

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

PAULO RAFFAEL MAROZINSKI

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE UMA USINA HÍBRIDA EÓLICO-
FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

PAULO RAFFAEL MAROZINSKI

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE UMA USINA HÍBRIDA EÓLICO-
FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

PAULO RAFFAEL MAROZINSKI

Avaliação da geração de uma usina híbrida eólico-fotovoltaica no estado do Rio Grande do Norte

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 31 de outubro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno Paulo Raffael Marozinski foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Coordenador do Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Me. Romildo Alves dos Prazeres
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Gerson Maximo Tiepolo
UTFPR

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua graça e fidelidade nos momentos felizes da vida e principalmente pelo socorro bem presente na hora da angústia.

À minha esposa virtuosa Fernanda Arnoni Vargas Marozinski pela total cumplicidade do nosso caminhar a dois.

Aos meus Pais, Raul e Alcires Maria de Oliveira Marozinski por sempre me incentivarem pela busca do conhecimento.

A todos os professores do Curso de Especialização em Energias Renováveis, particularmente ao Professor Dr. Jair Urbanetz Junior pela confiança depositada na orientação do trabalho.

“Valem mais dois juntos do que um sozinho, pois o esforço de dois consegue melhores resultados.”

Eclesiastes 4:9 – BPT09

RESUMO

MAROZINSKI, Paulo Raffael. **AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE UMA USINA HÍBRIDA EÓLICO-FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.** 2018. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso da Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho teve como objetivo a avaliação da geração de uma usina híbrida eólico-fotovoltaica no estado do Rio Grande do Norte a partir da proposta metodológica desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Considerando uma planta eólica de 30 MW de capacidade instalada no local do estudo, combinou-se à esta geração a produção de energia de uma usina solar fotovoltaica padrão de 1,054 MW em proporções escalonadas até a potência de 10,54 MW. Foram gerados dois casos base a título de comparação para a análise: uma usina fotovoltaica com estrutura fixa e outra usina com sistema de rastreamento de 1 eixo. Os resultados obtidos nas simulações foram valores de potência utilizando-se o *software* SAM e planilha do pacote OFFICE a partir de dados anemométricos e solarimétricos de estações de prospecção de recurso energético registrados em intervalos de 10 minutos para um ano de estudo. Como a sobreposição da geração de energia não poderia exceder o limite de escoamento equivalente à capacidade instalada da usina eólica, o contingenciamento da geração se daria pelo corte da produção de energia elétrica oriunda da usina solar fotovoltaica. Conclui-se que a complementariedade ocorre o ano todo, porém entre os meses de novembro a maio existe um aproveitamento maior da energia solar fotovoltaica devido aos perfis de vento menores. A similaridade do ponto de vista de aproveitamento energético (injeção *versus* corte) nos dois tipos de estruturas de usinas solares simuladas também foi comprovada.

Palavras-Chaves: complementariedade energética, geração híbrida, sistema híbrido eólico-fotovoltaico, energia renovável variável

ABSTRACT

MAROZINSKI, Paulo Raffael. **EVALUATION OF THE GENERATION OF A HYBRID WIND FARM IN PHOTOVOLTAIC STATE OF RIO GRANDE DO NORTE**. 2018. 60f. Monograph of Specialization in Renewable Energy – Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

This study objectived to evaluate the generation of a wind-photovoltaic hybrid plant in the state of Rio Grande do Norte based on the methodological proposal developed by the Energy Research Office - EPE. Considering a wind farm with a capacity of 30 MW installed at the study site, the power generation of a standard photovoltaic solar plant of 1,054 MW was combined in this generation in staggered proportions up to the power of 10.54 MW. Two base cases were generated for comparison: a photovoltaic plant with a fixed structure and another plant with a single-axis solar tracking system. The results obtained in the simulations were power values using the SAM *software* and OFFICE package worksheet from anemometric and solarimetric data of energy resource prospecting stations registered at 10 minute intervals for one year of study. As the overlap of power generation could not exceed the flow limit equivalent to the installed capacity of the wind farm, the contingency of the generation would occur by the cut of the production of electric energy coming from the photovoltaic solar power plant. It is concluded that the complementarity occurs all year round, but between the months of November and May there is a greater use of photovoltaic energy due to the smaller wind profiles. The similarity from the point of view of energy utilization (injection *versus* cut) in the two types of structures of simulated solar power plants has also been proven.

Keywords: energy resources complementary, hybrid power system, wind-photovoltaic hybrid system, variable renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipologias de combinações de usinas	23
Figura 2 - Curva e coeficiente de potência dos modelos dos aerogeradores da plataforma AW3000 do fabricante Acciona	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção anual de energia fotovoltaica com estrutura fixa e com rastreamento para a usina padrão de 1,054 MW	44
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Índice histórico da densidade de potência dos ventos do local	38
Gráfico 2 - Variação interanual da densidade de potência.....	39
Gráfico 3 - Perfis horários da velocidade do vento para as estações do ano.....	40
Gráfico 4 - Permanência da velocidade média do vento	41
Gráfico 5 - Variação da produção mensal de energia fotovoltaica e média da irradiância global horizontal	44
Gráfico 6 - Produção mensal de energia eólica e média da velocidade do vento na altura de 100 m	45
Gráfico 7 - Perfil horário médio da velocidade do vento e da irradiação global horizontal	46
Gráfico 8 – Média anual de potência eólica e fotovoltaica	47
Gráfico 9 - Percentual de cortes entre estrutura fixa e com sistema de rastreamento de 1 eixo.....	48
Gráfico 10 - Montantes de energia injetada e cortada da produção fotovoltaica.....	49
Gráfico 11 - Corte anual de energia em função da potência fotovoltaica instalada...	50
Gráfico 12 - Perfil mensal médio dos cortes de energia fotovoltaica.....	51
Gráfico 13 - Produção de energia por fonte e combinada no dia 09 de novembro ...	52
Gráfico 14 - Produção de energia por fonte e combinada no dia 09 de setembro	53
Gráfico 15 - Perfil médio anual dos cortes de energia fotovoltaica em função da hora do dia	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERV	Energias Renováveis Variáveis
GE	General Electric
GHI	Irradiância Global Horizontal
GSR	Renewables Global Status Report
IEA	Agência Internacional de Energia
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
MEASNET	International Measuring Network of Wind Energy Institutes
MERRA	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
NREL	National Renewable Energy Laboratories
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDE	Plano Decenal de Energia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PLS	Projeto de Lei do Senado
REW	Renewable Energy World
RLI	Reiner Lemoine Institut
SAM	System Advisor Model
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SECI	Solar Energy Corporation of India
SIN	Sistema Interligado Nacional
SRG	Superintendência de Regulação dos Serviços de Geração
UTC	Universal Time Coordinated
WISE	Wind Integrated Solar Energy

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA	19
2.2	ASPECTOS DA COMPLEMENTARIEDADE ENERGÉTICA EÓLICA-FOTOVOLTAICA.....	24
2.3	PARQUES HÍBRIDOS EÓLICO-FOTOVOLTAICOS.....	27
2.4	ASPECTOS REGULATÓRIOS DO SETOR ELÉTRICO QUANTO A GERAÇÃO HÍBRIDA.....	29
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	OBTENÇÃO DOS DADOS E PARÂMETROS DE ANÁLISE	32
3.2	PREVISÃO DE GERAÇÃO SOLAR	34
3.3	PREVISÃO DE GERAÇÃO EÓLICA	37
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
5	CONCLUSÃO	55
6	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da expansão das fontes renováveis de energia tem sido evidenciada em diversos países nos últimos anos. Segundo o relatório Renewables Global Status Report (GSR, 2018), a capacidade de geração de energia renovável experimentou o seu maior crescimento no ano de 2017, com uma estimativa de 178 GW instalados em todo o mundo, elevando a capacidade total em quase 9% em relação ao ano de 2016. As renováveis representaram 70% das adições líquidas à capacidade global de geração de energia elétrica em 2017, acima dos 62% do ano de 2016, atingindo uma participação de 26,5% na matriz global de geração de energia elétrica. Pelo segundo ano consecutivo, a energia solar fotovoltaica adicionou a maior capacidade de energia do que qualquer outra fonte de geração renovável. A fonte solar representou cerca de 55% da capacidade adicional de energia renovável instalada em 2017, sendo o montante de energia fotovoltaica superior às adições líquidas de combustíveis fósseis e energia nuclear somadas juntas. As fontes eólica e hidráulica representaram a maior parte das adições restantes, contribuindo com 29% e 11% respectivamente acompanhado do acréscimo de 4,6% referente à biomassa. O crescimento da capacidade instalada em curso e a expansão geográfica dos aproveitamentos dos recursos renováveis foram impulsionados por uma série de fatores, incluindo o aumento da demanda de energia elétrica em alguns países e consequentemente a intensificação dos investimentos, políticas eficazes em conjunto com mecanismos específicos de apoio ao desenvolvimento das renováveis, contínuos declínios de custos especialmente para as fontes solar fotovoltaica e eólica e mudanças de mercado.

O Brasil possui reconhecimento internacional na gestão de recursos energéticos renováveis, evidenciando que decisões estratégicas de política energética são essenciais para a obtenção de resultados no longo prazo fazendo frente ao crescimento, de forma segura, econômica e com respeito à legislação ambiental. O país dispõe de grande potencial energético, com destaque para as fontes renováveis de energia: hidráulica, eólica, solar e biomassa.

Conforme indicam os resultados do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE, 2026), estima-se que a parcela renovável da matriz energética brasileira atingirá 48% ao final do horizonte decenal (2026), ao passo que 87% da produção de

energia elétrica será oriunda de fontes renováveis. De modo a suprir o crescimento da demanda por energia e ao mesmo tempo manter o caráter renovável da nossa matriz, são esperados investimentos da ordem de R\$ 1,4 trilhões no período 2017 a 2026. Desse montante, destaca-se a expansão esperada de 11,8 GW para a fonte eólica e de 7 GW para a fonte solar fotovoltaica. A projeção da demanda de energia elétrica, contemplada até o final do ano de 2026, vislumbra um crescimento médio anual da carga no Sistema Interligado Nacional - SIN, a uma taxa média de expansão de 3,5% ao ano, o que representa um crescimento médio estimado de 2.700 MW médios/ano. Naturalmente, esta evolução reflete a necessidade de expansão das fontes de energia, de forma a suprir e assegurar o atendimento energético do país.

Os avanços tecnológicos e os preços do mercado têm permitido que a implantação de usinas eólicas e solares não sejam mais meras promessas para o futuro, mas alternativas energéticas limpas, renováveis e economicamente atraentes. Pode-se afirmar que a fonte eólica no país está consolidada ao atingir a capacidade instalada de 13 GW em fevereiro de 2018 (ANEEL, 2018), porém com o seu crescimento acentuado com significativa predominância na região do Nordeste, torna-se necessário readequar o dimensionamento da rede básica para permitir a conexão de novos empreendimentos. Neste contexto uma alternativa para viabilizar novos projetos em regiões que possuem capacidade remanescente de escoamento reduzido, é o estudo do aproveitamento das infraestruturas já existentes, o que possibilita desta forma o desenvolvimento da chamada “geração híbrida”, quando uma ou mais fontes geram energia e utilizam as subestações e linhas de transmissão de empreendimentos já implementados.

A integração de energias renováveis variáveis - ERV foi estudada em detalhes pela Agência Internacional de Energia usando modelos horários para os Estados Unidos, União Europeia e Índia (IEA, 2016). Os resultados demonstram a importância do planejamento do sistema elétrico e das medidas de integração da ERV. No ritmo atual, estima-se que em 2040 cerca de 30% da eletricidade mundial será fornecida por energia eólica e solar fotovoltaica e a energia renovável variável tornar-se-á a principal fonte de eletricidade na União Europeia em 2030 e nos Estados Unidos, China e Índia, em 2035.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do estudo é avaliar o efeito da complementaridade no tempo entre as fontes eólica e solar fotovoltaica sob o ponto de vista energético e de compartilhamento de uma capacidade limitada de escoamento de energia em determinada localidade do estado do Rio Grande do Norte.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica referente à complementariedade energética entre as fontes eólica e solar e a abrangência dos sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos;
- Caracterizar os recursos eólico e solar fotovoltaico na localidade de estudo a partir dos dados climáticos obtidos;
- Analisar o impacto das diferentes proporções da potência fotovoltaica agregada à geração eólica através de duas configurações de plantas solares;
- Avaliar as possíveis perdas de energia devido aos cortes na produção fotovoltaica pela sobreposição da geração em virtude da limitação da capacidade de escoamento da subestação/sistema de transmissão.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento acentuado do aproveitamento eólico, com significativa predominância na região nordeste do país, torna-se necessário a ampliação e a readequação do dimensionamento da rede básica a fim de possibilitar o escoamento da energia das usinas que estão prontas para participação nos leilões, bem como prover margens de capacidade de escoamento no sistema de transmissão para a conexão de novos empreendimentos. Porém o que se observa é um descasamento temporal dos programas de expansão da transmissão com o desenvolvimento da fonte eólica e a cada leilão de energia resulta em uma redução da capacidade

remanescente do SIN para o escoamento da geração pela rede básica. Neste aspecto, ações para o aproveitamento das fontes regionais complementares (eólica, biomassa, solar, hidráulica) ganham importância no sentido procurar contornar parte das restrições do sistema de transmissão para escoamento de energia.

Conforme relatado pela EPE (2017a), a geração híbrida tem sido objeto de pauta entre os agentes geradores que estão propondo a criação de novos produtos nos leilões de energia. Destaca-se sobre a viabilidade dos empreendimentos híbridos a partir das fontes eólica e solar fotovoltaica onde é vislumbrado nos estudos e notícias referente ao tema a otimização dos custos de investimento e operação além da redução dos impactos ambientais.

Com os acréscimos significativos que elevaram a participação da fonte eólica na matriz elétrica brasileira, com os expressivos resultados obtidos nos últimos leilões de energia e com o *know-how* adquirido no tocante ao recurso eólico ao longo dos anos, o governo passou a considerar a fonte eólica competitiva em relação às demais e decidiu alterar a forma de contratação dos projetos eólicos nos leilões de energia. Até o Leilão A-6 de 2018 a energia elétrica negociada por empreendimentos eólicos ocorria através de contratos na modalidade “disponibilidade de energia” e eventuais riscos, ônus e benefícios advindos da variação da produção eram alocados ao grupo dos compradores da energia, neste caso as distribuidoras participantes do leilão e, os mesmos posteriormente, eram repassados aos consumidores regulados. O maior impacto da mudança da modalidade contratual da fonte de geração eólica de disponibilidade para “quantidade de energia” implica na alocação do risco financeiro para o agente vendedor (empreendedores) a quem pode ser considerado ter a capacidade de gerenciá-los e precificá-los. Diante deste fato a integração da geração solar fotovoltaica à geração eólica poderá mitigar eventuais riscos e atenuar exposições financeiras em relação à obrigação contratual pela entrega da quantidade de energia contratada.

A legislação do sistema elétrico poderá ser alterada para permitir que as chamadas usinas híbridas com fontes renováveis sejam inseridas no rol das que podem fazer parte dos leilões de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada - ACR. A medida está prevista no Projeto de Lei do Senado PLS Nº 107 de 2017 e estabelece que empreendimentos de geração existentes com fonte renovável ficam autorizados a elevar sua garantia física com o acréscimo de capacidade de geração de energia elétrica a partir de outros tipos de fontes renováveis.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa desenvolvida neste trabalho, quanto à sua natureza, é do tipo científica aplicada, a partir de uma proposta metodológica existente na realização de um estudo de caso em que se avalia a complementariedade energética entre os recursos eólico e solar em uma determinada localidade. A abordagem da pesquisa é quantitativa pela compilação dos dados anemométricos e solarimétricos obtidos para o trabalho, com caráter exploratório em ambiente de simulação.

A revisão bibliográfica contemplou pesquisa em literatura científica, artigos técnicos, notícias em meio digital, leis e resoluções normativas brasileiras bem como publicações de instituições nacionais e estrangeiras relacionadas ao tema. Também foi realizada a consulta a sítios eletrônicos de fabricantes de materiais e equipamentos citados neste estudo.

