área hachurada, de 34% no ano, com variações entre um máximo de 51% no mês de março e um mínimo de 27% nos meses de junho, julho e outubro.

No que se refere à redução da intermitência, a partir da complementariedade das fontes, o sistema híbrido proposto resulta em uma variabilidade máxima observada entre duas horas consecutivas de 20,5 pontos percentuais, ou seja, menor que a variabilidade observada individualmente tanto para a fonte eólica, quanto para a fonte solar.

4.2 DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR EM BROTAS DE MACAÚBAS/BA

Após quantificar o potencial máximo de complementariedade natural entre as fontes eólica e solar no município de Brotas de Macaúbas/BA, propõe-se, no presente trabalho, o dimensionamento ótimo econômico para um sistema híbrido eólico-solar.

Neste ponto, convém explicitar uma característica importante do trabalho aqui proposto, por sua diferenciação em relação aos demais trabalhos encontrados na literatura acerca do tema. Enquanto a maioria dos autores se baseia diretamente na densidade de energia dos recursos eólico e solar, obtidos a partir de medições da velocidade dos ventos e da irradiação solar em cada localidade, o presente trabalho se baseia em uma avaliação indireta desses recursos, com base no comportamento do fator de capacidade de usinas existentes, no caso da fonte eólica, e simulada, no caso da fonte solar, por entender que dessa forma está considerado, concomitantemente, o efeito conjunto do comportamento do recurso primário e também da tecnologia de conversão em eletricidade para cada fonte.

Outra vantagem da avaliação feita a partir do fator de capacidade é permitir a utilização de dados econômicos públicos a respeito dos custos de instalação de centrais representativas das tecnologias de geração envolvidas neste trabalho, conferindo, assim, uma melhor representatividade em relação à realidade técnico-econômica atual.

Assim, com base no fator de capacidade observado para a geração eólica e solar em Brotas de Macaúbas/BA, foi possível determinar qual seria a capacidade de geração individual necessária para cada fonte primária, em base horária, ao longo das horas do ano, de forma a garantir o atendimento pleno de uma carga unitária de 1 MW, tanto pela geração eólica, quanto pela geração solar. Esses resultados são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Capacidade eólica para atendimento de 1 MW em Brotas de Macaúbas/BA

Capacidade de Geração Eólica - cap_{EOL} (MW)												
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0:00	1,24	1,61	1,72	1,79	1,37	1,26	1,19	1,16	1,13	1,15	1,46	1,38
1:00	1,20	1,55	1,65	1,69	1,32	1,32	1,18	1,18	1,15	1,17	1,48	1,34
2:00	1,20	1,55	1,65	1,69	1,43	1,28	1,16	1,16	1,15	1,15	1,42	1,36
3:00	1,18	1,55	1,65	1,76	1,51	1,26	1,21	1,19	1,16	1,17	1,40	1,31
4:00	1,22	1,58	1,59	1,65	1,48	1,28	1,25	1,21	1,18	1,20	1,48	1,34
5:00	1,24	1,61	1,69	1,83	1,43	1,28	1,32	1,23	1,19	1,21	1,53	1,31
6:00	1,26	1,55	1,79	1,83	1,43	1,32	1,26	1,26	1,19	1,20	1,61	1,31
7:00	1,28	1,71	1,91	1,91	1,51	1,34	1,28	1,30	1,26	1,26	1,63	1,38
8:00	1,30	1,78	2,32	2,39	1,79	1,41	1,41	1,37	1,48	1,38	1,96	1,51
9:00	1,44	1,93	3,58	3,58	2,26	1,54	1,62	1,62	1,76	1,66	2,51	1,69
10:00	2,17	2,29	5,73	6,62	3,19	1,91	1,91	1,91	2,32	2,18	3,38	2,33
11:00	3,71	3,35	9,56	9,56	4,30	2,26	2,21	2,21	2,87	2,88	4,45	3,27
12:00	5,57	4,35	17,20	9,56	5,06	2,61	2,61	2,39	3,44	3,63	5,76	4,26
13:00	7,09	5,80	17,20	14,33	5,73	2,97	2,69	2,53	3,91	3,92	7,54	4,67
14:00	9,75	7,25	12,29	12,29	6,14	2,97	2,53	2,61	3,74	4,08	6,53	4,67
15:00	8,67	6,69	9,56	10,75	5,06	2,69	2,32	2,53	3,19	3,50	5,76	4,45
16:00	7,80	6,69	5,73	6,62	3,58	2,05	1,79	2,21	2,32	2,88	4,67	4,45
17:00	4,88	5,44	4,10	4,30	2,26	1,59	1,46	1,79	1,54	1,88	3,38	3,50
18:00	2,89	3,78	2,61	2,53	1,83	1,41	1,32	1,59	1,23	1,44	2,45	2,33
19:00	1,81	2,72	2,21	2,05	1,69	1,30	1,25	1,39	1,13	1,24	2,04	1,75
20:00	1,53	2,23	2,05	2,10	1,59	1,28	1,25	1,28	1,12	1,17	1,81	1,58
21:00	1,37	1,98	1,91	2,00	1,54	1,28	1,23	1,18	1,10	1,11	1,66	1,53
22:00	1,32	1,78	1,79	1,91	1,43	1,25	1,21	1,15	1,09	1,11	1,53	1,44
23:00	1,30	1,61	1,76	1,87	1,41	1,26	1,23	1,16	1,09	1,10	1,48	1,40

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 9 - Capacidade solar para atendimento de 1 MW em Brotas de Macaúbas/BA

Capacidade de Geração Solar - cap_{SOL} (MW)												
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7:00	4,52	4,81	4,05	3,95	4,39	4,78	4,69	4,10	3,45	3,56	3,50	4,20
8:00	2,60	2,79	2,35	2,38	2,49	2,71	2,66	2,38	2,15	2,29	2,38	2,72
9:00	2,10	2,12	1,83	1,90	1,88	2,02	2,00	1,79	1,64	1,86	1,96	2,15
10:00	1,75	1,70	1,56	1,67	1,66	1,75	1,73	1,57	1,48	1,65	1,77	1,99
11:00	1,64	1,67	1,64	1,64	1,74	1,66	1,64	1,54	1,47	1,83	1,82	1,98
12:00	1,67	1,63	1,61	1,69	1,82	1,69	1,67	1,52	1,46	1,81	1,72	1,87
13:00	1,90	1,87	1,81	1,87	1,99	1,84	1,83	1,64	1,59	2,08	1,92	2,00
14:00	2,30	2,08	2,10	2,20	2,40	2,23	2,16	1,95	1,95	2,57	2,31	2,35
15:00	3,14	2,67	2,73	2,96	3,41	3,16	3,06	2,70	2,71	3,75	3,40	3,17
16:00	5,29	4,88	4,85	6,06	7,35	6,71	6,17	5,29	5,29	8,40	7,19	6,13
17:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

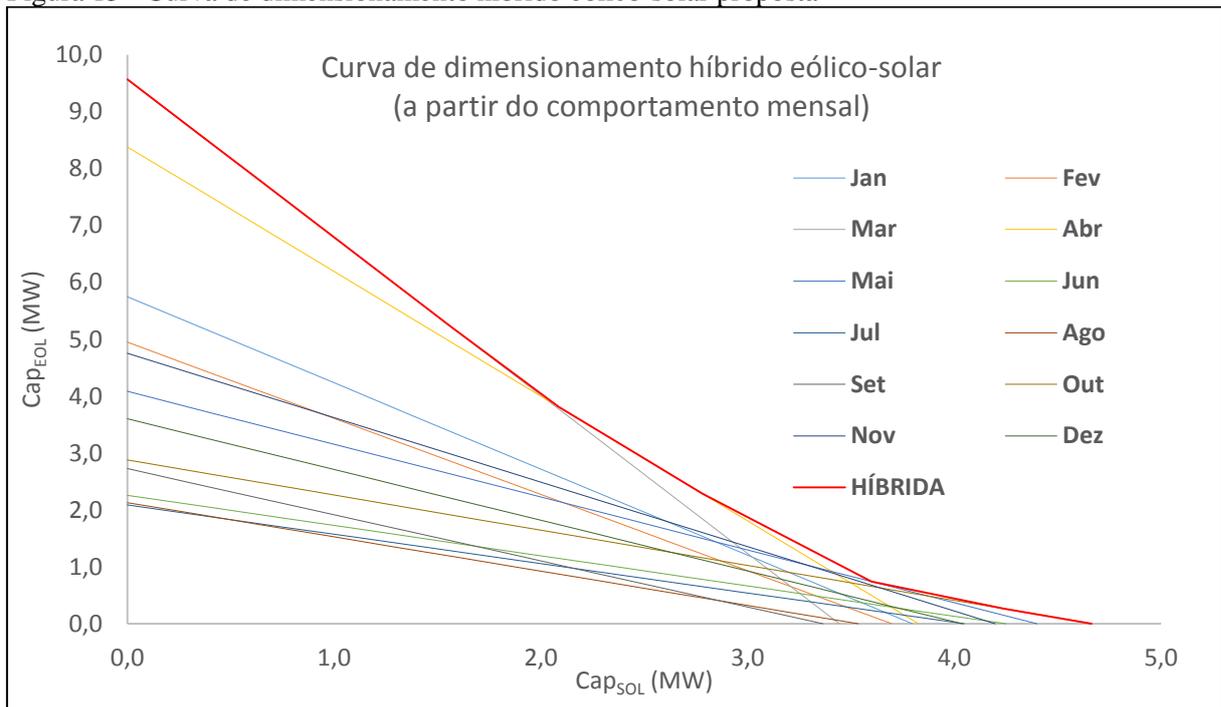
Fonte: Dados da pesquisa.

Convém informar que, para a definição da capacidade de geração solar necessária ao atendimento da carga, foram expurgados os dados referentes ao período de 6h e 17h, apresentados na Tabela 9, uma vez que resultavam em capacidades necessárias extremamente elevadas, induzindo o dimensionamento a erros.

O dimensionamento proposto por Protogeropoulos, Brinkworth e Marshall (1997), posteriormente modificado por Celik (2003), buscou minimizar a ineficiência econômica, pela redução do sobredimensionamento das capacidades individuais de geração eólica e solar, por meio de uma maior utilização da complementariedade entre as fontes e também por meio de métodos estatísticos para a definição da capacidade instalada. Esses métodos representaram uma evolução, quando comparados ao dimensionamento baseado na média anual da disponibilidade do conjunto de recursos, cuja deficiência foi abordada no capítulo 3..

Adaptando os métodos de dimensionamento propostos por Protogeropoulos, Brinkworth e Marshall (1997) e por Celik (2003) e aplicando a metodologia de dimensionamento gráfico-analítica, apresentada por Markvart (1996), com base na capacidade de geração eólica e solar mensal, foi possível definir o conjunto de meses do ano que compõem a curva de dimensionamento híbrido, apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Curva de dimensionamento híbrido eólico-solar proposta



Fonte: Dados da pesquisa.

Ressalta-se que a técnica gráfica aplicada estabelece que qualquer dos pontos situados no quadrante superior à curva de dimensionamento proposta garante que o par de capacidades instaladas eólica e solar definido é capaz de atender à curva de carga estabelecida, neste caso 1 MW constante. Contudo, para a definição do ponto no qual o sistema híbrido proposto é ótimo econômico, é necessária a aplicação de critério algébrico, baseado no custo de instalação de cada uma das tecnologias de geração envolvidas no sistema híbrido.

Assim, para a definição do ponto ótimo econômico proposto neste trabalho, foi realizada uma avaliação dos leilões de energia nova, a fim de conhecer qual o investimento necessário para a instalação, tanto para a fonte eólica, quanto para a solar, obtendo-se o resultado apresentado na Tabela 10.

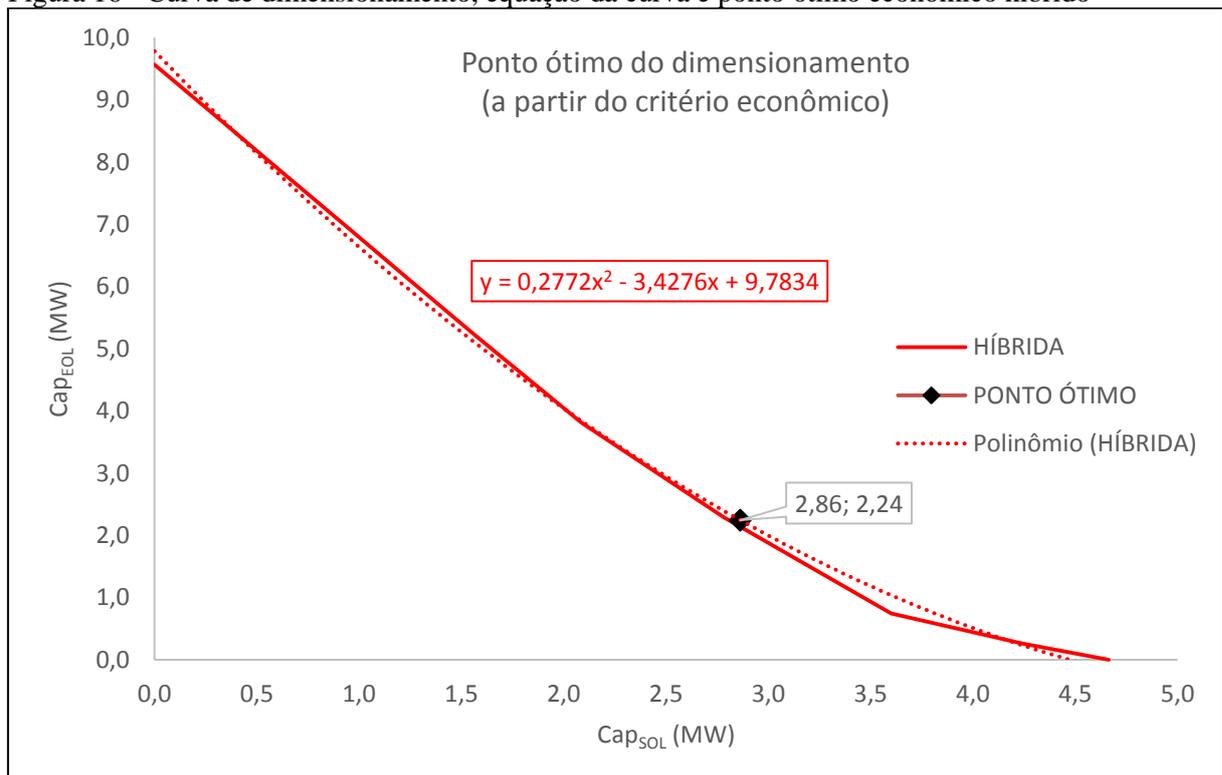
Tabela 10 - Investimento para instalação de usinas eólica e solar

Fonte	Investimento (R\$/kW)
Eólica	3.884,53
Solar	4.956,07

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CCEE.

Uma vez conhecido o investimento necessário para a instalação de cada fonte, foi possível definir o ponto ótimo econômico para o sistema híbrido proposto, aplicando-se o critério utilizado por Markart (1996, p. 280), equivalente à razão do custo eólico sobre o solar aplicado à equação da curva de dimensionamento elaborada, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Curva de dimensionamento, equação da curva e ponto ótimo econômico híbrido



Fonte: Dados da pesquisa.

O resultado obtido pelo método proposto apresentou a combinação de capacidades instaladas para cada fonte de 2,86 MW solar e 2,24 MW eólico.