Para a avaliação da geração de energia elétrica da usina híbrida eólico-fotovoltaica, foi utilizada a proposta metodológica desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE apresentada na nota técnica EPE-DEE-NT-025/2017-r0 (EPE, 2017a).

Os dados obtidos para o estudo compreendem uma campanha de medição de parâmetros de vento de 3 anos consecutivos e de irradiação solar no período de um ano. Os dados são provenientes de estações de medição distintas, numa localidade específica no estado do Rio Grande do Norte.

Nas simulações de produção de energia os dados foram tabulados utilizando-se planilha eletrônica do pacote Office e o *software* SAM (*System Advisor Model*), desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratories*). Estes dados foram compilados através de cálculos com equações pesquisadas em bibliografia específica.

Os dados apresentados no estudo são de caráter confidencial e por estarem subsidiando o desenvolvimento de projetos, em alguns casos foram demonstrados de forma normalizada, ressaltando que o procedimento não prejudicou o desenvolvimento do trabalho.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em 5 capítulos. No Capítulo 1, na introdução é explanado sobre a expansão das fontes renováveis de energia, os objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos.

A fundamentação teórica é apresentada no Capítulo 2, abordando o conceito referente a sistemas híbridos de geração de energia elétrica, aspectos da complementariedade energética e do arcabouço regulatório vigente em relação à geração híbrida além de apresentar os projetos híbridos eólico-fotovoltaicos implantados ou em planejamento no Brasil e no mundo.

O Capítulo 3 consiste no desenvolvimento do trabalho que explica a obtenção dos dados de estudo e parâmetros de análise para a previsão da geração solar e eólica.

No Capítulo 4 é apresentado a análise dos resultados e no Capítulo 5 a conclusão e as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Um sistema de energia híbrido pode ser definido como a associação de duas ou mais fontes energéticas para produção de energia elétrica. Normalmente decorrem da agregação de tecnologias de geração de energia renovável com sistemas convencionais de geração (BARBOSA, 2006). Dependendo da disponibilidade local dos recursos, pode-se combinar várias formas de geração e/ou armazenamento de energia ou ainda utilizar dois ou mais tipos de combustíveis (incluindo combustível fóssil ou renovável) e dependendo da integração das fontes energéticas e configuração do sistema, pode contribuir para a redução de custos operacionais, impactos ambientais e interrupções do sistema (UNITED NATIONS, 2012).

Os sistemas híbridos de geração de energia vêm sendo estudados já há vários anos em diferentes configurações e em diferentes contextos e sempre ao longo do tempo incluindo novas tecnologias. Em várias possíveis configurações, permitem conceber sistemas mais eficientes do que sistemas baseados em apenas uma fonte de energia. A aplicação de sistemas híbridos concomitantemente à relevância dada às fontes de energia renováveis para geração de energia elétrica remonta da década de 70, decorrente da busca de uma alternativa energética frente aos choques de petróleo de 1973 e 1979, período este considerado um ponto de inflexão no ciclo da garantia de fornecimento de energia elétrica via tecnologias convencionais (SILVA, 2015). A partir do final da década de 90 a implantação dos sistemas híbridos visava além da redução do consumo de combustível fóssil a motivação quanto às questões ambientais. A partir de 2000 a utilização dos sistemas híbridos passa a fazer parte dos estudos de planejamento energético de diversos países (BARBOSA, 2006).

Comumente os sistemas híbridos têm a finalidade de fornecer eletricidade para comunidades isoladas, eletrificação do meio rural, para pequenos sistemas de bombeamento de água, iluminação pública, dessalinização de água, sistemas de telecomunicação, entre outras aplicações (PINHO et al., 2008). Com a expansão das fontes renováveis e avanços tecnológicos, tem-se estudado formas de compartilhar as infraestruturas já existentes (linhas de transmissão e subestações) de

empreendimentos de geração de energia elétrica, o que possibilita o desenvolvimento e viabilidade da geração híbrida de grande porte.

Os sistemas híbridos podem ser classificados de diversas formas utilizando-se de diferentes critérios. Lazarov et al. (2005) trataram sobre o estado da arte dos sistemas híbridos com fontes de energias renováveis levantando as tendências para pesquisa e desenvolvimento, bem como os arranjos e configuração dos sistemas. A classificação pode ser de acordo com a presença de fontes de energia convencionais, que determinam a confiabilidade e a robustez dos sistemas, de acordo com o número de fontes aplicadas, sendo um dos fatores que definem a complexidade da geração bem como o nível de sustentabilidade e eficiência energética, de acordo com o tipo de energia produzida (mecânica, elétrica, térmica, química) e de acordo com a inclusão de armazenamento de energia que pode ser armazenamento elétrico (banco de baterias, capacitores, supercondutores), armazenamento térmico (reservatório de fluidos térmicos), armazenamento mecânico (volante inercial, ar comprimido), armazenamento da luz direta (fotoquímico), conversão de combustível (hidrogênio) e armazenamento potencial gravitacional (usinas hidrelétricas reversíveis e torre de água). Quanto à forma de interligação com a rede elétrica, de acordo com Barbosa (2006), os sistemas híbridos podem ser classificados em sistemas isolados, caracterizados por atenderem a um conjunto de carga totalmente independente, normalmente através de uma mini rede e isolada do sistema interligado, ou por sistemas interligados a qual a energia elétrica gerada é escoada na rede convencional de uma distribuidora ou transmissora. Para a interligação, é indispensável à utilização de equipamentos adequados, que atuem na proteção, inversão e sincronismo do nível de tensão e frequência das fontes de geração, garantindo assim a qualidade da energia elétrica em operação normal ou em situações de contingência, como falta na rede, perdas de geração, entre outras.

Em relação às capacidades nominais instaladas, Pinho et al. (2008) sugerem a seguinte classificação para os sistemas híbridos:

- a) Microssistema híbrido: Capacidade menor que 1 kW. Essa faixa de potência é utilizada para o atendimento de pequenas cargas individuais;
- b) Sistema híbrido de pequeno porte: $1 \text{ kW} \leq \text{Capacidade} < 100 \text{ kW}$. Essa faixa de potência é a mais encontrada nos sistemas atualmente em operação;

c) Sistema híbrido de médio porte: $100 \text{ kW} \leq \text{Capacidade} < 1.000 \text{ kW}$. Essa faixa de potência é tipicamente constituída por grandes capacidades relativas ao subsistema de geração diesel-elétrica;

d) Sistema híbrido de grande porte: Capacidade $> 1.000 \text{ kW}$. Uma série de tendências estão promovendo uma mudança para a geração híbrida, como a implantação recorde de energia renovável variável proveniente da fonte eólica e solar.

Dentre os diversos arranjos e possíveis combinações de fontes energéticas que contemplam os sistemas híbridos para geração de energia elétrica, Barbosa (2006), destaca como principais: o sistema fotovoltaico-diesel, o sistema eólico-diesel, o sistema fotovoltaico-eólico-diesel e o sistema fotovoltaico-eólico. Uma proposta inovadora na geração híbrida é a exploração de energia solar em reservatórios de usinas hidrelétricas com a inserção de flutuadores (sistema fotovoltaico-hidráulico) (MME, 2016). Pode-se prever ainda a inserção das células a combustível nos sistemas híbridos, dada sua alta eficiência global na conversão de energia elétrica e térmica a partir do hidrogênio, desde que este possa ser obtido localmente, sem a necessidade de transportá-lo de outro local (PINHO et al., 2008).

Visando ampliar e aprofundar a discussão sobre as chamadas “usinas híbridas”, a empresa de pesquisa energética – EPE publicou a Nota Técnica nº EPE-DEE-NT-011/2018-r0, abordando o assunto sob o enfoque regulatório e comercial além de efetuar uma análise em relação aos impactos e benefícios das combinações entre as fontes energéticas. Procurou-se retratar conceitualmente quatro tipos de arranjos, com variados graus de integração entre os recursos energéticos, buscando assim identificar os obstáculos à inovação tecnológica ou a oportunidades de negócios e mapear as possíveis medidas para a viabilização dessas soluções (EPE, 2018). As tipologias de arranjos relatadas na respectiva nota técnica são:

a) Usinas Adjacentes: associação de usinas que normalmente formam complexos de geração de energia elétrica que podem compartilhar a mesma área e instalações de interesse restrito, porém a conexão à Rede Básica ou de Distribuição é independente.

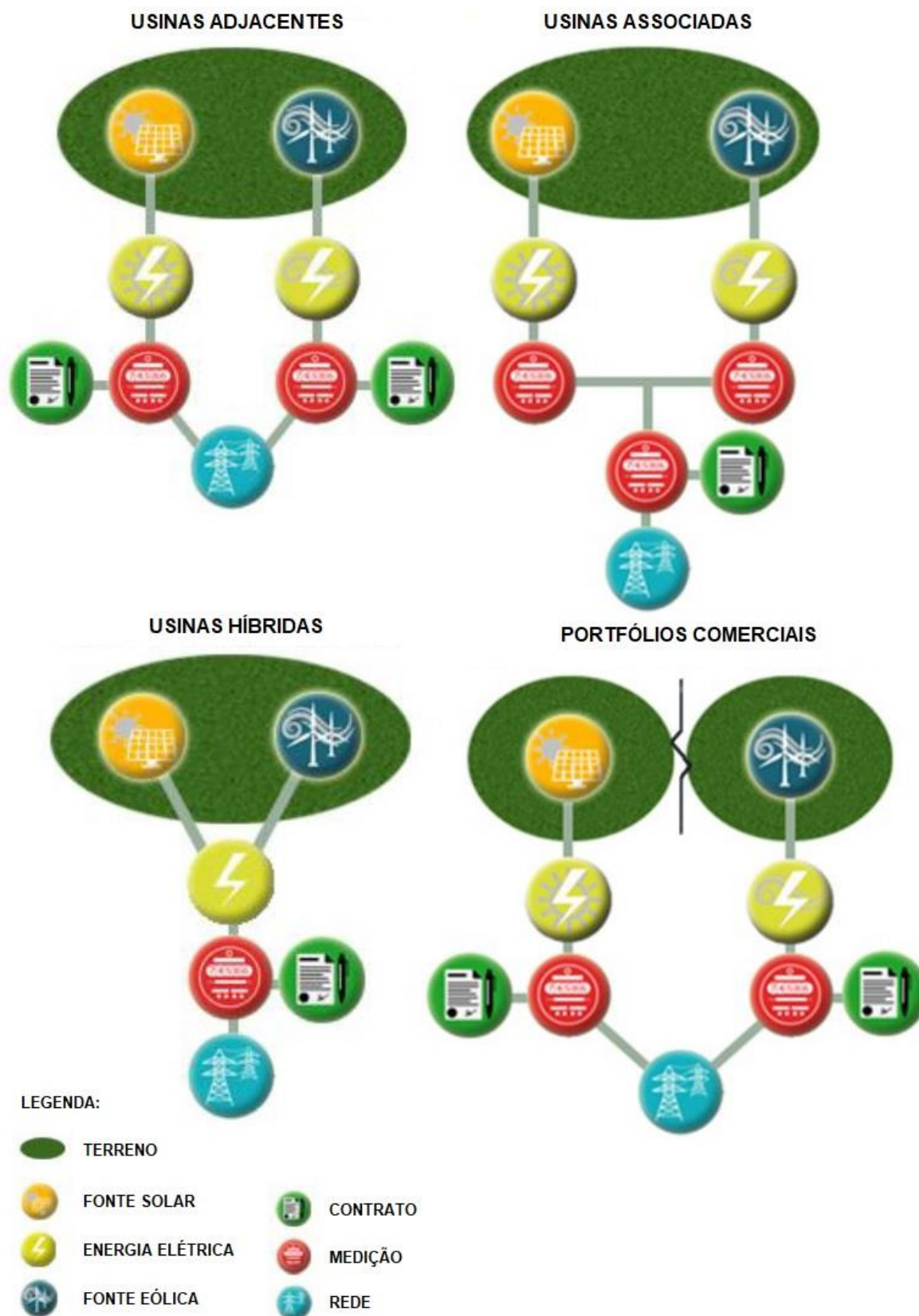
b) Usinas Associadas: similares às adjacentes, porém em um grau de interação mais elevado onde duas ou mais usinas compartilham fisicamente e contratualmente a mesma infraestrutura de conexão e acesso à Rede Básica ou de Distribuição.

c) Usinas Híbridas: a interação das distintas fontes é extremamente elevada a tal ponto de não poder distinguir qual fonte foi responsável pela geração de energia elétrica devido à combinação ocorrer já no processo de produção de energia elétrica.

d) Portfólios Comerciais: diferentemente das categorias anteriores sua natureza é apenas de caráter comercial-contratual independentemente de estarem próximas entre si e visam à diversificação dos ativos e redução dos riscos contratuais por parte dos geradores, sobretudo no caso de usinas complementares.

A Figura 1 ilustra as tipologias destes arranjos:

Figura 1 - Tipologias de combinações de usinas



Fonte: EPE, 2018

2.2 ASPECTOS DA COMPLEMENTARIEDADE ENERGÉTICA EÓLICA-FOTOVOLTAICA

A expressão complementariedade energética pode ser compreendida como sendo a característica de dois ou mais recursos energéticos se apresentarem disponíveis ao longo de um determinado período (complementariedade temporal) ou ao longo de uma determinada região (complementariedade espacial). A complementariedade no espaço pode existir quando as disponibilidades energéticas de uma ou mais fontes se complementam ao longo de uma divisão espacial, por exemplo, regional, estadual. A complementariedade no tempo pode existir quando as disponibilidades apresentam períodos que se complementam ao longo do tempo em uma mesma localidade. A complementariedade ocorre de modo perfeito quando a disponibilidade máxima de uma das fontes coincide com a disponibilidade mínima da outra (BELUCO; SOUZA; KRENZINGER, 2003).

Peron (2017) analisou a complementariedade das gerações variáveis na região nordeste do país e as possíveis combinações dos recursos disponíveis para se obter um perfil de operação mais próximo do perfil de carga. A pesquisa mostrou que a região nordeste tem variações espacial e temporal significativas entre as fontes de geração de energia elétrica e que a expansão deve ser incentivada, mas deve-se procurar por combinações entre as fontes que minimizem o potencial de intermitência e variabilidade global na geração. O estudo orientou-se em séries históricas de geração dos diversos ativos, intercâmbios, cargas de energia, dados físicos, dados eólicos, solares e hidrológicos. A análise foi conduzida com base em abordagem estatística envolvendo análise de correlações de Pearson entre os recursos e avaliação de combinações ótimas das parcelas de geração com objetivo de minimizar o déficit energético da região.

A empresa de pesquisa energética elaborou a Nota Técnica Nº. EPE-DEE-NT-025/2017-r0 apresentando uma proposta metodológica para avaliação de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas com base em estudos de caso para cinco localidades da região nordeste do Brasil. Para cada local foram avaliadas diferentes composições de arranjos para geração eólica e fotovoltaica com o intuito de identificar os principais parâmetros que influenciam na produção de energia e nos cortes decorrentes do limite de capacidade de escoamento da subestação e do sistema de transmissão ou distribuição compartilhada pelos empreendimentos. Os resultados obtidos apontam para a importância da discretização dos dados utilizados, bem como sinalizam que as

características dos recursos energéticos locais, sobretudo do perfil diário e sazonal dos ventos, e a configuração de cada usina, são fatores que influenciam sensivelmente o perfil de complementaridade da produção de energia eólico-fotovoltaica, devendo-se ter cautela na generalização dos possíveis benefícios de otimização da infraestrutura de transmissão e distribuição de energia elétrica (EPE, 2017a).

A aquisição de séries temporais com dados meteorológicos confiáveis é relevante para subsidiar estudos ambientais, previsão do tempo, clima e de produção de energia entre outros (LUCIO; SANTOS; FERREIRA, 2017). Atualmente, encontram-se disponíveis para a comunidade científica, vários bancos de dados com séries históricas de diversas variáveis geradas basicamente através de três métodos: interpolação de dados obtidos em estações de superfície, a técnica de reanálise e a combinação de dados de estações meteorológicas com dados de sensoriamento remoto.

A reanálise meteorológica é um conjunto de dados obtidos a partir de modelos de circulação global com dados medidos. O objetivo é produzir uma base de dados para estudos meteorológicos e climatológicos através da assimilação de dados históricos meteorológicos provenientes de vários sistemas de observação (estações de superfície, estações de radiossonda, boias oceânicas, aviões, radares e satélites) em escala global (STÜKER et al., 2016). Os dados de reanálises são ferramentas importantes para estudos de padrões atmosféricos em várias escalas. Esses dados são utilizados como condição inicial e de contorno para os modelos de circulação geral da atmosfera na escala global e até de mesoescala. A verificação da existência de periodicidades nas séries de radiação solar e velocidades de vento permite prever as variabilidades destes recursos energéticos ao longo do tempo.

Para que um modelo regional represente de maneira satisfatória as condições de vento e irradiação local e conseqüentemente, o potencial de geração eólica e solar são necessários dados de entrada que descrevam as características geográficas e de clima da região. Uma alternativa é a utilização de conjuntos de dados de reanálises meteorológicas. Leoni (2017) et al. utilizaram o banco de dados do MERRA (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*), cujo histórico dos dados meteorológicos remontam ao ano de 1970, para a realização do estudo da complementariedade dinâmica de longo prazo dos regimes eólico e solar para o

parque híbrido Alto Sertão III, da empresa Renova Energia, localizado no município de Caetité, estado da Bahia.

No estudo de caso abordado por Leoni et al. (2017), foi verificada uma substancial complementariedade existente na região de estudo entre as fontes eólica e solar e com a capacidade de garantir o fornecimento de energia mais estável e menos vulnerável à variabilidade climatológica de acordo com os autores. O projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D, desenvolvido pela empresa Renova Energia, cujo objetivo é o estudo por um ano da interação entre fonte eólica e solar, prevê a capacidade de geração de 12 MW médios mediante a disponibilização de 26,4 MW, dos quais 21,6 MW provém de dois parques eólicos e 4,8 MWp de uma planta solar fotovoltaica. De acordo com os dados da empresa Engenho Consultoria, contratada pela Renova para realizar o dimensionamento do arranjo híbrido eólico-solar, a inserção da fonte solar junto aos parques eólicos pode proporcionar um aumento de aproximadamente 30% na garantia física do complexo eólico (PINTO, 2016).

O trabalho de pesquisa desenvolvido pelo Instituto Alemão Reiner Lemoine Institut e pela Empresa Solarpraxis, revelou que, um uso mais eficiente da área ocupada por uma usina e da rede elétrica utilizada, pode ser alcançado combinando o recurso eólico e solar num só empreendimento. De acordo com os dados do estudo, no local específico da usina, o recurso eólico e solar máximo só ocorre por um tempo muito limitado durante o ano. Combinando o fluxo de energia antes que a eletricidade seja injetada na rede, abre a possibilidade de cortar os picos de energia, que representam apenas uma quantidade insignificante da eletricidade total produzida e, conseqüentemente, pode-se otimizar o tamanho da subestação, que será menor do que o necessário para parques solares e eólicos independentes (RLI, 2017). Diversos cenários foram simulados no estudo e análises detalhadas de sombreamento foram realizadas. A combinação de turbinas eólicas e sistemas fotovoltaicos resultou em até duas vezes a quantidade de eletricidade gerada na mesma área de superfície, enquanto as perdas por sombreamento causadas pelas turbinas eólicas sobre os painéis fotovoltaicos podem ser de apenas de 1 a 2% desde que a usina híbrida seja bem projetada. Devido às sinergias energéticas identificadas entre a fonte eólica e solar, um dos grandes benefícios da implantação de usinas híbridas é a não exigência da expansão da rede, já que os recursos energéticos são complementares ao longo do dia e durante as estações do ano. Isso ajuda a garantir que o nível de energia que

está sendo injetado na rede seja mais estável do que apenas uma usina eólica ou de usina solar fotovoltaica (RLI, 2017).

2.3 PARQUES HÍBRIDOS EÓLICO-FOTOVOLTAICOS

A primeira conjugação de geração de energia eólica e solar no Brasil em larga escala ocorreu no estado de Pernambuco no município de Tacaratu e começou a operar em setembro de 2015. O empreendimento pertencente à empresa Enel Green Power é formado pelo parque eólico Fontes dos Ventos, vencedor do leilão A-5 de 2011, com 80 MW de capacidade instalada integrado a duas usinas fotovoltaicas, Fontes Solar I e II, com potência instalada de 11 MWp. Os parques Fontes Solar I e II foram vencedores do leilão de energia solar do estado de Pernambuco, o primeiro certame exclusivo para contratação desse tipo de energia no Brasil, realizado em dezembro de 2013. Correlacionando os dados do atlas eólico e solarimétrico do Estado, o modelo híbrido se mostra viável em 60% do território pernambucano (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 2015).

A concessionária francesa ENGIE através dos projetos de P&D estratégicos da Aneel, chamadas 013/2011 e 017/2013, estruturou, no município de Tubarão, Santa Catarina, um arranjo de geração híbrida com capacidade de geração solar de 3 MWp associada a uma turbina eólica de 2,1 MW de potência. Visando a geração centralizada de grande porte, por meio do projeto de P&D estratégico Aneel, 021/2016, a empresa propôs a integração de um sistema de armazenamento composto de duas tecnologias de baterias (1 MWh/1 MW de íons de lítio + 4 MWh/1 MW de zinco-ar) junto ao arranjo híbrido (RÜTHER, 2016). O sistema integrado de baterias da empresa Eos Energy e a tecnologia de conversão de energia FlexPhase da empresa Northern Power Systems a serem empregados no projeto, representam uma combinação promissora de armazenamento de energia baseada em Zinco e atrelada a um sistema de controle digital, que pode apresentar atratividade sob o ponto de vista econômico e de desempenho (REW, 2017).

A plataforma tecnológica WISE (*Wind Integrated Solar Energy*), desenvolvida pelo Centro de Pesquisa Global da General Electric - GE utiliza os recursos eólico e solar de forma complementar, integrando a energia gerada pelos painéis solares fotovoltaicos diretamente ao conversor das turbinas eólicas. Cada aerogerador é projetado para permitir que 500 kW de energia solar sejam processados através do seu conversor, eliminando a necessidade dos inversores solares e assim os

conversores com múltiplas entradas de geração operam com maior eficiência. Como resultado, ocorre o aumento da capacidade líquida do sistema de 3 a 4% e é proporcionado um ganho anual de produção de energia de até 9%. Devido ao compartilhamento da estrutura civil e elétrica, a economia em investimentos de infraestrutura é da ordem de 10 a 15% e de 25 a 30% em custos operacionais, incluindo manutenção, segundo os dados da empresa. O gerenciamento da geração é através da arquitetura de controle denominada como *Hybrid Control & Scada* que permite segregar a geração e realizar a medição separada, possibilitando assim contratos de compra de energia individuais de cada fonte (GE, 2018a).

Desenvolvido pela empresa Juhl Energy Service Inc., o Projeto Red Lake Falls no noroeste de Minnesota é o primeiro projeto piloto nos Estados Unidos a utilizar a solução WISE que integrará os recursos eólico e solar combinando duas turbinas eólicas da GE de 116 metros de altura e 2,3 MW de potência com uma instalação solar fotovoltaica de 1 MW. Outra aplicação da tecnologia será o projeto de repotenciação do parque eólico Woodstock Hills de 10,2 MW de capacidade instalada localizado no condado de Pipestone, no sudoeste de Minnesota. A nova configuração da usina será composta de 9,2 MW de energia eólica proveniente de quatro novos aerogeradores da GE de 2,3 MW e 600 kW de energia solar conectada a cada aerogerador. A tecnologia de controle será empregada para garantir que a produção simultânea de energia eólica e solar não exceda a capacidade de 10,2 MW da interconexão (GE, 2018b).

No Brasil, o complexo eólico Ventos do Araripe III, na divisa entre Piauí e Pernambuco, operado pela Casa dos Ventos, será o primeiro complexo eólico na região a usar a solução WISE. A primeira fase do projeto integrará 1 MW de energia solar fotovoltaica a quatro turbinas eólicas. Se isso for replicado para todas as 156 turbinas do complexo, existe a possibilidade de adicionar mais 120 MW de capacidade solar ao parque (CASA DOS VENTOS, 2017).

A usina Louzes Agathaki Rigani localizada em Etoloakarnania, Grécia, apresenta seis anos de experiência operacional de geração híbrida eólica-solar. Foi incorporado no ano de 2012, 1 MW de geração solar à planta eólica de 24 MW (VESTAS, 2018).

Desenvolvido pela companhia de energia renovável internacional da Austrália, a Windlab, com o apoio do fabricante de aerogeradores dinamarquês Vestas, o inovador projeto Kennedy Energy Park fase I, de 60,2 MW, é o primeiro projeto em

grande escala do mundo a contar com produção de energia eólica e solar, além de armazenamento à bateria. Projetado para fornecer eletricidade renovável para ajudar a atender a demanda de energia australiana, o projeto abre caminho para que a Austrália e outros países possam integrar mais energia renovável em seus sistemas e superar os desafios de estabilidade da rede, que atualmente é o limitador para uma maior absorção de energia renovável variável (VESTAS, 2017).

O projeto Kennedy I está localizado em Flinders Shire, no norte central de Queensland, Austrália, local que conta com excelentes recursos eólicos e solares. O projeto incluirá 43,2 MW em eólica (12 turbinas Vestas V136-3,6 MW), 15 MW de energia solar (inversores SMA e módulos Jinko Solar) com sistema de rastreamento de um eixo e armazenamento em bateria íon-lítio de 2 MW/4 MWh (Tesla). A fase I do projeto está atualmente em construção e as operações começarão no final de 2018. A pretensão da Windlab é a instalação futura de um complexo híbrido de 1 GW de capacidade instalada (WINDLAB, 2017).

No distrito de Anantapur, estado de Andhra Pradesh no sudoeste da Índia, o Ministério de Energia Nova e Renovável da Índia através da Solar Energy Corporation of India – SECI está planejando e elaborando o processo de licitação para a implantação da maior usina híbrida eólica-solar do mundo. A planta será constituída de 120 MW de energia solar fotovoltaica e 40 MW de energia eólica associado a um sistema de armazenamento de energia via baterias de 40 MWh. Um projeto piloto de 7 MW está para ser implantado em Ramakkalmedu, no estado de Kerala, no sul da Índia, composto de 3 MW de energia solar e 4 MW de energia eólica (SECI, 2018).

Ainda na Índia, no estado de Kamataka, o fabricante de aerogeradores Siemens Gamesa foi contratado por agentes privados do setor elétrico indiano para desenvolver o primeiro grande projeto híbrido comercial eólico solar da Índia, onde uma instalação solar de 28,8 MW será conectada a um parque eólico existente de 50 MW (SIEMENS GAMESA, 2017).

2.4 ASPECTOS REGULATÓRIOS DO SETOR ELÉTRICO QUANTO A GERAÇÃO HÍBRIDA

A Lei 10.438/2002 (BRASIL, 2002), que dispõe também sobre a Universalização do Serviço Público de Energia Elétrica e a Resolução ANEEL nº 223/2003 (BRASIL, 2004), que norteou os Planos de Universalização de Energia Elétrica, permitem vislumbrar os sistemas híbridos de geração de eletricidade através

das fontes de energia renovável, como uma forma importante e viável para o atendimento descentralizado em áreas tanto urbanas quanto rurais, ainda que localizadas em áreas de baixa densidade de carga.

Neste contexto, instituições nacionais, como Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás – CEPEL, o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas - GEDAE da Universidade Federal do Pará - UFPA, o Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, o Laboratório de Energia Solar - LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, a Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS e as Centrais Elétricas do Pará S.A. - CELPA, e instituições internacionais, como o Departamento de Energia dos Estados Unidos - DOE através do Laboratório de Energias Renováveis dos Estados Unidos - NREL, têm despendido esforços conjuntos na inserção de sistemas híbridos em localidades isoladas promovendo a instalação e/ou monitoração de sistemas híbridos no Brasil, além de estudos diversificados (PINHO et al., 2008).

O primeiro sistema híbrido do país corresponde ao sistema eólico-diesel de Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco. A hibridização da geração ocorreu em junho de 1992 com a incorporação de um aerogerador de 75 kW à geração diesel elétrica existente na ilha, cujo projeto foi realizado pelo CBEE-UFPE, com financiamento do Folkecenter (instituto de pesquisas dinamarquês), em parceria com a Companhia Energética de Pernambuco - CELPE. Posteriormente, também com a coordenação do CBEE e com a colaboração do RISØ (Laboratório Nacional de Energia Sustentável da Universidade Técnica da Dinamarca), e financiamento pela ANEEL, em maio de 2000 a geração eólica foi complementada com a implantação de uma segunda turbina eólica de 225 kW. Esses projetos desenvolvidos em Fernando de Noronha tornaram-se o maior sistema híbrido eólico-diesel do Brasil na época (ANEEL, 2002).

Considerando o aproveitamento de sistemas híbridos de geração de energia elétrica de grande porte, o Brasil carece de uma regulamentação específica para estes tipos de projetos, o que dificulta sua inserção na matriz energética. Dessa forma, os projetos são tratados separadamente, devendo estes seguirem as resoluções da ANEEL, as quais estabelecem os requisitos necessários à outorga de autorização. Conseqüentemente, sinergias que poderiam ser melhores aproveitadas, como o efetivo compartilhamento da infraestrutura, agilidade na

aquisição de licenças e autorizações e o aproveitamento da complementariedade energética, acabam sendo não exploradas por inexistência de arcabouço regulatório próprio. Pelo tratamento distinto entre as fontes, projetos híbridos esbarram em burocracias, como a necessidade de criação de empresas distintas, que geram custos contábeis e fiscais, impossibilidade de compensação energética entre fontes distintas no âmbito de projetos regulados, ausência de um processo único de licenciamento ambiental, impossibilidade de parecer de conexão unificado junto às distribuidoras e/ou Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, dentre outras.

Os sistemas de energia híbrida podem aproveitar a infraestrutura de energia existente e ampliar as possibilidades de geração de eletricidade. A legislação do sistema elétrico poderá ser alterada para permitir que as chamadas usinas híbridas com fontes renováveis sejam inseridas no rol das que podem fazer parte dos leilões de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). A medida está prevista em um Projeto de Lei do Senado (PLS Nº 107/2017) e encontra-se em tramitação junto a Secretaria de Apoio à Comissão de Serviços de Infraestrutura do Ministério de Minas e Energia. As mudanças contidas no PLS 107/2017 alteram o dispositivo da Lei de Comercialização de Energia Elétrica (Lei 10.848/2004) para incluir, no ambiente de contratação regulada, processos licitatórios de energia elétrica produzida em empreendimentos híbridos.

Resultante da Audiência Pública AP 046/2017, cujo objeto foi a obtenção de subsídios para a elaboração da agenda regulatória da Aneel para o biênio 2018-2019, foi indicado na atividade regulatória Nº 15 a realização de uma consulta pública para verificar os detalhamentos e as adequações regulatórias decorrentes das implantações de usinas híbridas. Sob a responsabilidade da Superintendência de Regulação dos Serviços de Geração – SRG, a consulta pública está prevista para ocorrer no segundo o 2º semestre do ano de 2018, (ANEEL, 2017).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 OBTENÇÃO DOS DADOS E PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os dados de vento utilizados no estudo foram de uma torre anemométrica treliçada de seção triangular com 102 m de altura. Para a aquisição da componente vertical da velocidade do vento, a torre estava instrumentada com anemômetros de copo classe I, modelo 4.3351.00.000 First Class “Advanced” do fabricante Thies Clima e a medição da velocidade ocorria em 3 níveis de altura (102 m, 100 m e 50m). Os anemômetros utilizados possuíam calibração conforme o padrão MEASNET. A medição da direção do vento ocorreu com sensores de direção do modelo S21210 do fabricante Thies Clima nas alturas de 100 e 50 metros. Para a medição da pressão atmosférica local a torre estava equipada com o Barômetro AB 60 modelo S31100 instalado a 99 m de altura. A umidade e temperatura ambiente foi medida a 99 m de altura utilizando o termohigrômetro modelo P6312 do fabricante Galltec. A aquisição e armazenamento dos dados foi realizada através do registrador de dados (datalogger) Meteo 32 do fabricante Ammonit.