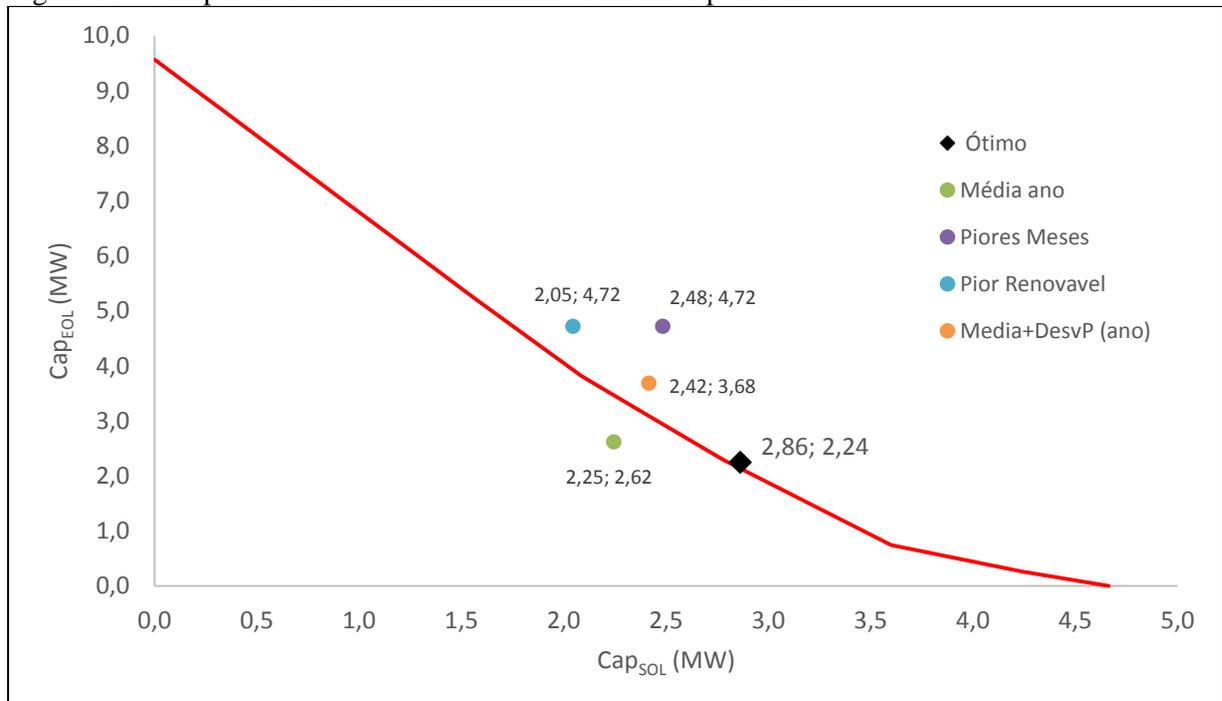
Ressalta-se que, para o par de capacidades instaladas, definido pelo dimensionamento ótimo, o efeito da complementariedade verificada para o município de Brotas de Macaúbas/BA

resulta em geração adicional efetiva de 43%, em relação à geração exclusivamente eólica. Tal resultado, conforme esperado, é maior que o potencial máximo de 34%, calculado anteriormente neste trabalho, em razão da maior capacidade solar em relação à capacidade eólica proposta pelo dimensionamento aplicado.

4.2.1 Comparativo econômico entre diferentes cenários de dimensionamento

Uma vez definida qual a combinação ótima econômica para as capacidades instaladas eólica e solar, faz-se necessário verificar sua efetividade sob a ótica econômica.

Figura 17 - Comparativo entre dimensionamentos híbridos possíveis



Fonte: Dados da pesquisa.

Como é possível observar pela alocação na Figura 17 dos pontos definidos, a partir de diferentes cenários de dimensionamento, constata-se que o par de capacidades decorrente do cenário baseado na média anual não atende ao critério de garantia do atendimento da carga, pois se situa no quadrante inferior à curva de dimensionamento.

Quanto aos demais pares propostos, apesar de estarem à direita da curva de dimensionamento e, portanto, de cumprirem o critério de atendimento da carga, todos apresentam algum grau de sobredimensionamento da capacidade instalada, sendo

consequentemente menos eficientes do ponto de vista econômico, em relação ao par proposto pelo método utilizado neste trabalho.

Com base nos preços de venda ofertados pelos empreendimentos eólico e solar vencedores dos leilões de geração realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), nos anos de 2015 e 2016, apresentados na Tabela 11, calculou-se qual seria o valor da energia para cada um dos cenários de dimensionamento híbrido. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 11 - Preços de venda ofertado por fonte, dos vencedores nos leilões de geração

Fonte	Preço Leilão (R\$/MWh)
Eólica	209,63
Solar	327,28

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CCEE.

Tabela 12 - Custo de geração para central híbrida em diferentes cenários de dimensionamento

Custo (R\$/MWh)	Ótimo	Média ano	Piores Meses	Pior Renovável	Média+DesvP (ano)
Eólico+Solar	197,31	210,10	218,08	219,35	215,39

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CCEE.

Ressalta-se que o cálculo realizado, para a definição do custo de geração de cada um dos cenários de dimensionamento apresentados, considerou o preço de venda de cada fonte, as capacidades instaladas propostas por fonte para cada cenário e o adicional de geração proporcionado para cada par de capacidades instaladas proposto, uma vez que, em função da combinação eólica-solar proposta, têm-se diferentes adicionais de geração.

O resultado anteriormente apresentado indica que a complementariedade observada para as fontes eólica e solar, ao proporcionar o aumento da geração efetiva para o sistema híbrido proposto, em relação àquela possível para apenas a fonte eólica, permite que esse sistema seja mais eficiente do ponto de vista econômico, com menor custo de geração.

Entretanto deve-se observar que a análise simplificada aqui apresentada possui uma maior relevância quanto ao sentido econômico do sistema proposto do que em relação ao próprio valor em si, uma vez que, para o cálculo do custo de geração final, o efeito de outras

variáveis como o custo de operação e manutenção, de emissões e de descomissionamento, devem ser também considerados, conforme apontado por Leal, Rego e Ribeiro (2017, p. 194).

4.3 O USO DA BIOMASSA PARA ENERGIA COMO TERCEIRA FONTE RENOVÁVEL

Em seu estudo, Ortiz (2014, p. 10) identificou que a metodologia proposta por Markvart (1996), utilizada neste trabalho para o dimensionamento ótimo econômico, apresenta resultado subótimo por desconsiderar o custo relacionado aos bancos de baterias propostos para instalação por Markvart, com a finalidade de garantia do atendimento das cargas do sistema isolado, objeto daquele estudo.

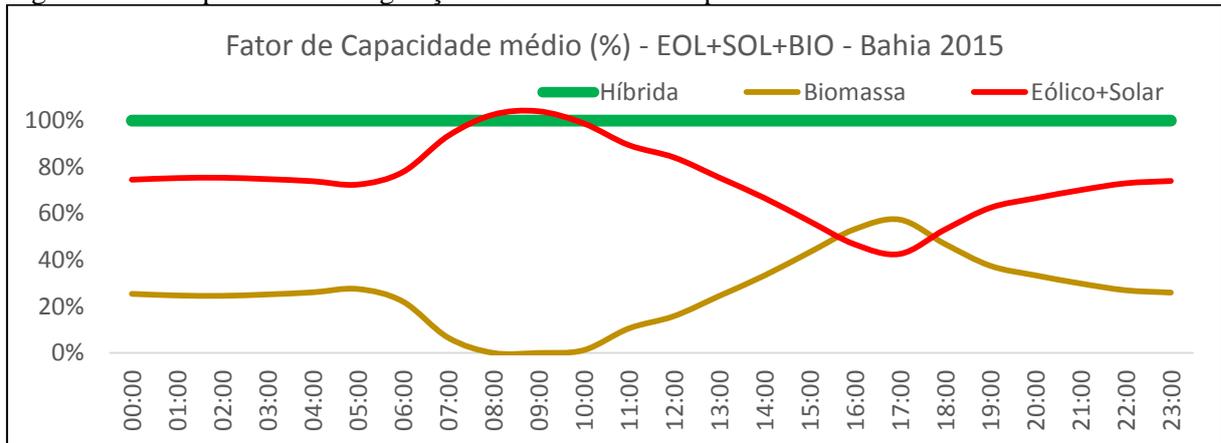
Com o intuito de atender aos objetivos gerais e específicos propostos neste trabalho e também de solucionar a desvantagem identificada anteriormente, este trabalho avalia a inclusão da biomassa para energia em substituição ao banco de baterias, devido a razões tecnológicas e ambientais.