Os dados da irradiância global horizontal obtidos para o estudo foram de uma estação solarimétrica localizada a 10,5 km de distância do local onde foi realizado a campanha de medição de vento. A radiação solar global instantânea no plano horizontal foi medida redundantemente através de dois piranômetros “first class” do fabricante Hukseflux modelo SR 11. A estação de medição realizava os registros da temperatura e umidade relativa do ar através do termohigrômetro da empresa Dualbase modelo SDITH-01. Os parâmetros de velocidade de vento e respectiva direção estavam sendo medidos a 5 m de altura através do sensor de direção acoplado juntamente ao anemômetro de copo do fabricante Campbell Scientific modelo 034B. O datalogger aplicado na estação solarimétrica também era do fabricante Campbell Scientific cujo modelo utilizado foi CR 300.

Ambas as estações de medição são de prospecção de potencial energético. O registro dos dados de medição das estações ocorre a cada segundo (frequência de 1Hz) sendo integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos. A referência horária das estações anemométrica e solarimétrica são referenciadas à UTC-3 (Tempo Universal Coordenado menos 3 horas).

Conforme a metodologia utilizada, para a simulação da produção de energia, deve-se assumir a independência entre a produção de energia de cada fonte e assim a produção total é obtida através da soma simples a cada 10 minutos das produções individuais de energia.

Para a análise da geração advinda do processo de hibridização entre uma usina eólica e uma usina solar fotovoltaica, parte-se da premissa que a usina eólica é existente, ou seja, encontra-se em operação comercial e que será agregado à sua geração a energia proveniente da usina solar. Deste modo, ambas as usinas estariam conectadas à mesma subestação/sistema de transmissão com capacidade de escoamento equivalente à potência instalada da usina eólica e a inserção da geração fotovoltaica somente será possível nos momentos de calma dos ventos, momentos estes em que ocorre a ociosidade da geração eólica. A sobreposição da geração não deve exceder o limite de escoamento do sistema e caso ocorra haverá a necessidade de realizar o contingenciamento da geração de energia. A ação a se tomar neste caso é de realizar o corte sobre a geração de energia oriunda da usina fotovoltaica. No estudo, entende-se como “corte”, o montante de energia fotovoltaica gerada e não aproveitada em decorrência da limitação do sistema de transmissão ou distribuição de energia.

No estudo foi realizada a simulação da produção de energia de um parque eólico com capacidade instalada de 30 MW integrado a duas possíveis configurações de plantas solares: uma com estrutura fixa e a outra com sistema de rastreamento em um eixo. Procurou-se avaliar no estudo, o montante de energia fotovoltaica cortada nas respectivas proporções de potência fotovoltaica simulada em blocos de 1 MW de potência até o limite 10 MW.

Com relação aos dados disponíveis para o estudo, quanto ao período avaliado, considerou-se para o local escolhido a geração ao longo de doze meses, não sendo exatamente no mesmo ano de calendário devido a dificuldade em se obter dados anemométricos e solarimétricos adjuntos e simultâneos. Dessa maneira, não está sendo contemplado no estudo a variabilidade interanual dos recursos.

Não está sendo avaliado no estudo os impactos na geração quanto a perdas por sombreamento dos aerogeradores sobre os painéis solares. Entende-se que a área disponível é suficientemente extensa para comportar o arranjo solar e eólico sem que tal efeito ocorra.

3.2 PREVISÃO DE GERAÇÃO SOLAR

Para a simulação da geração fotovoltaica, utilizou-se a composição de uma usina padrão formada por unidades geradoras com um inversor de 1 MW de capacidade nominal do fabricante ABB, modelo ULTRA-1100-TL-OUTD-4-US-690, e 1,054 MWp de módulos fotovoltaicos, dispostos em um arranjo de 19 módulos em série, com 168 séries em paralelo. Os módulos selecionados possuem potência nominal de 330 Wp, formado por 72 células de silício policristalino do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U-330P.

Na avaliação da produção anual de energia solar fotovoltaica foi utilizado o software SAM (System Advisor Model), que apresenta os custos e o desempenho de projetos de energia renovável usando modelos desenvolvidos pelo NREL (National Renewable Energy Laboratories), órgão vinculado ao Departamento de Energia dos Estados Unidos. A vantagem da aplicação deste software para a avaliação do recurso solar é a possibilidade de inserir variáveis de entrada numa resolução temporal menor que 1 hora, pois os dados de irradiância global horizontal (GHI), obtidos para o estudo, são apresentados a cada 10 minutos por se tratar de uma estação solarimétrica de prospecção de potencial solar. Ocorre que para o atendimento aos requisitos normativos, as estações solarimétricas devem medir no mínimo a irradiância global horizontal e a frequência de medição dos parâmetros meteorológicos deve ser realizada a cada segundo e integralizada a cada dez minutos (EPE, 2017b).

Para a estimativa da produção de energia solar fotovoltaica é necessário que se possua, além da irradiação global, dados da irradiação direta ou difusa para processar o modelo do *software* SAM. Sabendo que a irradiância global horizontal é igual a soma da irradiância direta com a irradiância difusa e como na estação de medição existe somente observações da irradiância global medida na superfície horizontal foi necessário prever pelo menos uma das demais componentes da radiação solar incidente. Optou-se pela estimativa da componente difusa devido a abordagem expressa na literatura consultada.

A estimativa da componente difusa pode ser realizada através de dois tipos de modelos de previsão: os modelos de decomposição (ou estatísticos) e os modelos paramétricos. Os modelos de decomposição são representados por equações matemáticas ajustadas por meio de regressão linear ou polinomial em correlações que relacionam as frações radiométricas, a partir de uma base de dados de medição dos parâmetros de radiação solar, ou do número de horas de brilho solar. Já os modelos

paramétricos necessitam de informações mais detalhadas das condições atmosféricas locais como: turbidez atmosférica, vapor de água, concentração de ozônio, aerossóis entre outros, sendo considerados mais complexos.

Geralmente os modelos de decomposição são baseados em correlações empiricamente determinadas entre o índice de clareza atmosférico K_t (razão entre radiação global e a do topo da atmosfera ou também denominada como radiação extraterrestre) e as frações da radiação difusa e direta. A influência de outras variáveis preditoras de caráter climático ou geométrico também podem ser consideradas nos modelos a fim de atenuar os erros das correlações. Os modelos de decomposição precursores são: o de Angstrom (1924), o qual relaciona a fração da radiação global que atinge a superfície terrestre com a razão de insolação (número de horas de brilho e fotoperíodo) e utiliza a medida do número de horas de brilho solar para estimar a radiação global, e o de Liu e Jordan (1960), que relaciona a razão das radiações difusa e global ou a direta na horizontal e a global por meio dos índices radiométricos K_d (índice de claridade atmosférica diário da componente difusa) e K_{bh} (índice de claridade atmosférica diário da componente direta na horizontal) em função de K_t e utiliza a medição da radiação global para estimar as radiações difusa ou a direta na horizontal.

Deve-se observar que as equações encontradas na literatura para os índices radiométricos utilizados nas correlações são formuladas para diferentes períodos de tempo nas partições horária, diária e mensal e em várias orientações de superfície.

Como a base dos dados de medição utilizada no estudo é de 10 em 10 minutos, o primeiro passo foi a obtenção de uma correlação na escala horária para prever a irradiância difusa horizontal. Deste modo, a irradiância difusa horizontal foi estimada por meio da Correlação de Erbs, que utiliza o índice de claridade atmosférica (K_t) a cada instante para fornecer a partir da irradiância global horizontal medida uma estimativa da irradiância difusa. Na escala horária o índice de claridade atmosférica é denominado como M_t , conforme é sugerido por Iqbal (1983) por ser similar à relação diária. O índice de claridade atmosférica foi obtido através da relação entre a irradiação global e a irradiação no topo da atmosfera.

A correlação de Erbs é representada pela Equação 1 (ERBS, KLEIN e DUFFIE, 1982):

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09M_t & \text{para } M_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604M_t + 4,388M_t^2 - 16,638M_t^3 + 12,336M_t^4 & \text{para } 0,22 < M_t \leq 0,80 \\ 0,165 & \text{para } M_t > 0,80 \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- M_t : Índice de claridade atmosférica (adimensional);
 I_d : Irradiação difusa horária incidente em uma superfície horizontal (kJm-2h-1);
 I : Irradiação global horária incidente em uma superfície horizontal (kJm-2h-1).

O índice de claridade atmosférica, Equação 2, foi obtido através da relação entre a irradiação global e a irradiação no topo da atmosfera (IQBAL, 1983):

$$M_t = \frac{I}{I_o} \quad (2)$$

Em que:

- I : Irradiação global horária incidente em uma superfície horizontal (kJm-2h-1);
 I_o : Irradiação extraterrestre horária incidente em uma superfície horizontal (kJm-2h-1).

A Irradiação Extraterrestre horária na superfície horizontal no período horário é dada pela Equação 3 (IQBAL, 1983):

$$I_o = I_{sc} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \text{ Wm}^{-2} \quad (3)$$

Onde:

- I_{sc} : Constante Solar (1.367 Wm⁻²);
 E_o : Fator de correção de excentricidade da órbita da terra (adimensional);
 δ : Declinação Solar, posição angular do Sol ao meio dia solar (quando o Sol está sobre o meridiano local) com relação ao plano do Equador, norte positivo. $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$;
 ϕ : Latitude Local, posição angular norte ou sul em relação ao Equador, norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ (°);
 ω : Ângulo horário do sol ou hora angular, cada hora solar (hs) corresponde a um deslocamento de 15°/hora. Por convenção, nesta equação adota-se valores negativos para o período da manhã, positivos para o período da tarde e zero ao meio dia solar, $[\omega = (hs-12)15^\circ]$ (°).

Uma equação simples com precisão adequada para a maioria dos cálculos de engenharia é dada pela Equação 4 para encontrar o fator de correção de excentricidade da órbita da terra (DUFFIE e BECKMAN, 2013):

$$E_o = \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (^\circ) \quad (4)$$

Em que:

n: número do dia do ano independente dos meses, varia de 1 de 1º de janeiro a 365 de 31 de dezembro. Assume-se sempre fevereiro tendo 28 dias.

Como citado por Iqbal (1983), Spencer (1971) fornece a Equação 5, mais precisa ($\pm 0,01\%$):

$$E_o = 1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + \\ + 0,000719 \cos 2B + + 0,000077 \sin 2B \quad (5)$$

Onde:

B: Ângulo do dia ($^\circ$)

O ângulo do dia é representado na Equação 6:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (^\circ) \quad (6)$$

A declinação solar (δ), Equação 7, pode ser encontrada a partir da equação aproximada de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (^\circ) \quad (7)$$

Porém outras expressões que fornecem valores mais aproximados para a declinação solar com vários graus de precisão foram desenvolvidas por vários outros autores. A equação de Spencer (1971) é mais precisa e apresenta um erro $<0.035^\circ$ como citado por Duffie e Beckman (2013) e Iqbal (1983) conforme a Equação 8:

$$\delta = (180/\pi)(0,006918 - 0,399912 \cos B + \\ + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + \\ + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \quad (8)$$

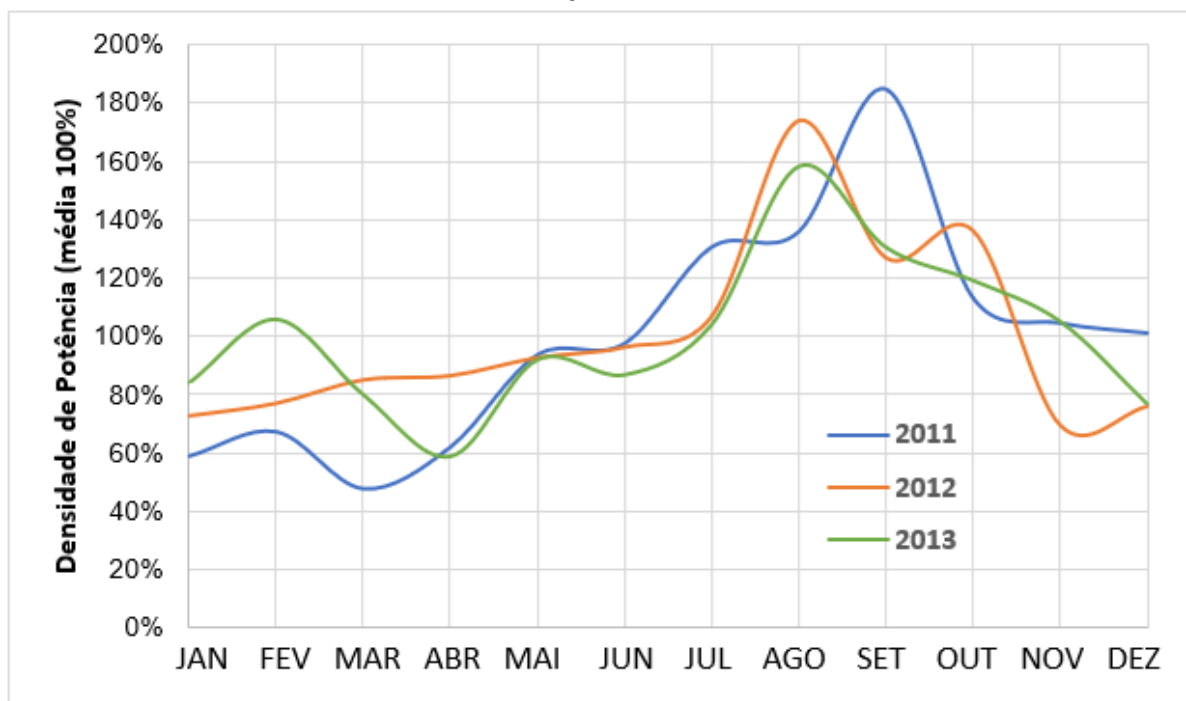
3.3 PREVISÃO DE GERAÇÃO EÓLICA

O estudo utilizou medições anemométricas certificadas de uma série histórica de 36 meses entre o período de 01/01/2011 a 31/12/2013.

O Gráfico 1 – Índice histórico da densidade de potência dos ventos do local apresenta o perfil sazonal da densidade de potência dos ventos no local de estudo a

100m de altura no decorrer do histórico disponível, onde o valor 100% corresponde à média de cada ano:

Gráfico 1 – Índice histórico da densidade de potência dos ventos do local



Fonte: Autoria própria

O coeficiente de variação da densidade de potência do vento é dado em W/m^2 pela Equação 9:

$$D_p = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (Wm^{-2}) \quad (9)$$

Onde:

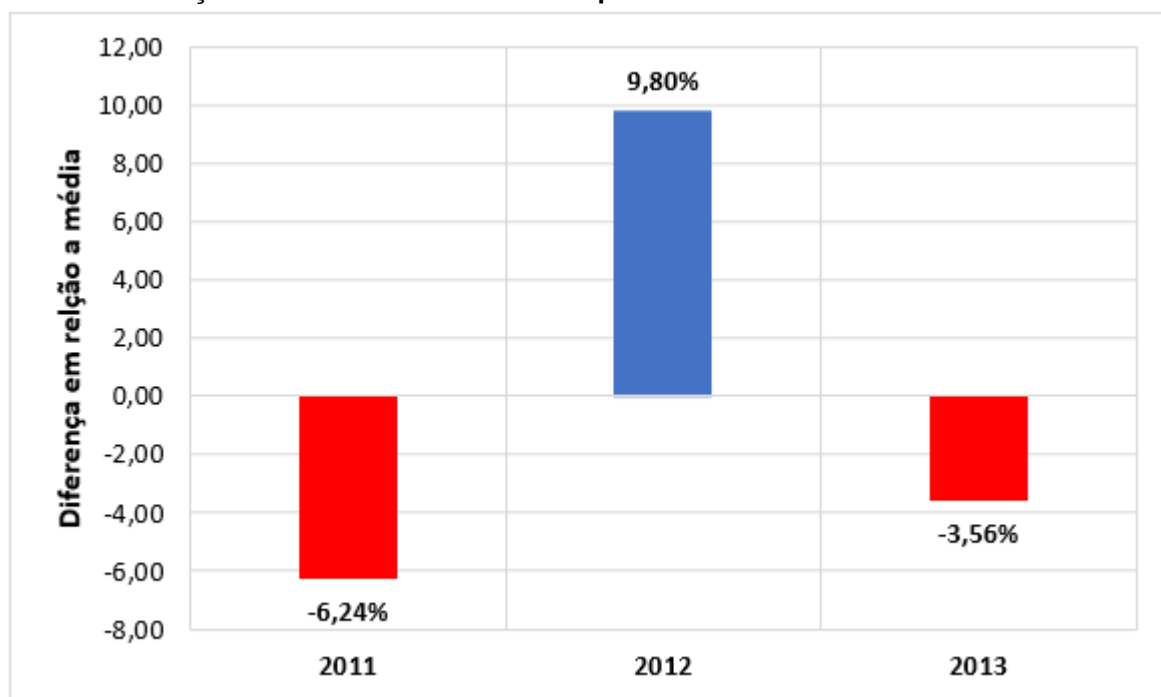
- D_p : Densidade de Potência (Wm^{-2});
- ρ : Densidade do ar no local do projeto (kgm^{-3});
- V : Velocidade na altura do rotor do aerogerador (ms^{-1}).