Neste sentido, o sistema híbrido eólico-solar proposto, apesar de possuir uma variabilidade de geração menor do que a variabilidade individual, tanto da fonte eólica, quanto da fonte solar, e, em função do método de dimensionamento utilizado, garantir o atendimento da carga unitária, ainda apresenta uma curva de geração horária variável ao longo do ano, quando vista a partir do sistema elétrico. Caso esse sistema híbrido estivesse conectado ao SIN, seria necessária a utilização de reserva de geração disponível, através de outras centrais já existentes, para compensar tal variação de geração.

A biomassa para energia, cuja caracterização foi abordada no capítulo 3, demanda a existência de ativo agrícola, seja plantação ou floresta, criada e manejada adequadamente com a intenção específica de produzir, de forma constante, a biomassa suficiente para a queima como combustível em central geradora térmica, portanto, despachável por meio de processos produtivos já conhecidos e com tecnologia dominada.

Ao verificar-se o comportamento de geração do sistema híbrido proposto, apresentado anteriormente na Figura 14, pode-se concluir que a capacidade adicional a ser incluída deveria ser capaz de gerar um máximo de 60% da carga proposta no dimensionamento original do sistema. Tal comportamento pode ser mais bem visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Comportamento de geração de base necessário para biomassa



Fonte: Dados da pesquisa.

Baseado na capacidade instalada necessária a partir da biomassa e nos indicadores de custo dessa fonte, obtidos a partir dos resultados dos mesmos leilões de geração, utilizados anteriormente para a definição dos indicadores eólico e solar, foi possível calcular, com base no mesmo critério de cálculo utilizado anteriormente para o sistema híbrido eólico-solar, qual seria o custo final de geração, incluindo-se a biomassa. Os resultados podem ser vistos nas Tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 13 - Investimento para instalação de centrais a biomassa

Fonte	Investimento (R\$/kW)
Biomassa	5.237,91

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CCEE.

Tabela 14 – Preço de venda nos leilões de geração pela fonte biomassa

Fonte	Preço Leilão (R\$/MWh)
Biomassa	255,55

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CCEE.

Tabela 15 - Custo de geração central híbrida incluindo biomassa

Custo (R\$/MWh)	Ótimo	Média ano	Piores Meses	Pior Renovável	Média+DesvP (ano)
Eol+Sol+Bio	188,86	200,30	211,22	212,28	207,27

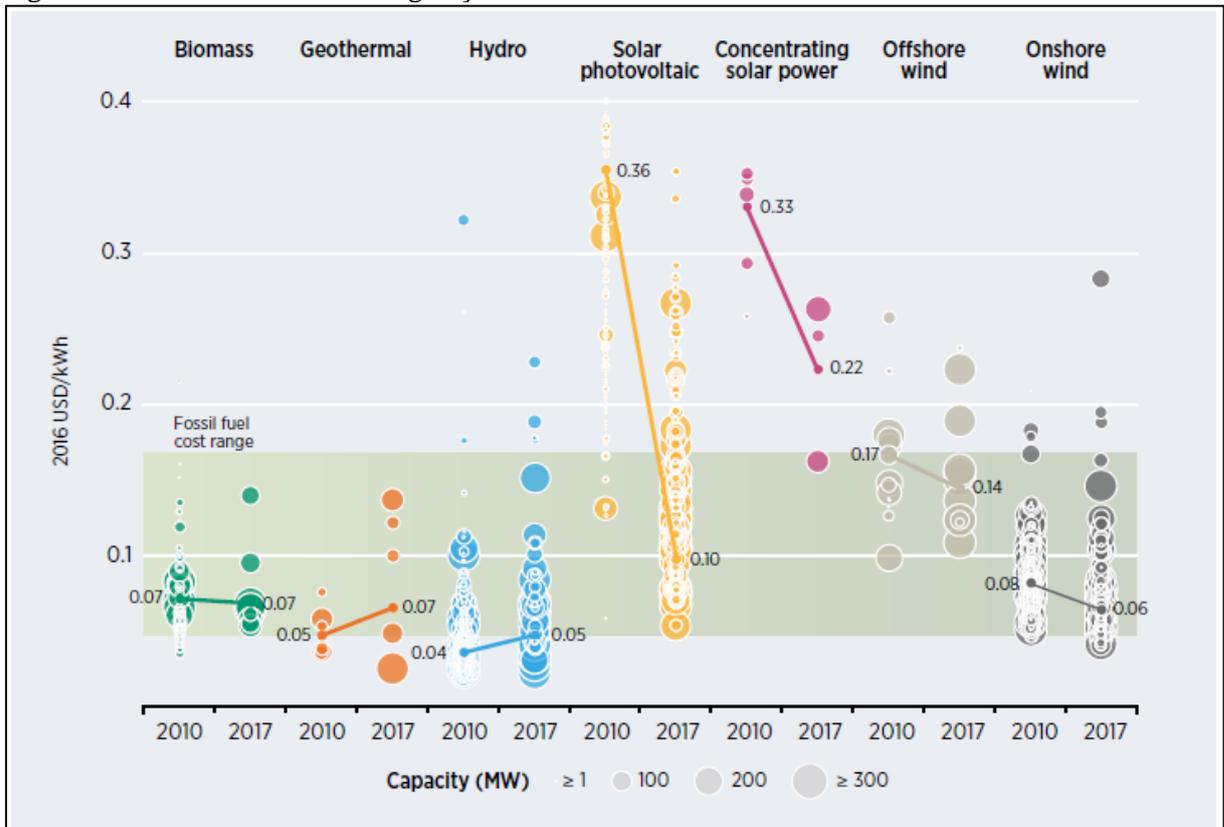
Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CCEE.

Chega-se, assim, com este trabalho, à constatação econômica de que o sistema híbrido proposto, além de garantir a estabilidade de geração necessária para evitar o efeito da variabilidade causada ao sistema elétrico, conectado pela participação das fontes primárias eólica e solar, possui sentido econômico que permite sua aplicação na realidade brasileira.

Embora o cálculo simplificado do custo de geração aqui apresentado seja apenas uma indicação, pois apenas sugere qual poderia ser o preço ofertado, caso fosse considerado pelo proponente do leilão os efeitos do investimento conjunto das tecnologias participantes do sistema híbrido proposto e da geração adicional, não se busca estabelecer, neste trabalho, definição de custo, mas tão somente indicação de referência para fins de comparativo sobre sua competitividade.

Neste sentido, é conveniente comparar os custos de geração indicativos apresentados para o sistema híbrido eólico-solar, com e sem a participação da biomassa como fonte adicional, os quais, baseados no câmbio médio de 3,20 R\$/US\$, verificado para o ano de 2017, apresentam valores de geração de 0,06 US\$/kWh e, neste sentido, se mostram alinhados com as referências internacionais, como pode ser visto na Figura 19, e que demonstram a competitividade já consolidada das fontes eólica *onshore* e biomassa, cujos custos estão praticamente estáveis entre 2010 e 2017, mas também sugere-se que a fonte solar, devido à rápida redução de custo observada no mesmo período, possibilitará que o sistema híbrido proposto seja ainda mais competitivo dentro de curto espaço de tempo.