Pode-se verificar de acordo com a série de dados do período disponível, que a ocorrência dos ventos mais intensos ocorre a partir do mês de junho (começo do inverno) e estende-se até o mês de novembro.

O ano de 2011, como observado no curto intervalo histórico disponível no Gráfico 2, foi o mais desfavorável para a geração eólica. De 2011 para 2012 a densidade de potência anual média no local de estudo aumentou de um mínimo de

447 Wm⁻² para um máximo de 523 Wm⁻² e no ano seguinte de 2013 reduziu-se para 459 Wm⁻².

Gráfico 2 - Variação interanual da densidade de potência

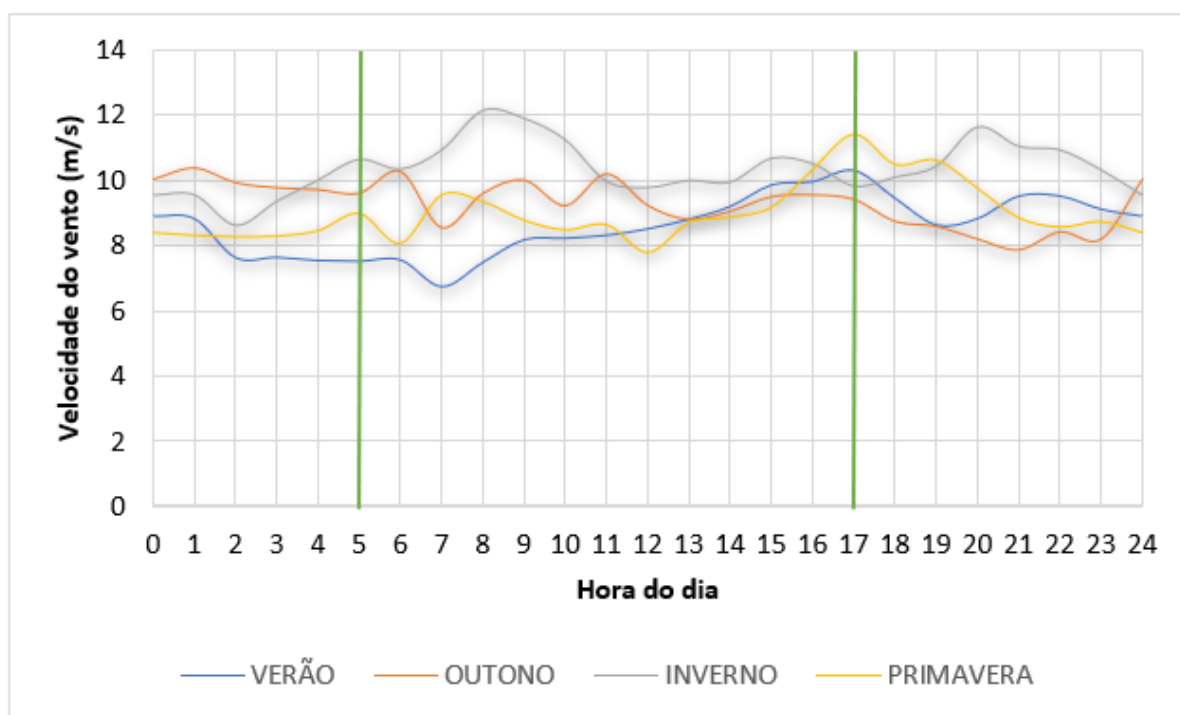


Fonte: Autoria própria

Deste modo, escolheu-se a base de dados do ano de 2012 para prever a geração eólica por considerar ser a mais representativa para avaliar os efeitos advindos da hibridização da geração de energia.

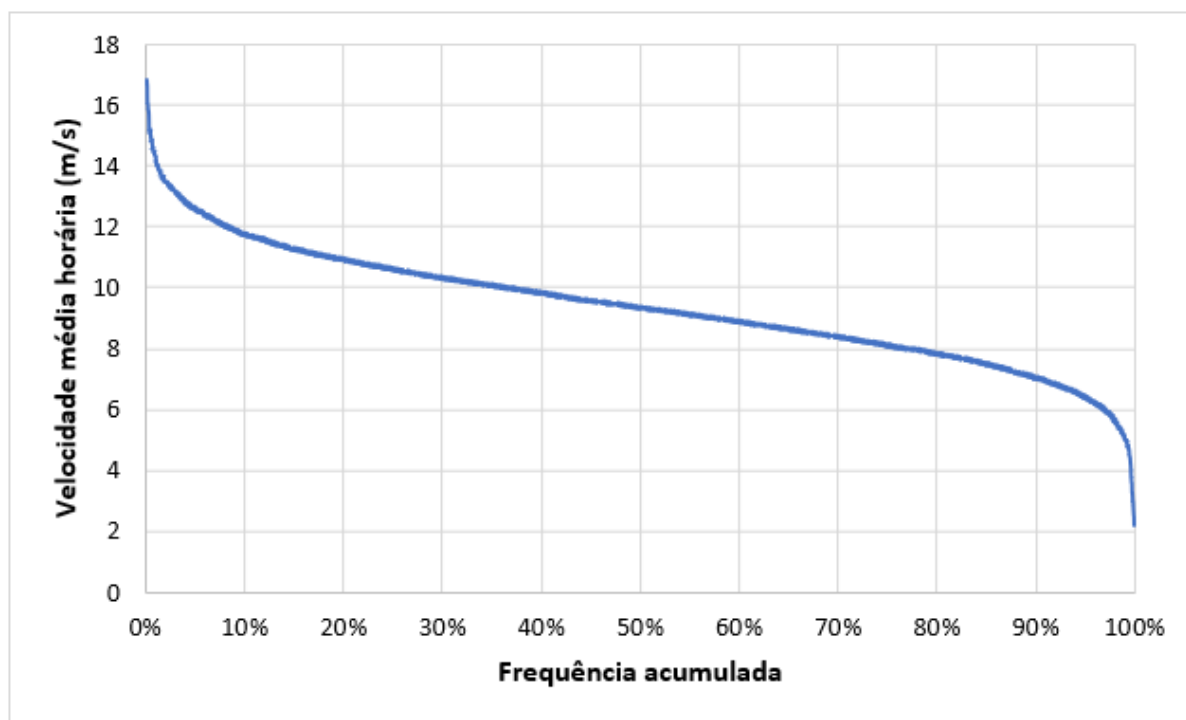
Ao analisar os perfis horários da velocidade do vento num determinado dia do mês ao longo do ano de 2012 (dia 15 de cada mês), constata-se que os melhores ventos nas estações de primavera e verão ocorrem no final da tarde, sendo que no outono e inverno ocorrem no início da manhã e também nas madrugadas do outono e nas noites do inverno como pode ser verificado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Perfis horários da velocidade do vento para as estações do ano



Fonte: Autoria própria

O período de interação entre a geração de energia elétrica resultante da fonte eólica e solar, no local de estudo, ocorre no horário compreendido entre as 5h:00 da manhã até as 17h:00 da tarde. Ao analisar a combinação da geração das fontes eólica e solar é relevante conhecer também a permanência da velocidade dos ventos no local de estudo além dos perfis horários da velocidade. O Gráfico 4 apresenta a permanência da velocidade dos ventos para o período de interação entre as fontes de geração. Verifica-se que no local do estudo, por exemplo, que em 36% do período observado, a velocidade média do vento é maior ou igual a 10 m/s.

Gráfico 4 - Permanência da velocidade média do vento

Fonte: Autoria própria

Seguindo a metodologia de simulação para a geração eólica descrita por EPE (2016), a partir das médias de 10 minutos da velocidade do vento e demais parâmetros climáticos de interesse medidos na estação anemométrica do parque eólico simulado, e interpolando os valores da velocidade do vento com base na curva de potência do modelo do aerogerador escolhido para o estudo (utilizando os dados da densidade do ar ajustada para o local do estudo), estima-se a geração de um único aerogerador posicionado no local da estação de medição. Admite-se que a geração calculada desta forma e escalonada pelo número de máquinas instaladas representa a geração de todo o parque eólico. Devido a modelagem ser simplificada e pelo fato de que nem todas as máquinas do parque eólico observam o mesmo vento registrado na torre de medição, é recomendado atribuir um fator de redução na geração mensal de energia de 10% com o intuito de caracterizar as perdas elétricas, indisponibilidades forçadas e programadas e interferência aerodinâmica entre turbinas (EPE, 2013).

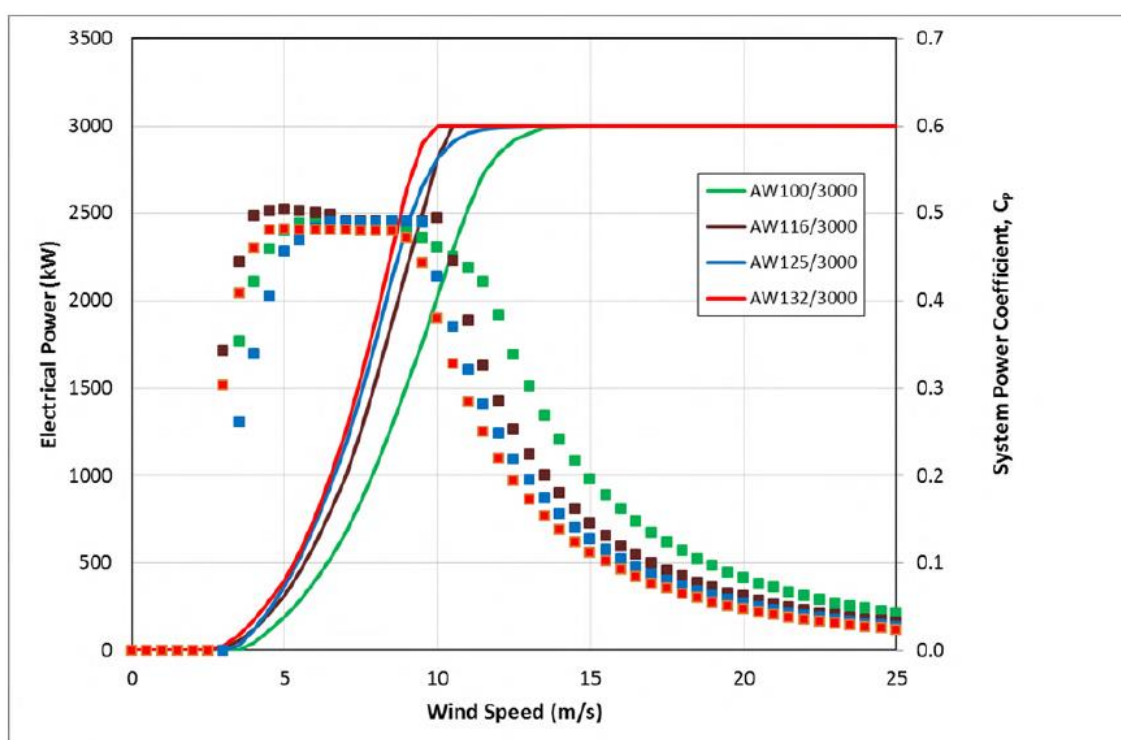
De acordo com os dados estatísticos das simulações da geração eólica na região nordeste do país, verificou-se, ao comparar os resultados das simulações com os dados de produção de energia elétrica dos parques eólicos em operação comercial da região, que as perdas a serem consideradas em torno de 2% a 4%, é o mais próximo da realidade. No entanto, o ajuste pelo desconto considerado a título de

perdas da energia produzida em um mês acaba por reduzir a geração máxima instantânea simulada para compensar registros errôneos, limitações de potência ou indisponibilidades forçadas ou programadas que ocorrem na operação de um parque eólico (EPE, 2016). De igual modo como na referência citada, devido a consideração desta situação, optou-se por não levar em conta qualquer perda de energia nas simulações realizadas do estudo.

Para o cálculo da produção de energia eólica foi escolhido o aerogerador do fabricante Acciona modelo AW116/3000 (altura do eixo do rotor a 100 metros e 116 metros de diâmetro de rotor) com potência nominal de 3 MW. Os dados de vento utilizados na simulação, foram os do anemômetro intermediário de 100 m por se encontrar na mesma altura do rotor do aerogerador, não sendo necessário desta forma realizar nenhuma extrapolação vertical para se determinar a velocidade de vento.

As curvas de potência e as curvas do coeficiente de potência (C_p) para as turbinas da plataforma AW3000 (potência nominal de geração de 3 MW) são apresentadas na Figura 2:

Figura 2 - Curva e coeficiente de potência dos modelos dos aerogeradores da plataforma AW3000 do fabricante Acciona



Fonte: Garrad Hassan America, INC (2015)

As curvas de desempenho dos aerogeradores são calculadas e garantidas pelos fabricantes sendo baseadas em um cálculo teórico, e verificadas com medições de terceiros independentes realizadas de acordo com a norma IEC61400-12-1 (GARRAD HASSAN AMERICA, 2015). As turbinas da plataforma AW3000 aparentam ter bom desempenho pelos elevados valores dos coeficientes de potência apresentados, na ordem de 0,5 para uma ampla faixa de velocidades do vento.

De acordo com a curva de potência do aerogerador escolhido para o estudo, a velocidade inicial de operação (velocidade de acionamento ou cut in) está em torno de 3 a 3,5 m/s e atinge a potência nominal de operação, a partir de 10,5 m/s para a densidade padrão do ar de $1,225 \text{ kgm}^{-3}$.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A produção anual de energia fotovoltaica simulada para a usina padrão de 1,054 MW para as duas configurações de planta solar (estrutura fixa e rastreamento de um eixo) pode ser visualizada na Tabela 1, juntamente com os índices de produtividade, desempenho e fator de capacidade:

Tabela 1 - Produção anual de energia fotovoltaica com estrutura fixa e com rastreamento para a usina padrão de 1,054 MW

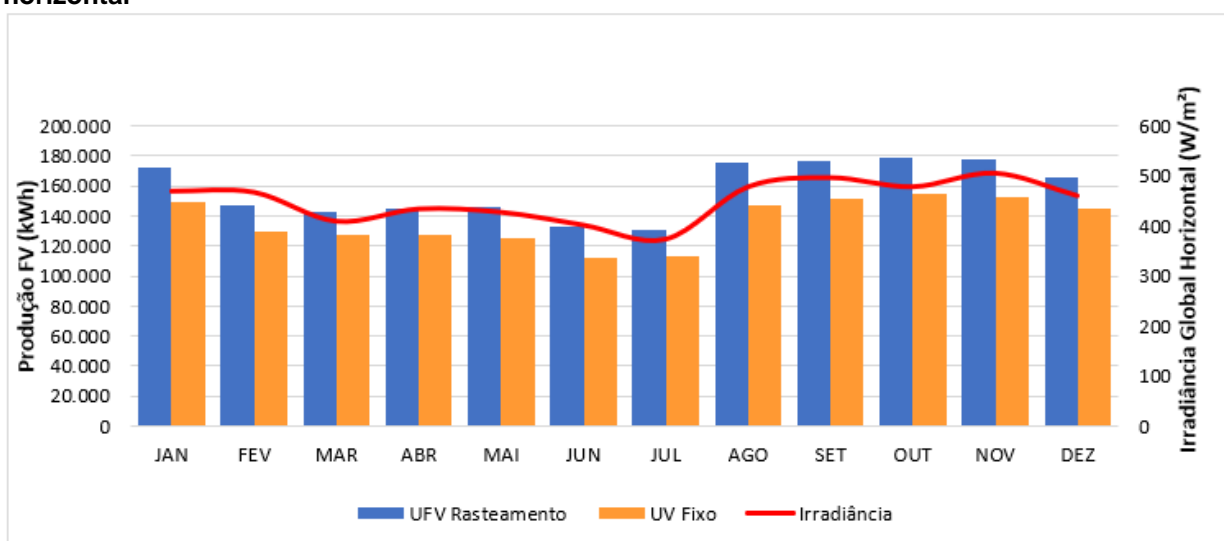
	Estrutura Fixa	Rastreamento
Produção Anual de Energia [kWh]	1.637.736	1.891.610
Fator de Capacidade [%]	17,74	20,49
Produtividade (<i>yield</i>) [kWh/kW]	1.554	1.795
Taxa de Desempenho (<i>PR</i>) [%]	79	80

Fonte: Resultado de simulação apresentado pelo software SAM/NREL (2018)

Verifica-se que a produção anual de energia utilizando o sistema de rastreamento é 15,5% superior ao sistema de estrutura fixa o que pode impactar nos cortes de energia devido ao limite de escoamento do sistema de transmissão.

O Gráfico 5 demonstra a variação da produção mensal de energia fotovoltaica simulada para a estrutura fixa e para o sistema de rastreamento de 1 eixo e a irradiância média mensal medida na região do estudo ao longo do ano.

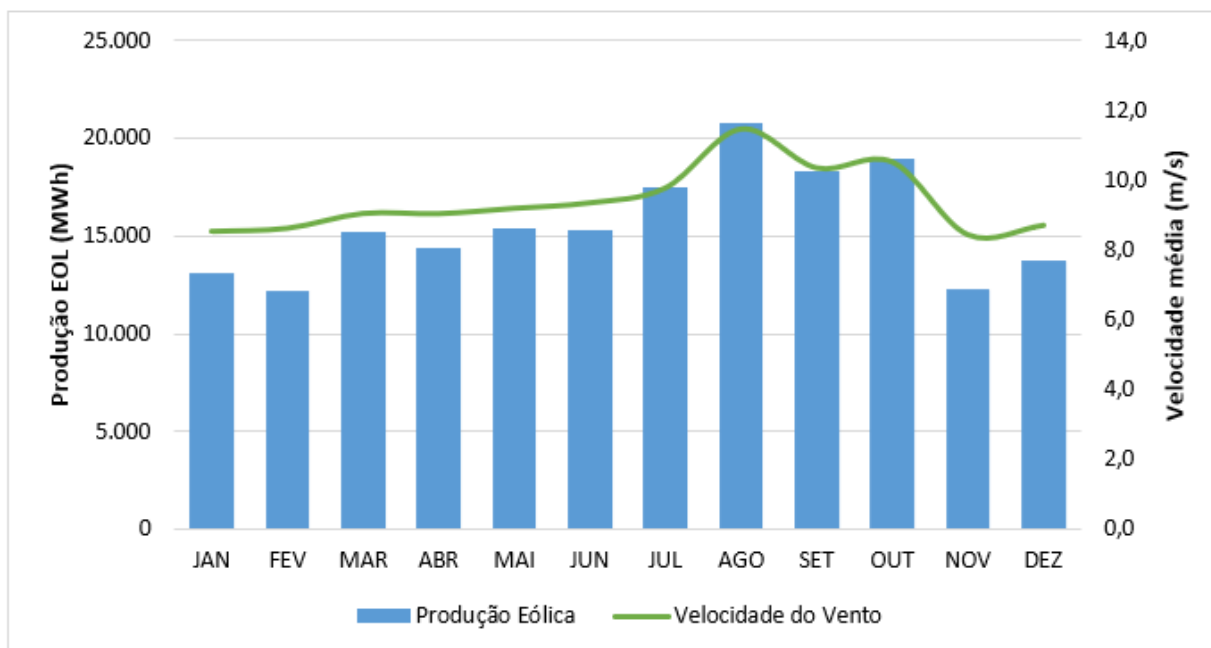
Gráfico 5 - Variação da produção mensal de energia fotovoltaica e média da irradiância global horizontal



Fonte: Resultado da simulação apresentado pelo software SAM/NREL (2018)

A produção anual de energia eólica simulada para o parque eólico de capacidade instalada de 30 MW foi de 187.432 MWh. A produção mensal de energia eólica é apresentada no Gráfico 6:

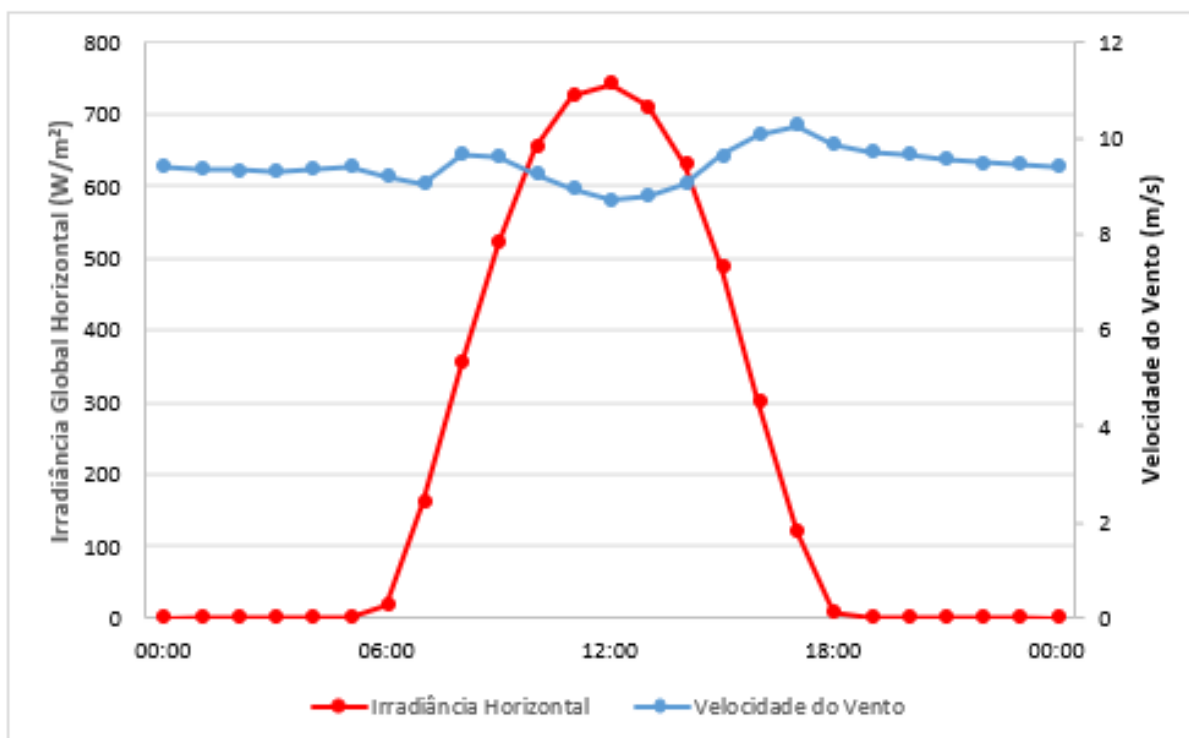
Gráfico 6 - Produção mensal de energia eólica e média da velocidade do vento na altura de 100 m



Fonte: Autoria própria

O comportamento da radiação solar ao longo do dia segue um padrão razoavelmente previsível, iniciando no início da manhã com valores discretos, atingindo um máximo próximo ao meio-dia e decrescendo até o pôr-do-sol. Em contrapartida, o comportamento do recurso eólico é menos previsível, devido à variação natural da velocidade dos ventos. O perfil horário da velocidade do vento no local bem como o de irradiação global horizontal pode ser observado no Gráfico 7:

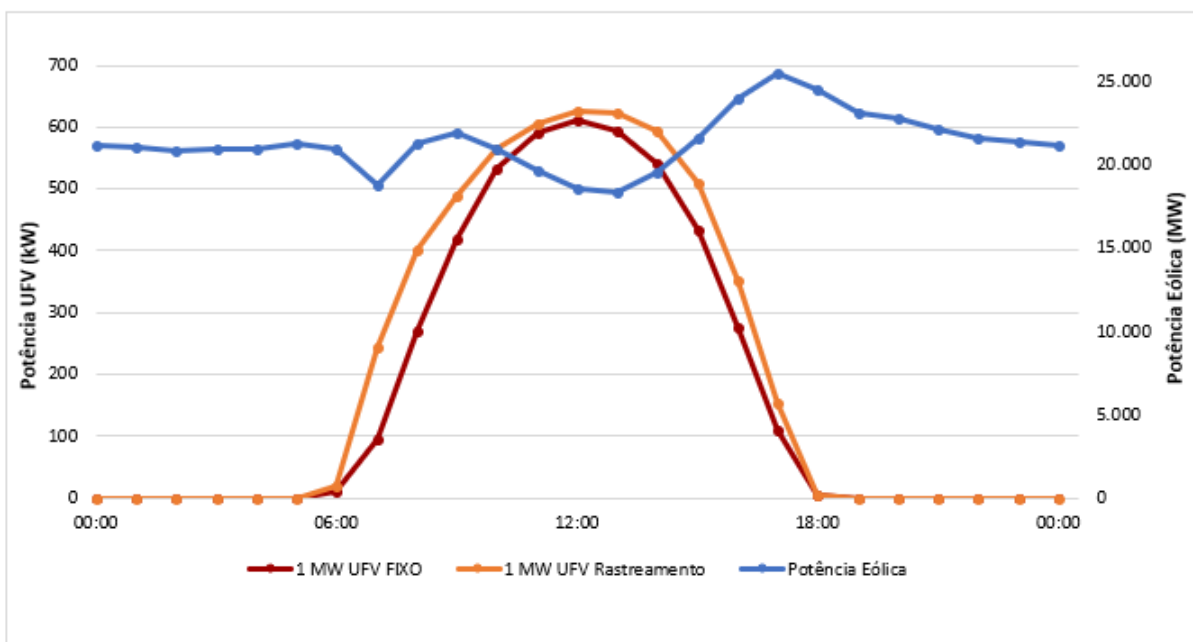
Gráfico 7 - Perfil horário médio da velocidade do vento e da irradiação global horizontal



Fonte: Autoria própria

Para o local de estudo, verifica-se que a complementariedade energética entre as fontes eólica e solar ocorre coincidentemente no período de maior radiação solar do dia e de menores velocidades de vento. Esta característica do perfil da velocidade de vento e de irradiação solar do local, poderá conferir ao sistema híbrido um maior nível de complementariedade entre as fontes e continuidade no que se refere à geração de energia elétrica já que toda produção excedente proveniente da hibridização acima do limite de escoamento do sistema não poderá ser aproveitada devido à necessidade do corte sobre a fonte solar.

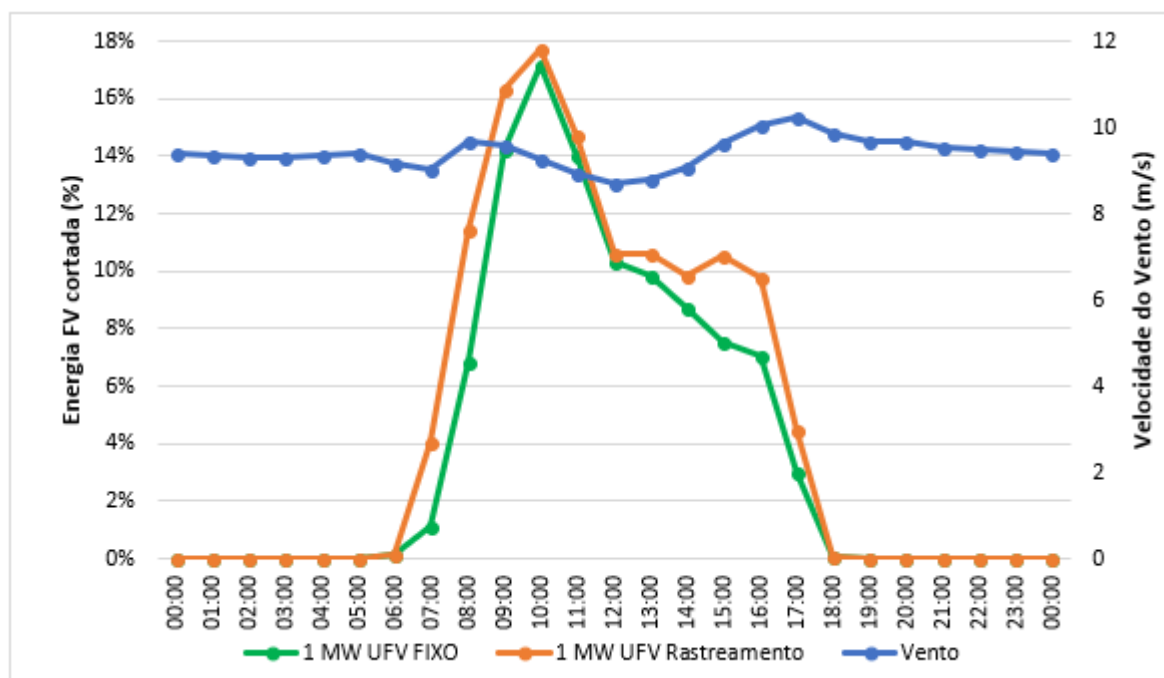
O Gráfico 8 apresenta a média anual da potência de geração eólica e das potências de geração para 1 MWp de capacidade solar instalada para a estrutura fixa e para o sistema de rastreamento de 1 eixo.

Gráfico 8 – Média anual de potência eólica e fotovoltaica

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no Gráfico 8, a estrutura com rastreamento possibilita maior aproveitamento da energia solar, conseqüentemente o percentual de corte será maior em relação a estrutura fixa conforme o Gráfico 9.

Gráfico 9 - Percentual de cortes entre estrutura fixa e com sistema de rastreamento de 1 eixo

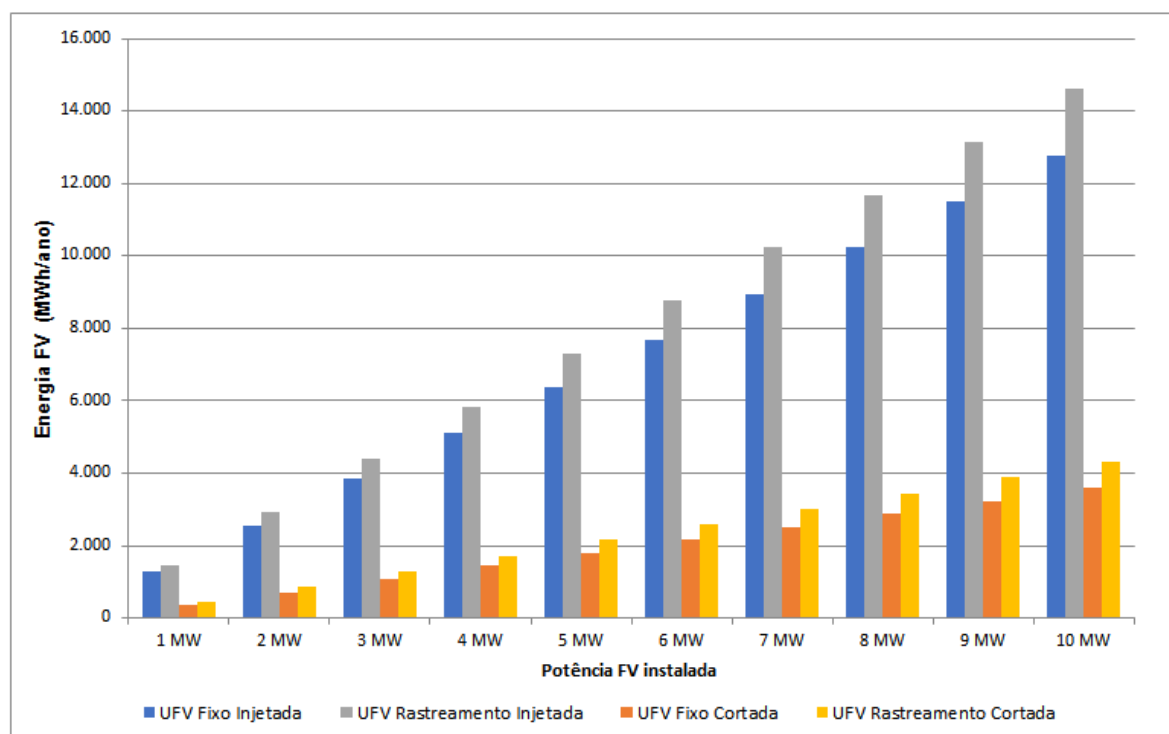


Fonte: Autoria própria

Foi observado que mesmo que a energia líquida injetada na rede (energia solar gerada menos os cortes de energia) ainda que seja superior em 14,32% para o sistema de rastreamento, verifica-se que, devido aos cortes serem mais elevados (19,71% superior) para este tipo de estrutura, os índices de proporção de energia injetada na rede e de corte são praticamente equivalentes para ambas as configurações de plantas solares analisadas. Na fixa consegue-se injetar 78% da energia solar total gerada e a necessidade de corte é de 22%. Já para o sistema de rastreamento de 1 eixo o aproveitamento é de 77% da energia fotovoltaica gerada enquanto que 23% da energia é “desperdiçada”. Os montantes de energia são apresentados no Gráfico 10.