Figura 19 - Indicativo de custo de geração das fontes renováveis



Fonte: International Renewable Energy Agency – IRENA (2018).

4.4 ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS RELEVANTES

A solução proposta neste trabalho, ao acrescentar a fonte biomassa como terceira participante do sistema híbrido, além de proporcionar a geração de empregos na fabricação e na operação e manutenção dos geradores eólicos e solares, possibilita também a criação de outros relacionados ao manejo florestal, necessário para a adequada garantia da quantidade de biomassa a ser utilizada, auxiliando assim na reversão da migração de populações para as áreas urbanas e na melhoria da qualidade de vida das localidades beneficiadas.

Neste contexto, espera-se que a mão de obra necessária seja obtida a partir da utilização de pessoal local, fixando a população na região de entorno da floresta criada, aumentando a renda per capita dessa área e, conseqüentemente, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) municipal, conforme apontado por Couto e Müller (2008, p. 102).

Ainda no âmbito social, a inserção de nova atividade econômica nos municípios beneficiados pela presença do sistema híbrido proposto, a partir da atividade agrícola decorrente da criação da floresta de biomassa, será indutor de desenvolvimento social, por proporcionar a

circulação de maiores recursos provenientes da própria atividade ou, ainda, decorrente do arrendamento das terras necessárias.

Na dimensão ambiental, o sistema proposto representa avanço quanto à consecução do objetivo de redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, haja vista que a criação de floresta cultivada para o fornecimento da biomassa proporciona o abatimento de CO₂, ao longo do seu ciclo de vida, inclusive possibilitando eliminar a emissão causada pelo processo de queima da biomassa como combustível, uma vez que o balanço de emissões é favorável, uma vez que a redução causada pela floresta criada é superior ao aumento relativo ao sistema de geração.

Aspectos ambientais apontados como desvantagens da existência de florestas de biomassa para energia, principalmente as de eucalipto, a exemplo da perda de biodiversidade, do uso intensivo de defensivos agrícolas, da degradação e da redução da infiltração de água no solo e do assoreamento dos mananciais hídricos, já foram superados com o uso de práticas silviculturais mais adequadas, com movimentações de solo menos intensivas, e eliminação da necessidade de queima da matéria orgânica, segundo Couto e Dubé (2001, p. 820).

Entretanto, apesar dos aspectos ambientais favoráveis conhecidos das fontes eólica, solar e biomassa, constituintes do sistema híbrido proposto neste trabalho, destaca-se que é necessária atenção “quanto à forma como os empreendimentos estão sendo implantados, [] maior rigidez quanto ao licenciamento e realização do EIA/RIMA, [] planejamento do local, respeito às áreas de proteção, gestão ambiental para o desenvolvimento sustentável pelas empresas empreendedoras, participação de decisões por parte da comunidade, com a criação de uma governança comunitária, dentre outras formas de gestão.”, como apontado por Moreira e outros (2013, p. 68).

A história mais recente, relativa aos empreendimentos implantados com a percepção de ambientalmente sustentáveis, por utilizarem-se de fontes renováveis, indica, como visto acima, que os aspectos sociais, muito influenciados pela forma como se conduz a relação com as comunidades de entorno, implicam diretamente a existência de conflitos e insatisfações locais sendo, dessa forma, ponto de atenção para viabilizar uma expansão do parque gerador, dentro de parâmetros socioambientais adequados.

A proposição de um sistema híbrido de geração, como o estudado neste trabalho, ao apropriar-se da sinergia natural existente entre os aspectos ambientais das suas fontes constituintes, representa avanço tecnológico relevante, devendo ser objeto de incentivo sem,

contudo, deixar que aspectos sociais afetem, em função de eventual má gestão, a possibilidade de sua implantação.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou descrever uma solução possível para se permitir a maior participação das fontes de energias renováveis intermitentes na matriz elétrica brasileira e, neste sentido, procurou inicialmente compreender a intermitência das fontes eólica e solar, pois esta é apontada historicamente como o fator operacional limitante para uma maior participação dessas fontes na composição das matrizes energéticas.

Em busca das referências internacionais para participação de fontes renováveis na composição de matrizes energéticas, foram constatados exemplos de países como a Dinamarca, onde a participação das fontes renováveis é elevada, e também se constatou que tal participação elevada é possível, em função da possibilidade de intercâmbio de energia em momentos da baixa geração renovável.

Outro fator relevante observado foi a necessidade de mudança de procedimentos e práticas operacionais nos sistemas elétricos, com elevada participação de fontes renováveis. É de fácil compreensão que operar um sistema, onde, além da carga, também a geração possui grau de variabilidade maior, implica a necessidade de novas configurações e de procedimentos e práticas operacionais mais atuantes e, por conseguinte, mais complexos e trabalhosos. É fato que a mudança de cultura é um processo de difícil execução, contudo, muitas vezes, a necessidade se apresenta como fator motivador para a mudança.

Neste sentido, o exemplo prático observado nos últimos anos, no Brasil, em específico na região nordeste, decorrente das dificuldades hídricas observadas na região, ao mesmo tempo em que confirmou a existência abundante dos recursos eólico e solar, influenciou positivamente para uma intensificação da participação dessas fontes, fazendo com que seja possível, na prática, que a geração de eletricidade possa ser realizada pela fonte eólica, em grande proporção do atendimento das cargas.

A constatação desse fato no nordeste brasileiro já demonstrou que as referências internacionais consultadas para fins desta dissertação estavam corretas, ao concluir que a participação das fontes renováveis em patamares superiores a 30% é possível, desde que haja a possibilidade de intercâmbio e que se façam adequados ajustes à configuração do sistema e seus procedimentos operacionais, independente de outras medidas para a minimização da intermitência natural destas fontes.

Ao longo da pesquisa, observou-se também a possibilidade de redução da intermitência das fontes renováveis, através da diversificação geográfica, para uma mesma fonte, e da complementariedade entre fontes. Neste momento, de posse de dados sobre o regime dos ventos no estado da Bahia e da constatação da complementariedade natural com o regime solar, dimensionou-se a capacidade instalada ótima para uma usina híbrida eólico-solar, a partir de dados existentes e públicos para usinas eólicas, já em operação, e de simulação computacional para uma a geração solar, na mesma localidade, concluindo-se que o aumento de geração possível é representativo, nesta situação específica, possibilitando em até 43% o aumento da geração, na usina da localidade escolhida para avaliação.

A obtenção de dados que permitissem uma maior avaliação de localidades, onde a complementariedade fosse atrativa, constituiu-se numa das grandes dificuldades observadas para elaboração deste trabalho. Sugere-se que uma maior disponibilidade de dados das usinas existentes deveria ser facilitada, por meio do Operador Nacional do Sistema Elétrico ou do próprio Ministério de Minas e Energia, diretamente, ou pela Empresa de Pesquisa Energética, organização responsável pelo planejamento do setor elétrico.

Como forma de demonstrar que, apesar da intermitência, as fontes renováveis devem participar mais efetivamente da capacidade instalada de geração, foi realizado o dimensionamento ótimo para um sistema híbrido eólico-solar, a partir dos dados coletados e simulados; utilizando-se método de otimização gráfico-analítico, foi possível a definição da capacidade de geração eólica e solar que assegure o atendimento pleno da carga e, ao mesmo tempo, apresente o menor investimento necessário, baseado nos resultados dos leilões de energia realizados, no Brasil, para as tecnologias de geração utilizadas para o sistema híbrido proposto. Assim, concluiu-se que uma combinação de 2,86 MW de capacidade instalada solar para 2,24 MW eólica representa o módulo básico de geração híbrido ótimo econômico, para a localidade de Brotas de Macaúbas/BA, com garantia de atendimento a uma curva de carga unitária. Tal resultado poderá ser diferente à medida que as tecnologias aplicadas às fontes renováveis amadureçam e, conseqüentemente, se tornem mais acessíveis economicamente.

O método de dimensionamento aplicado neste trabalho, assim como a inserção da biomassa para energia como terceira fonte do sistema híbrido proposto, representa uma alternativa para a seleção de um sistema híbrido adequado ao local de instalação, com possibilidade de obtenção de perfil de geração de energia elétrica estabilizado, semelhante ao de centrais de geração hídricas e térmicas, conhecidas como geração de base, oferecendo oportunidade para a expansão da capacidade instalada das fontes renováveis.

Dessa forma, através deste trabalho, foram apresentados argumentos técnicos fundamentados em estudos anteriores, os quais podem contribuir para uma maior participação das fontes renováveis na composição da matriz elétrica brasileira, ao desmistificar a questão da intermitência natural da fonte, como fator impeditivo de sua maior participação, e ao mesmo tempo foi demonstrado, pelo dimensionamento realizado, que é possível atender à carga com uma combinação das fontes eólica e solar, dentro de condições econômicas adequadas.

Como contribuição, indica-se para trabalhos a serem desenvolvidos:

- a) desenvolvimento de algoritmo de avaliação mais abrangente da região nordeste do Brasil, para a identificação de localidades onde o grau de complementariedade entre as fontes eólica e solar seja adequado para a instalação de sistemas híbridos;
- b) definição de métodos de dimensionamento para sistemas híbridos, a partir de dados mais abrangentes sobre o regime de ventos e sol nas localidades mais favoráveis à instalação desses sistemas; e
- c) diagnóstico de características e regulamentos específicos, para o enquadramento de sistemas híbridos no Brasil, uma vez que a legislação específica do setor foi elaborada com base na existência apenas de fontes individuais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 391. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, p. 113, v. 146, n. 242, 18 dez. 2009.

_____. Resolução Normativa nº 676. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção 1, p. 37, v. 152, n. 167, 01 set. 2015.

BAHIA. Secretaria de Infraestrutura. **Atlas eólico Bahia**. Salvador, 2013.

BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. 64th ed. Jun. 2015.

_____. 65th ed. Jun. 2016.

BOLETIM MENSAL DE GERAÇÃO EÓLICA. Rio de Janeiro, Operador Nacional do Sistema Elétrico, jan. 2015; fev. 2015; mar. 2015; abr. 2015; maio 2015; jun. 2015; jul. 2015; ago. 2015; set. 2015; out. 2015; nov. 2015; dez. 2015.

_____. **O sistema interligado nacional**. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 20 fev.2018

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **CNPE**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/conselhos-e-comites/cnpe>>. Acesso em: 21 fev. 2018.

BUSAIDI, A. S. Al; KAZEM, H. A.; AL-BADI, A. H. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 53, p. 185-193, 2016. dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.039

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resultado consolidado dos leilões**. mar. 2017. Disponível em: https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_386679>. Acesso em: 23 mar.2017.

CASTRO, N. J. de; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. **Problemas no cálculo das garantias físicas para os leilões de energia nova**. Rio de Janeiro: Instituto de Economia/UFRJ, 2010. (Texto para discussão do setor elétrico, nº 20).

CELIK, Ali N. Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods. **Energy Conversion and Management**, n. 44, p. 1951-1968, 2003. doi:10.1016/S0196-8904(02)00223-6

COUTO. Laércio; MÜLLER. Marcelo D. Florestas energéticas no Brasil In: CORTEZ. Luis A. B.; LORA, Electo E. S.; GÓMEZ. Edgardo O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 93-112.

COUTO. Laércio; DUBÉ. F. The status and practice of forestry in Brazil at the beginning of the 21st century: a review. **The forestry chronicle**, v. 77, n. 5, p. 817-830, sep. 2001.

DeCAROLIS, Joseph F.; KEITH, David W. The costs of wind's variability: Is there a threshold? **The Electricity Journal**, v. 18, n. 1, p. 60-77, jan.-feb. 2005. doi:/10.1016/j.tej.2004.12.006

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise da inserção da energia solar na matriz elétrica brasileira**. Rio de Janeiro, 2012. (Nota Técnica EPE).

_____. **Balanco energético nacional 2016**: relatório síntese ano base 2015. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2016>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

_____. **Expansão da geração**: empreendimentos eólicos. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. **Expansão da geração**: empreendimentos fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. **Avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas**. Rio de Janeiro, 2017c. (Nota Técnica EPE).

_____. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Usinas híbridas**: uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. Rio de Janeiro, 2018. (Nota Técnica EPE).

HART, Elaine K. et al. The potential of intermittent renewables to meet electric power demand: current methods and emerging analytical techniques. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, p. 322-244, 2012.

HOICKA, Christina E.; ROWLANDS, Ian H. Solar and wind resource complementarity: advancing options for renewable electricity integration in Ontario, Canada. **Renewable Energy**, v. 36, p. 97-107, 2011.

HONGXING, Y.; WEI, Z.; CHENGZHI, L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system. **Applied Energy**, v. 86, p. 163-169, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2013**. Paris, 2013. Disponível em: <http://www.iea.org/w/bookshop/455-World_Energy_Outlook_2013>. Acesso em: 2 dez. 2012.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable power generation costs in 2017**. Abu Dhabi, 2018.

JERÉZ, S. et al. Spatio-temporal complementarity between solar and wind power in the Iberian Peninsula. **Energy Procedia**, n. 40, p. 48-57, 2013. DOI 10.1016/j.egypro.2013.08.007

KHARE, V.; NEMA, S.; BARENDAR, P. Solar-wind hybrid renewable energy system: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Abu Dhabi, n. 58, p. 23-33, 2016.

KRISHNA, K. Shivarama; KUMAR, K. Sathish. A review on hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 52, p. 907-916, 2015.

LAZZARESCHI, Vitor H. **Avaliação de portfólios de geração de energia elétrica para o setor elétrico brasileiro**: uma abordagem regulatória. 2014. 196 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Energia)- Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2014.

LEAL, Fernando I.; REGO, Erik E.; RIBEIRO, Celma O. Levelized cost analysis of thermoelectric generation in Brazil: A comparative economic and policy study with environmental implications. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, n. 44, p. 191-201, 2017.

LEILÕES no setor elétrico brasileiro: análises e recomendações. **White Paper**, Instituto Acende Brasil, n. 7, 2012. /dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2017.04.017

LEONI, Pedro et al. Projeto híbrido eólico-solar. **O Setor Elétrico**, n. 134, mar. 2017. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/projeto-hibrido-eolico-solar/>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

LI, Yi; AGELIDIS, Vassilios G; SHRIVASTAVA, Yash. Wind-solar resource complementarity and its combined correlation with electricity load demand. In: CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 4., Xian. **Anais....** Sydney: ICIEA, 2009. p. 3623–3628. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5138882/>>. DOI 10.1109/ICIEA.2009.5138882.

LUEKEN, C.; COHEN, Gilbert E.; APT, J. Costs of solar and wind power variability for reducing CO₂ emissions. **Environmental Science & Technology**, n. 46, p. 9761-9767, 2012.

LUNA-RUBIO, R. et al. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. **Solar Energy**, n. 86, p. 1077-1088, 2012. dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.016

LUND, H et al. Renewable energy systems – a smart energy systems approach to the choice and modelling of 100 renewable solutions. **Chemical Engineering Transactions**, AIDIC, n. 39, p. 1-6, 2014. DOI:10.3303/CET1439001

MAHESH, A.; SANDHU, K. S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 52, p. 1135-1147, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.008>

MARKVART, T. Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems. **Solar Energy**, v. 57, n. 4, p. 277-281, 1996.