No aspecto da garantia física do parque eólico, pode-se observar que devido a injeção da parcela da geração solar junto a geração eólica pela premissa que o parque eólico se encontra instalado, ocorre um aumento de 0,7% (para a capacidade instalada de 1 MW fotovoltaica) chegando até a 6,8% (para a capacidade instalada de 10 MW fotovoltaica) quando aplicado a estrutura fixa. No rastreamento, o ganho é de 0,8% até 7,8% para 1 MW a 10 MW de potência fotovoltaica instalada respectivamente.

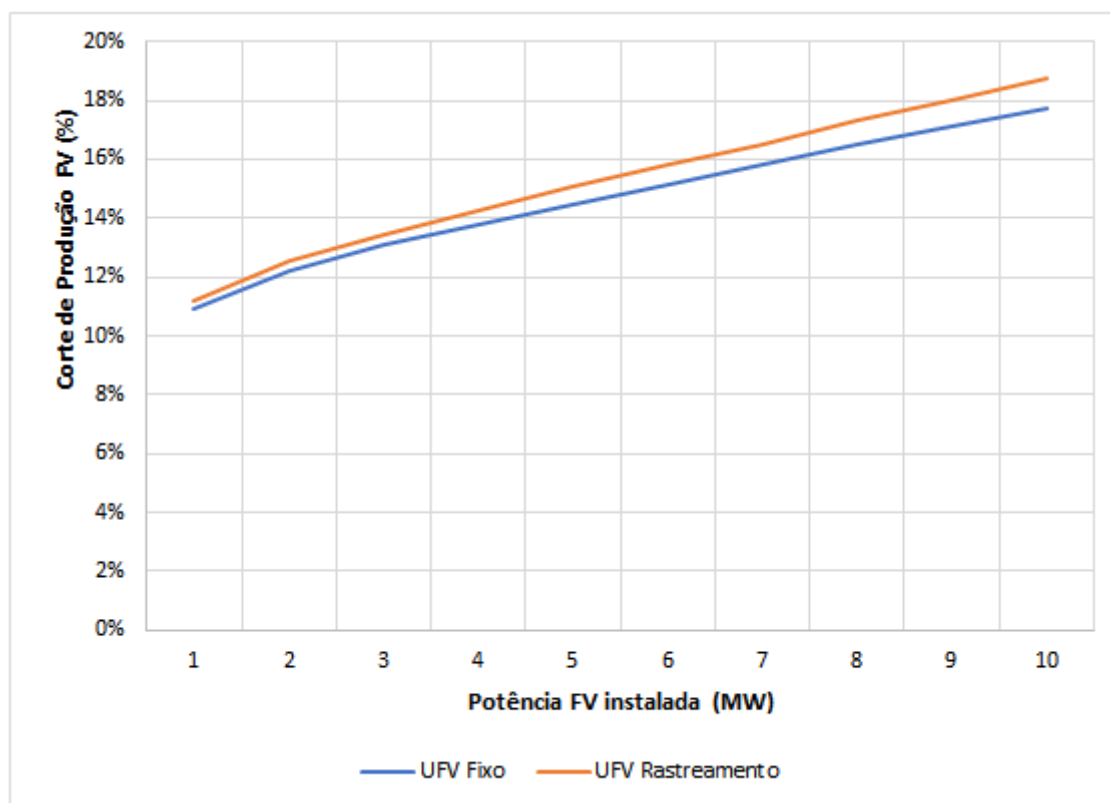
Gráfico 10 - Montantes de energia injetada e cortada da produção fotovoltaica



Fonte: Autoria própria

Constata-se ainda que nos momentos de velocidade de vento mais elevadas, os cortes de energia serão mais acentuados, conforme percebido nos períodos da manhã e final de tarde (Gráfico 9). Logo, percebe-se que o aumento dos cortes de energia causado pelo uso de rastreamento e pelo perfil do vento do local do estudo, é mais dependente das características do vento do que da radiação solar.

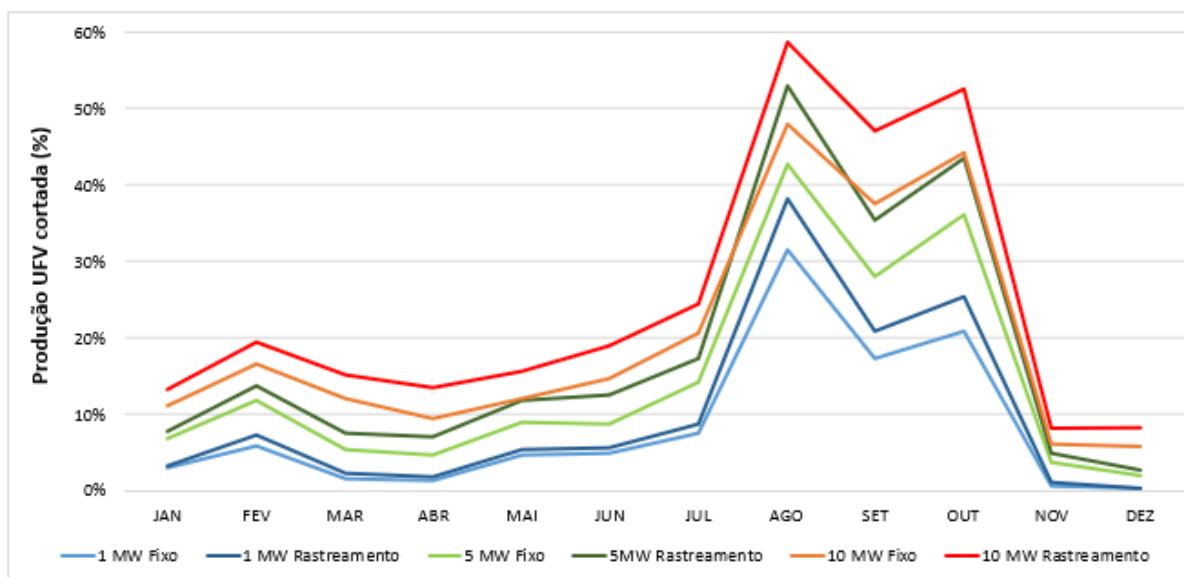
Ao avaliar o impacto das diferentes proporções da potência instalada fotovoltaica agregada a geração eólica, observa-se que o comportamento do corte anual de energia é aproximadamente linear para boa parte da faixa de potências fotovoltaicas analisadas conforme o Gráfico 11.

Gráfico 11 - Corte anual de energia em função da potência fotovoltaica instalada

Fonte: Aatoria própria

Em razão da sazonalidade nos perfis dos recursos, principalmente eólico, é previsto que o corte de energia também tenha esta característica ao longo do ano. Com a finalidade de avaliar esse efeito, realizou a análise dos cortes de energia para a resolução mensal. O Gráfico 12 apresenta, para as respectivas proporções de potência fotovoltaica, o resultado obtido de corte total de energia fotovoltaica a cada mês do período simulado:

Gráfico 12 - Perfil mensal médio dos cortes de energia fotovoltaica

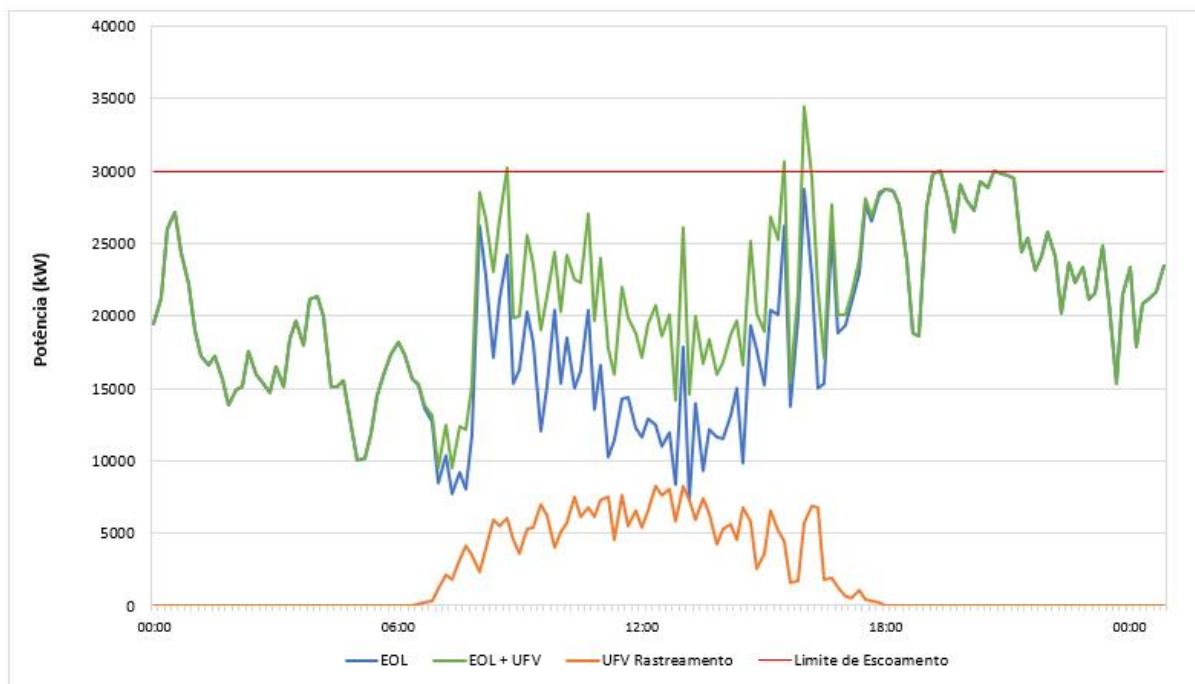


Fonte: Autoria própria

Como esperado, o caráter sazonal nos cortes de energia foi observado e a medida que a potência fotovoltaica se eleva este fato é mais relevante. Para a configuração que apresentou o maior corte (10 MW com o sistema de rastreamento), esta atinge cerca de 60% no mês de agosto, indicando que, neste mês, grande parte da produção fotovoltaica ocorre quando a produção eólica está próxima ao seu limite. Já para o mês de dezembro, esta mesma configuração apresentou perdas um pouco superiores a 8%.

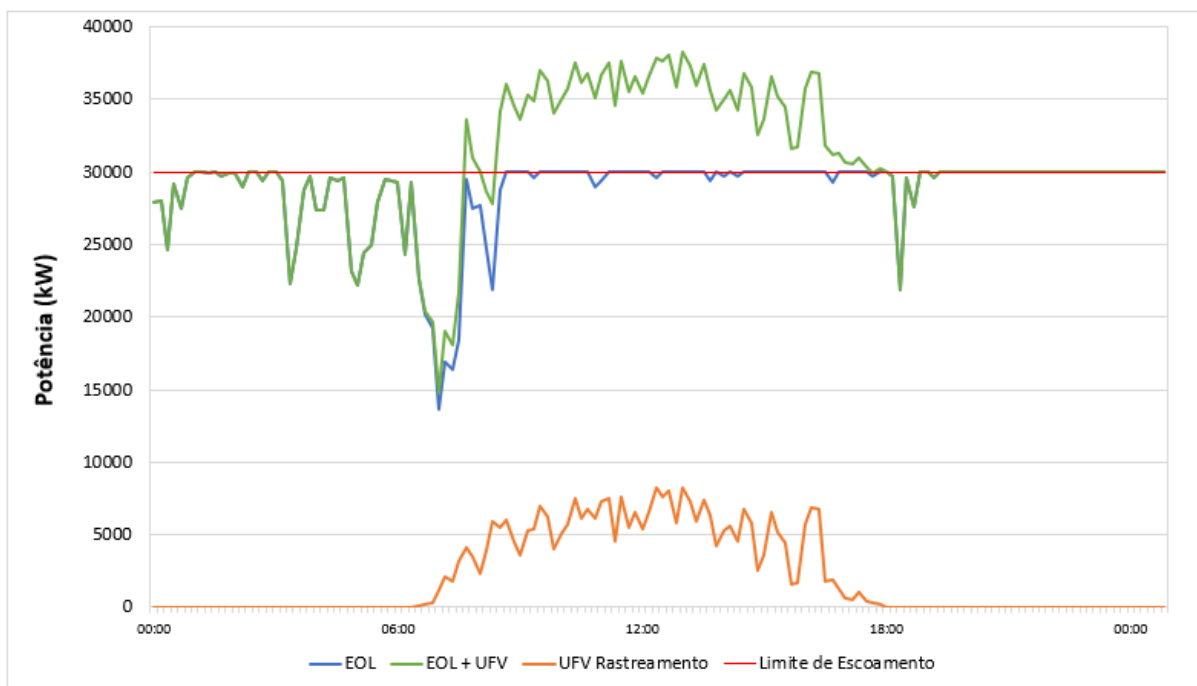
Este resultado pode ser melhor compreendido a partir da visualização da produção em dias específicos, como mostrado no Gráfico 13 e no Gráfico 14, em que são apresentadas respectivamente as produções de energia no local do estudo para um dia de novembro, quando ocorreu menores velocidades de vento, e para um dia de setembro, para o qual o recurso eólico foi mais favorável.

Em dias em que a produção eólica é reduzida, como observado no Gráfico 13, resulta-se na possibilidade de escoar praticamente toda a produção fotovoltaica, somente em curtos períodos a energia proveniente da fonte solar necessita ser cortada.