MOTALEB, A. M. A. ; BEKDACHE, S. K.; BARRIOS, L.A. Optimal sizing for a hybrid power system with wind/energy storage based in stochastic environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 59, p. 1149-1158, 2016.

MOREIRA, Rosenilda N. et al. Energia eólica no quintal de nossa casa?! Percepção ambiental dos impactos socioambientais na instalação e operação de uma usina na comunidade de Sítio do Cumbe em Aracati-CE. **Revista de gestão ambiental e sustentabilidade - GeAS**, v. 2, n. 1, p. 45-73, 2013.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Eastern wind integration and transmission study**. [S.l.], 2010a.

_____. **Western wind and solar integration study**. [S.l.], 2010b.

ORTIZ, Elvis R. T., **Sistemas fotovoltaicos e eólicos: metodologia para a análise da complementariedade espacial-temporal com aplicação no dimensionamento e análise de risco**

financeiro. 2014. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2014.

PÉREZ NAVARRO, A. P. et al. Experimental verification of hybrid renewable systems as feasible. **Renewable Energy**, n. 86, p. 384-391, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.030>

PINHO, João T.; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: CEPEL; CRESESB, 2014.

PROTOGEROPOULOS, C.; BRINKWORTH, B. J.; MARSHALL, R. H.. Sizing and techno-economical optimization for hybrid photovoltaic/wind power systems with battery storage. **International Journal of Energy Research**, v. 21, p. 465-479, 1997.

SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JR, A. O. An optimal mix of solar PV and hydro power for a low-carbon electricity in Brazil. **Renewable Energy**, n. 85, p. 137-147, 2016.
dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.010

SHAYANI, Rafael A.; OLIVEIRA, Marco Aurélio G.; CAMARGO, Ivan M T. Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 5., 2006. Brasília. **Anais...** 2006.

SINHA, S.; CHANDEL, S. S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 50, p. 755-769, 2015.

SOVACOOOL, Benjamin K. The intermittency of wind, solar and renewable electricity generators: Technical barrier or rhetorical excuse? **Utility Policies**, n. 17, p. 288-296, Sep.2009. DOI: 10.1016/j.jup.2008.07.001

TINA, G.; GAGLIANO, S.; RAITI, S.. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. **Solar Energy**, n. 80, p. 578-588, 2006.

TRANCOSO, Ana R.; DOMINGOS, J. D.; PESTANA, R. Previsibilidade da energia eólica. In: JORNADAS CIENTÍFICAS DA ASOCIACIÓN METEOROLÓGICA ESPAÑOLA, 29., ENCONTRO HISPANO-LUSO DE METEOROLOGIA, 7., 2006, Pamplona, 2006. **Anais...** 2006.

UPADHYAY, S.; SHARMA, M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 38, p. 47-63, 2014. dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057

YANG, H.; LU, L.; ZHOU, W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. **Solar Energy**, n. 81. p. 76-84, 2007.

XU, L. *et al.* An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 3, p. 774-785, jul. 2013.

APÊNDICE A - MÉTODOS DE CÁLCULO UTILIZADOS

Neste apêndice, serão apresentados os procedimentos de cálculo utilizados para:

- (i) avaliar qual a complementariedade possível entre as fontes eólica e solar, no município de Brotas de Macaúbas/BA;
- (ii) mensurar qual a variabilidade de geração de cada fonte individualmente e do sistema híbrido proposto, e
- (iii) definir qual o valor da energia gerada pelo sistema híbrido, baseado no valor de investimento necessário para instalação de cada fonte, no preço ofertado por um conjunto selecionado de empreendimentos das fontes eólica, solar e biomassa, vencedores em leilões de energia no Brasil e na quantidade de geração esperada, a partir de cada fonte que compõe o sistema híbrido dimensionado neste trabalho.

A 1 – CÁLCULO DA COMPLEMENTARIEDADE EÓLICA-SOLAR

O cálculo da complementariedade possível entre as fontes eólica e solar, no município de Brotas de Macaúbas/BA, demandou inicialmente a necessidade de se definir, individualmente, qual o regime de geração para cada uma das fontes.

Com este objetivo, baseado nas informações publicadas nos Boletins Mensais de Geração Eólica pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, coletou-se o valor do fator de capacidade médio, para cada hora do dia, em cada um dos meses do ano de 2015, expressos em percentual da capacidade instalada, relativos à usina eólica Seabra, localizada no referido município. Assim, a partir da capacidade instalada da usina, também divulgada nessa mesma publicação, e dos dados coletados para o fator de potência, foi possível compor um conjunto de 288 pontos representativos do regime de geração da fonte eólica para o ano de 2015.

A geração solar possível no município estudado foi estabelecida através de simulação computacional, utilizando-se o software PySyst e dados meteorológicos, relativos às coordenadas geográficas da usina Seabra, obtidos através da plataforma Meteonorm. De posse desses dados e, baseado em uma capacidade de geração escolhida, pôde-se também elaborar um conjunto de 288 pontos representativos do regime de geração solar para o ano de 2015, tanto em termos de fator de capacidade quanto de geração esperada.

A partir do conjunto de pontos representativos do fator de capacidade eólico e solar e, utilizando-se de uma capacidade de geração unitária para cada uma das fontes, calculou-se qual seria a geração total para o ano de 2015, individualmente por fonte. Na sequência, entendendo-se que a complementariedade possível entre as fontes interfere diretamente na soma das gerações individuais, calculou-se qual a geração total, a partir das duas fontes em conjunto.

De posse dos valores das gerações individuais e em conjunto para as fontes eólica e solar e, uma vez identificado que a fonte eólica possui geração maior, apesar de considerar a mesma capacidade de geração que a fonte solar, calculou-se a complementariedade possível, em base anual, a partir da razão entre a geração solar e a geração eólica, chegando-se ao valor de 34% que significa qual o aumento de geração possível, em relação ao valor individual da fonte eólica, a partir da inclusão da fonte solar como participante de um sistema híbrido, no município de Brotas de Macaúbas/BA.

Ressalta-se que a complementariedade, calculada conforme descrito, reflete o potencial de aumento de geração para a localidade objeto da análise e para o ano estudado. Resultados distintos serão obtidos, tanto para outras localidades no mesmo período de análise, quanto para a mesma localidade em períodos de tempo diferentes do utilizado nesta análise.

A 2 – VARIABILIDADE DE GERAÇÃO POR FONTE E PARA O SISTEMA HÍBRIDO

O cálculo da variabilidade apresenta resultados diferentes na medida em que sejam utilizados períodos de análise distintos e, por isso, é necessário considerar, para a definição do período de análise, quais as consequências esperadas desta variabilidade. Em termos gerais, a variabilidade de geração de fontes como a eólica e a solar implica a necessidade de utilização de geração adicional, a partir de outra fonte que apresente rápida capacidade de resposta, ou a necessidade de serviços ancilares e, em ambas alternativas, implicam custos operacionais.

Neste sentido, tanto do ponto de vista da geração por outra fonte quanto da aplicação de serviços ancilares, a variabilidade observada entre duas horas consecutivas significa, na prática, situação crítica para a performance do sistema elétrico, onde estão conectadas as fontes passíveis desta variação. Assim, para o presente trabalho, a variabilidade foi calculada a partir da diferença entre o fator de capacidade observado entre duas horas consecutivas de cada mês do ano de 2015, tanto para a fonte eólica quanto para a solar individualmente e, quando somados

os fatores de capacidade das fontes, também para cada hora de cada mês do ano de 2015, foi calculada a variabilidade observada atribuída ao sistema híbrido.