Gráfico 13 - Produção de energia por fonte e combinada no dia 09 de novembro

Fonte: Autoria própria

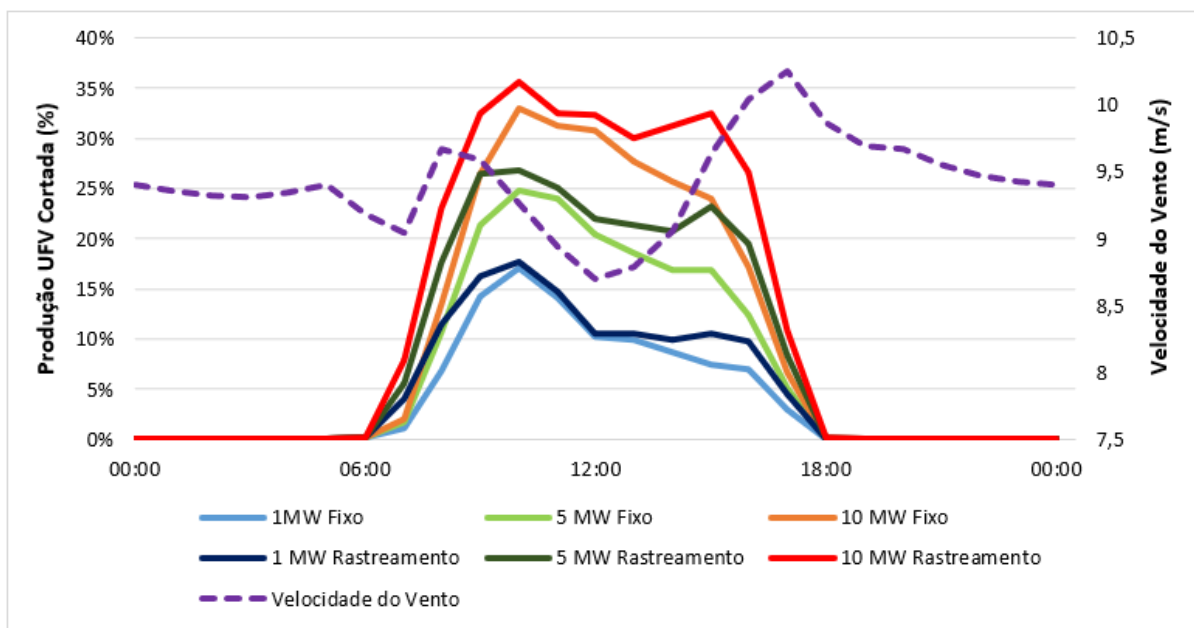
Já para os dias onde a geração eólica opera próxima da sua capacidade nominal, como verificado no Gráfico 14, quase não existe margem para escoar o complemento da produção fotovoltaica. Os escassos momentos de redução da velocidade do vento, não são suficientes para permitir a injeção da energia fotovoltaica disponível.

Gráfico 14 - Produção de energia por fonte e combinada no dia 09 de setembro

Fonte: Autoria própria

No local do estudo, os perfis com velocidades de vento mais elevadas, são comuns no início da manhã e no final da tarde, como pode ser verificado no Gráfico 15. Este aspecto do recurso resulta em um caráter horário para os cortes de energia.

Gráfico 15 - Perfil médio anual dos cortes de energia fotovoltaica em função da hora do dia



Fonte: Autoria própria

O resultado apresentado no Gráfico 15 reflete a condição para o perfil médio anual dos cortes de energia fotovoltaica em função da hora do dia. Ao discriminar o resultado de cada mês, por exemplo, seriam verificados patamares e possivelmente comportamentos horários diferentes para cada período.

5 CONCLUSÃO

A complementariedade energética no tempo entre as fontes eólica e solar, para o local de estudo, pôde ser verificada durante todo o período de análise e acompanha a variação e sazonalidade dos perfis dos recursos energéticos disponíveis.

O que ficou evidenciado no trabalho, para as condições do perfil de vento do local onde foi realizado o estudo, é que os índices de proporção de energia solar injetada na rede e de energia solar cortada ocorrem praticamente na mesma magnitude para ambas as configurações de plantas solares analisadas. A estrutura com rastreamento possibilita maior aproveitamento da energia solar e de acordo com as simulações verificou-se que a disponibilidade de energia líquida é 14,32% superior em relação à estrutura fixa e conseqüentemente o percentual da necessidade de corte de energia eleva-se em 19,71% justificando assim a ocorrência de tal fato observado.

Pode suceder em regiões com condições de vento não tão favoráveis quanto as do Rio Grande do Norte, que os cortes de energia sejam reduzidos para o sistema de rastreamento e assim elevar o nível de aproveitamento da geração solar e ter uma contribuição mais expressiva no aumento da garantia física do parque eólico pela maior potência solar injetada na rede, dado que os cortes de energia são mais dependentes do comportamento do recurso eólico e nos momentos em que a geração eólica opera longe da sua capacidade nominal perde-se menos energia fotovoltaica.

A vantagem em utilizar a estrutura de rastreamento em um sistema híbrido de geração seria devido à redução da área ocupada pela usina solar, o que poderia minimizar algum impacto com relação ao possível sombreamento dos aerogeradores sobre os painéis solares, bem como da potência instalada da planta solar com estrutura de rastreamento em decorrência da sua maior produtividade que de acordo com o arranjo simulado foi 15,5% superior ao sistema fixo.

Ao avaliar o excedente da produção de energia elétrica advinda da hibridização de recursos energéticos com caráter variável e estocástico, como a fonte eólica e fotovoltaica que foram objeto de estudo do trabalho, destaca-se a importância da discretização temporal da base de dados em períodos menor de uma hora. Os eventos aleatórios e variáveis das fontes analisadas são responsáveis pelas oscilações em curtos intervalos de tempo da produção de energia e deve-se atentar

que tais oscilações podem não ser observadas ao se trabalhar num intervalo elevado, por exemplo, médias horárias para as grandezas velocidade de vento e irradiação solar. Mesmo na resolução temporal de 10 minutos dos registros dos dados e representação da produção de energia elétrica, percebe-se que a simulação resulta em atenuação das variações instantâneas, ainda que em menor escala. Com isso, eventuais picos (dentro do intervalo de 10 minutos) de geração fotovoltaica acabam não sendo observados, afetando a quantidade de energia “cortada” e o tempo em que a linha de transmissão/subestação operará no limite de sua capacidade nominal.

Referente aos potenciais benefícios na combinação de fontes de geração pode se destacar o melhor uso da capacidade disponível do sistema de transmissão e/ou distribuição, compartilhamento de equipamentos de geração e do sistema de interesse restrito, a otimização do uso da área disponível, sinergias em operação, em logística, e em planejamento da implantação e redução dos custos do gerador com tarifas de uso da rede.

Uma alternativa que poderá contribuir aos sistemas híbridos de geração de energia elétrica do tipo usina associada, visando o aproveitamento do excedente de energia que não pode ser utilizada, devido à limitação da capacidade de escoamento, é a aplicação de sistemas de armazenamento de grande porte que poderá ser objeto de estudo em trabalhos futuros tanto no âmbito técnico quanto econômico.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Agenda Regulatória 2018/2019**. Brasília, DF, 15 dez. 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/agenda-regulatoria-aneel/-/asset_publisher/yiSkkoNZojPC/content/agenda-regulatoria-2018-2019/660863?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fagenda-regulatoria-aneel%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_yiSkkoNZojPC%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D3>. Acesso em: 03 mar. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 1. ed. Brasília: ANEEL, 2002. p. 153. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informação de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

ANGSTRÖM, A. K. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924 v.50, p. 121–126. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.49705021008>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

BARBOSA, Claudomiro F. O. **Avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na região amazônica**. 2006. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Belém, 2006.

BELUCO, Alexandre; SOUZA, Paulo. K. de; KRENZINGER, Arno. A Complementariedade no Tempo entre as Energias Hidrelétrica e Fotovoltaica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 99-109, Jan/Mar, 2003.

BRASIL. Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002. **Diário Oficial da União**. Poder Legislativo, Brasília, DF, abr. 2002. Edição Extra, Seção 1, p.2.

BRASIL. Resolução Aneel nº 223 de 29 de abril de 2003. **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, Brasília, DF, out. 2004. Seção 1, p.73.

CASA DOS VENTOS. **GE e Casa dos Ventos criam parque eólico híbrido inovador na América Latina**. set. 2017. Disponível em: <<http://casadosventos.com.br/pt/12-cdv-na-midia/213-ge-e-casa-dos-ventos-criam-parque-eolico-hibrido-inovador-na-america-latina>>. Acesso em: em: 2 abr. 2018.

COOPER, P.I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, 1969, v. 12, n. 3, p. 333–346, ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X69900474>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

DUFFIE, John A., BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. New York: Wiley, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas**: Proposta metodológica e estudo de caso. Rio de Janeiro, 24 abr. 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Acesso em: 03 mar. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Empreendimentos fotovoltaicos**: Instruções para solicitação de cadastramento e habilitação técnica nos leilões de energia elétrica. Rio de Janeiro, 24 ago. 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/instrucoes-para-cadastramento>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Acompanhamento de medições anemométricas - AMA**: Caracterização do Recurso eólico e resultados preliminares de sua aplicação no sistema elétrico. Série: Recursos Energéticos, Nota Técnica DEA 15/13. Rio de Janeiro, 24 ago. 2013. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos de planejamento da expansão da geração**: Empreendimentos eólicos. Algumas estatísticas obtidas da simulação da geração eólica na região Nordeste. Rio de Janeiro, 13 dez. 2016. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

ERBER, Pietro; PALHAS, Marco A. Desafios da geração de energia intermitente. **Valor Econômico**, São Paulo 28 abr. 2017. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/opiniaio/4951648/desafios-da-geracao-de-energia-intermitente>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

ERBS, D.G.; KLEIN, S.A.; DUFFIE, John A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, 1982, v. 28, n. 4, p. 293–302, ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X82903024>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

GARRAD HASSAN AMERICA, INC. **Technical Review of the Acciona AW3000 Wind Turbine Platform**. Document N^o.: 702806-TR-AC-30. Seattle, Washington, 19 ago. 2015, v. final n. J. Disponível em: <<https://www.edockets.state.mn.us/EFiling/edockets/searchDocuments.do?method=showPoup&documentId={1DD144F8-89AF-4E43-A91C-D8C136CE777C}&documentTitle=20162-117987-01>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

GENERAL ELETRIC (a). **Hybrid Solutions**. set. 2017. Disponível em: <gepower.com/hybrid>. Acesso em: 2 abr. 2018.

GENERAL ELETRIC (b). **Red Lake Falls - Wind Integrated Solar Energy Solution**. Disponível em: <<https://www.gerenewableenergy.com/stories/red-lake-falls>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

GOVERNO DE PERNAMBUCO. **Sertão de Pernambuco se destaca como primeira região do Brasil a abrigar parque híbrido de energia renovável**. 25 set. 2015. Disponível em: <<http://www.pe.gov.br/blog/2015/09/25/sertao-de-pernambuco-se-destaca-como-primeira-regiao-do-brasil-a-abrigar-parque-hibrido-de-energia-renovavel/>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind 2017 Report**. Belgium, 2017. Disponível em: <<http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2016. In: Parte B. **Special Focus on Renewable Energy**. Paris, 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy Integration in Power Grids: Technology Brief**. Abu Dhabi, 2015. Disponível em: <<http://www.irena.org>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

IQBAL, Muhammad. **An introduction to solar radiation**. 1. ed. New York: Academic Press, 1983.

LEONI, Pedro et al. Projeto híbrido eólico solar: alternativa para aumentar penetração de projetos fotovoltaicos de grande porte. **Revista O Setor Elétrico On-line**, Santa Cecília, São Paulo, ano 12, 134 ed., p. 59-66, mar. 2017. Seção Renováveis: Energias Complementares. ISSN 1983-0912. Disponível em: <https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/edicao_134_final/2?ff=true>. Acesso em: 16 mar. 2018.

LIU, B.Y.H.; JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, 1960, v. 4, n. 3, p. 1–19, ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X60900621>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

LUCIO, Paulo S.; SANTOS, Alexandre T. S.; FERREIRA, Moniki D. de M. Velocidade do Vento. **Revista O Setor Elétrico On-line**, Santa Cecília, São Paulo, ano 12, 138 ed., p. 61-69, jul. 2017. Seção Renováveis: Energias Complementares. ISSN 1983-0912. Disponível em: <https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/edi_o-138/1?ff=true>. Acesso em: 16 mar. 2018.

LAZAROV, Vladimir D. et al. Hybrid Power Systems with Renewable Energy Sources: Types, Structures, Trends for Research and Development. In: International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, 11., 2005, Sofia, Bulgária. **Conference Paper...** Sofia: ELMA, 2005. Não paginado. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/236012467_Hybrid_Power_Systems_with_Renewable_Energy_Sources_-_Types_Structures_Trends_for_Research_and_Development>. Acesso em: 13 mar. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

PERON, Alexandre M. **Análise da Complementaridade das Gerações Intermitentes no Planejamento da Operação Eletro-Energética da Região Nordeste Brasileira**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

PINHO, João T.; BARRETO, Eduardo J. F. (Coord.). **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p. ISBN 978-85-98341-02-6. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2018.

PINTO, Leontina. Novas renováveis o caminho do futuro. In: SEMINÁRIO INSERÇÃO DE NOVAS FONTES RENOVÁVEIS E REDES INTELIGENTES NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NACIONAL, 3. 21 set. 2016, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: UFRJ – Programa de Planejamento Energético. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/pppe/seminario_renovaveis/2016/>. Acesso em: 4 abr. 2018.

PORTAL BRASIL. Brasil aposta em pioneirismo na geração híbrida de energia elétrica. **Ministério de Minas e Energia - MME**, Brasília, 09 mar. 2016. Infraestrutura. Disponível em: <www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/03/brasil-avanca-nas-propostas-de-geracao-hibrida-de-energia-eletrica>. Acesso em 05 mar. 2018.

REINER LEMOINE INSTITUT. **Hybrid PV-Wind-System Using the Same Area**. Berlim, 2013. Disponível em: <<https://reiner-lemoine-institut.de/en/high-resolution-global-cost-advantages-of-stand-alone-small-scale-hybrid-pv-battery-diesel-systems-2/>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

SPENCER, J.W. **Fourier series representation of the position of the Sun**. Search. 1971, v. 2, n. 5, p.162–172.

RENEABLE ENERGY POLICY NETWORK for the 21st CENTURY. **Renewables 2018: Global Status Report**. Paris, 2018. ISBN 978-3-9818911-3-3. Disponível em: <<http://www.ren21.net/gsr-2018/>>. Acesso em: 19 ago. 2018.

RENEWABLE ENERGY WORLD. **ENGIE Co-locates Energy Storage with Solar-Wind Hybrid Plant in Brazil**. 28 abr. 2017. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2017/04/engie-co-locates-energy-storage-with-solar-wind-hybrid-plant-in-brazil.html>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

RÜTHER, Ricardo. Um investimento = Múltiplas funções: Desenvolvimento e avaliação técnica, regulatória e econômica de sistemas de armazenamento de energia aplicados a sistemas de geração centralizada e distribuída. In: WORKSHOP MINIRREDES DE GERAÇÃO E SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA, 27 jun.2017, Cidade Universitária, São Paulo. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/?q=pt-br/evento/workshop-minirredes-de-geracao-e-sistemas-de-armazenamento-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 4 abr. 2018.

SIEMENS GAMESA. **Siemens Gamesa wins first order for a hybrid wind-solar project in India**. 26 set. 2017. Disponível em: <<http://www.siemensgamesa.com/en/communication/news/siemens-gamesa-wins->

first-order-for-a-hybrid-wind-solar-project-in-india.html?idCategoria=66>. Acesso em: 27 mar. 2018.

SILVA, Neilton F. da. **Energias Renováveis na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Eólica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2015. ISBN 9788568483114.

SOLAR ENERGY CORPORATION OF INDIA. Innovation in Solar Power and Hybrid Technologies (P160379): **Special General Procurement Notice for 160 MW Solar-Wind Hybrid Power Plant in State of Andhra Pradesh**. 23 jan. 2018. Disponível em: <<http://www.energetica-india.net/news/special-general-procurement-notice-for-160-mw-solar-wind-hybrid-power-plant-in-ap---seci>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

STÜKER, Eduardo et al. Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 9., 2016, Santa Maria, RS. **Revista Ciência e Natura** v.38 Ed. Especial, p. 284– 290, DOI:10.5902/2179460X20233.

UNITED NATIONS. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Low Carbon Green Growth Roadmap for Asia and the Pacific. In: Fichas Técnicas. **35 - Hybrid Energy System**. Bangkok, 2012. ISBN 978-974-680-329-8. Disponível em: <<http://www.unescap.org/resources/low-carbon-green-growth-roadmap-asia-and-pacific>>. Acesso em: 8 fev. 2018.

VESTAS. Louzes Project: **Wind and Solar**. Disponível em: <<https://www.vestas.com/en/about/hybrid#!louzes-project>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

VESTAS. **Windlab and Vestas partner on the world's first utility-scale hybrid integrating wind, solar and storage**. Denmark, 19 out. 2017. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/about/hybrid#!grid_0_content_4_Container>. Acesso em: 28 mar. 2018.

WINDLAB. **Construction to begin on \$160 million Industry Leading Hybrid Renewable Energy Project**. Camberra, 2017. Disponível em: <<https://www.windlab.com/news/construction-begin-160-million-industry-leading-hybrid-renewable-energy-project/>>. Acesso em: 29 abr. 2018.