A 3 – CÁLCULO DO VALOR DA ENERGIA EM SISTEMA HÍBRIDO

O cálculo do valor da energia gerada pelo sistema híbrido proposto neste trabalho considera, como dados de entrada, indicadores técnicos e econômicos das fontes participantes do sistema, neste caso a eólica, a solar e a biomassa, obtidos ou elaborados através da análise dos dados públicos referentes aos leilões de energia realizados nos anos de 2015 e 2016, e que estão apresentados nas tabelas 10, 11, 13 e 14 do texto principal.

Considera-se, também, para este cálculo qual o aumento da geração total de eletricidade, obtido especificamente para a combinação proposta de capacidades instaladas das fontes eólica e solar, a partir do percentual de complementariedade possível para a localidade escolhida e apresentada no item 4.1 deste trabalho. Na equação (I), apresenta-se o algoritmo utilizado para cálculo do valor da energia obtido para o sistema híbrido eólico-solar.

$$p_{EOL+SOL} = \frac{(cap_{EOL} * inv_{EOL} * p_{EOL}) + (cap_{SOL} * inv_{SOL} * p_{SOL})}{(cap_{EOL} * inv_{EOL} + cap_{SOL} + inv_{SOL})} \cdot (1 + \Delta_{geração\ SOL}) \quad (I)$$

Onde:

$p_{EOL+SOL}$: valor da energia do sistema híbrido eólico-solar em R\$/MWh

cap_{xxx} : Capacidade instalada eólica (EOL) ou solar (SOL) em MW

inv_{xxx} : Investimento instalação eólica (EOL) ou solar (SOL) em R\$/kW

p_{xxx} : preço ofertado pela fonte eólica (EOL) ou solar (SOL) em R\$/MWh

$\Delta_{geração_{SOL}}$: aumento de geração decorrente da inserção da fonte solar

Na equação (II), análoga à equação (I), apresenta-se o algoritmo utilizado para o cálculo do valor da energia obtido com a inserção da fonte biomassa como terceira fonte participante do sistema híbrido proposto.

$$p_{EOL+SOL+BIO} = \frac{(cap_{EOL+SOL} * inv_{EOL+SOL} * p_{EOL+SOL}) + (cap_{BIO} * inv_{BIO} * p_{BIO})}{(cap_{EOL+SOL} * inv_{EOL+SOL} + cap_{BIO} + inv_{BIO})} (1 + \Delta_{geração\ BIO}) \quad (II)$$

Onde:

$p_{EOL+SOL+BIO}$: valor da energia do sistema híbrido eólico-solar-biomassa em R\$/MWh

cap_{xxx} : Capacidade instalada eólica-solar (EOL+SOL) ou biomassa (BIO) em MW

inv_{xxx} : Investimento instalação eólica-solar (EOL+SOL) ou biomassa (BIO) em R\$/kW

$p_{EOL+SOL}$: valor da energia do sistema híbrido eólico-solar em R\$/MWh

p_{BIO} : preço ofertado pela fonte biomassa (BIO) em R\$/MWh

$\Delta_{geração_{BIO}}$: aumento de geração decorrente da inserção da fonte biomassa

APÊNDICE B - DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE MARKVART

O método para dimensionamento de sistemas híbridos apresentado em Markvart (1996) foi escolhido, para aplicação neste trabalho, devido à sua adequabilidade aos dados disponíveis acerca dos recursos eólico e solar presentes no município de Brotas de Macaúbas/BA. Como explicado anteriormente, os dados referentes ao recurso eólico foram obtidos a partir da coleta de informações sobre a geração real ocorrida na usina eólica Seabra, localizada no município escolhido, e a geração solar, a partir de simulação computacional realizada para a mesma localidade, ambos em termos de geração efetiva e de fator de capacidade.

O conhecimento do fator de capacidade em base horária permite, por decorrência, a definição de qual a capacidade instalada necessária para atendimento de uma determinada carga. No caso em estudo, optou-se por estabelecer como carga uma unidade de 1 MW, pois, desta forma, a capacidade instalada necessária de geração para garantir o atendimento à carga é o inverso matemático do fator de capacidade observado.

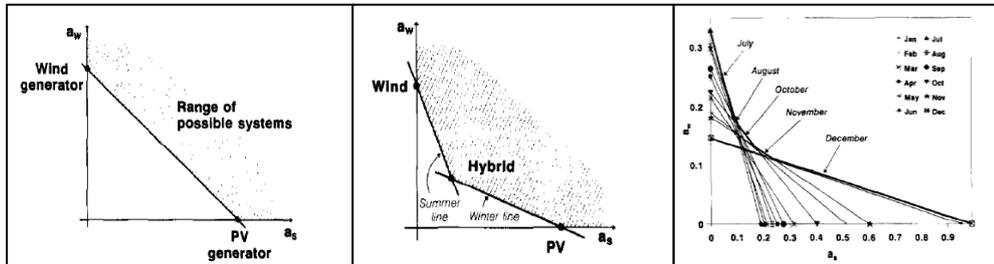
Em seu trabalho, Markvart desenvolve um método de dimensionamento a partir da utilização de gráficos ilustrativos da combinação de capacidades de geração eólica e solar, com o objetivo de garantir o atendimento da carga e, posteriormente, com aplicação de equações diferenciais, determina a combinação ótima econômica das capacidades instaladas das fontes, a partir da aplicação de um critério matemático específico.

Markvart observou que, se em um plano cartesiano x - y , aonde o eixo x representa a capacidade instalada solar e o eixo y a capacidade instalada eólica, ao se interligar os pontos que indicam qual a capacidade necessária para atendimento de forma individual da carga, por cada uma das fontes, tem-se uma reta que delimita uma região onde todas as opções de combinação possíveis, situadas no quadrante superior à esta reta, estão adequadas ao critério de atendimento da carga, enquanto, ao contrário, as combinações situadas no quadrante abaixo desta reta não atendem ao mesmo critério. Dessa forma, a reta assim estabelecida representa, então, a fronteira na qual o critério de atendimento à carga se encontra válido.

Aprimorando sua observação, Markvart percebeu que, na medida em que a capacidade instalada necessária era definida sucessivamente em períodos de tempo cada vez menores, seria possível, no limite, definir uma reta de dimensionamento, composta pelos trechos de reta representativos das fronteiras de atendimento à carga de cada um dos períodos de tempo

considerados. O conjunto de figuras B1 apresenta a sequência de raciocínio observada por Markvart.

Figura B1 – Definição gráfica da reta de dimensionamento de Markvart



Fonte: Markvart (1996, p. 278 e 279)

Assim, uma vez definida a reta de dimensionamento que garante o atendimento da carga, Markvart buscou compreender qual o critério econômico que deveria ser utilizado para estabelecer o par de capacidades instaladas, capaz de proporcionar a geração de energia menos onerosa. Para isto, Markvart utilizou o equacionamento diferencial da definição da reta de dimensionamento, para estabelecer a relação entre a capacidade instalada e o custo de geração por unidade de cada fonte, como pode ser visto na figura B2.

Figura B2 – Equacionamento diferencial da reta de dimensionamento

$$a_s(t) = \frac{d(t)W'(t) - d'(t)W(t)}{S(t)W'(t) - S'(t)W(t)}$$

$$a_w(t) = \frac{d(t)S'(t) - d'(t)S(t)}{W(t)S'(t) - W'(t)S(t)}$$

$$\frac{da_s}{da_w} = - \frac{c_w}{c_s}$$

Fonte: Markvart (1996, p. 280)

Na sequência, desenvolvendo o equacionamento diferencial utilizado, Markvart concluiu que a relação ótima das capacidades seria observada para o ponto que atendesse ao critério econômico apresentado na figura B3.

Figura B3 – Critério econômico para definição do ponto ótimo de dimensionamento

$$\frac{W(t)}{S(t)} = \frac{C_w}{C_s}$$

Fonte: Markvart (1996, p. 280)