

ESTUDOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO

AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE USINAS HÍBRIDAS EÓLICO-FOTOVOLTAICAS

*Proposta metodológica
e estudos de caso*



Empresa de Pesquisa Energética

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME/SPE

Ministério de Minas e Energia
Ministro

Fernando Coelho Filho

Secretário Executivo

Paulo Pedrosa

**Secretário de Planejamento e
Desenvolvimento Energético**

Eduardo Azevedo Rodrigues

Secretário de Energia Elétrica

Fábio Lopes Alves

**Secretário de Petróleo, Gás Natural e
Combustíveis Renováveis**

Márcio Félix Carvalho Bezerra

**Secretário de Geologia, Mineração e
Transformação Mineral**

Vicente Humberto Lôbo Cruz



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Luiz Augusto Nóbrega Barroso

**Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e
Ambientais**

Ricardo Gorini de Oliveira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Amilcar Gonçalves Guerreiro

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

José Mauro Ferreira Coelho

Diretor de Gestão Corporativa

Álvaro Henrique Matias Pereira

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - Ministério de Minas e Energia -
Sala 744 - 7º andar
70065-900 - Brasília - DF

Escritório Central

Av. Rio Branco, 01 - 11º Andar
20090-003 - Rio de Janeiro - RJ

ESTUDOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO

AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE USINAS HÍBRIDAS EÓLICO-FOTOVOLTAICAS

*Proposta metodológica
e estudos de caso*

Coordenação Geral

Luiz Augusto Nóbrega Barroso
Amilcar Gonçalves Guerreiro

Coordenação Executiva

Jose Marcos Bressane
Jorge Trinkenreich
Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Equipe Técnica

Aline Couto De Amorim
Bernardo Folly de Aguiar
Cristiano Saboia Ruschel
Flavio Alberto Figueredo Rosa
Gustavo Brandão Haydt de Souza
Gustavo Pires da Ponte
Josina Saraiva Ximenes
Marcelo Willian Henriques
Marcos Vinicius G. da Silva Farinha
Michele Almeida de Souza
Patricia Costa Gonzalez de Nunes

Nº. EPE-DEE-NT-025/2017-r0

Data: 24 de abril de 2017

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)

APRESENTAÇÃO

Esta Nota Técnica apresenta uma proposta de metodologia para avaliação de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas, sob o ponto de vista energético, com base em estudos de caso para diferentes locais e configurações de usinas. Pretende-se, com isso, estimular o amadurecimento da discussão sobre o tema e propor uma metodologia consistente para avaliação da complementaridade entre as fontes solar fotovoltaica e eólica, e que, principalmente, seja adequada para estudos de otimização do sistema de transmissão.

Foi avaliada a geração de energia de usinas fotovoltaicas e eólicas, próximas entre si, em sítios com disponibilidade de dados anemométricos e solarimétricos, considerando como premissa o compartilhamento do ponto de conexão. Buscou-se avaliar a complementaridade dos recursos energéticos e da produção de energia das duas fontes, de forma a produzir resultados que sejam adequados e confiáveis para estudos futuros de avaliação da hipótese de que haveria otimização do uso da subestação e do sistema de transmissão ou distribuição responsável pelo escoamento da energia.

Os estudos de caso apresentados nesta nota técnica abrangeram cinco diferentes locais na região Nordeste que já contam com empreendimentos eólicos em operação e onde, considerando um raio de 20 km, também foram cadastrados projetos de usinas fotovoltaicas nos últimos Leilões de Energia de Reserva. Portanto, são sítios com bom potencial para ambas as fontes.

Para cada local estudado foram avaliadas diferentes configurações de usinas eólica e fotovoltaica, visando a identificar os principais parâmetros que influenciam na produção de energia e nos cortes decorrentes do limite de capacidade de escoamento na subestação 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 de ventos, e o dimensionamento 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/distribuição.

Sumário

APRESENTAÇÃO	1
1. Introdução.....	3
2. Objetivo	4
3. Dados utilizados	4
3.1 Locais avaliados.....	5
3.2 Dados anemométricos e solarimétricos	6
4. Metodologia e Premissas.....	10
4.1 Parâmetros de análise	10
4.2 Cálculo da produção eólica.....	10
4.3 Cálculo da produção fotovoltaica	12
4.4 Limitações da metodologia.....	14
5. Resultados.....	14
5.1 <i>Curtailment</i> anual.....	15
5.2 Análise sazonal e horária.	19
5.3 Efeito da proporção de potências instaladas fotovoltaica e eólica.....	22
6. Conclusões.....	23
7. Sugestões para trabalhos futuros	25
8. Referências.....	25
ANEXO A – Análises adicionais para as demais localidades	26

1. Introdução

Diversas notícias e estudos têm sido divulgados sobre a viabilidade de empreendimentos híbridos utilizando as fontes eólica e solar (fotovoltaica)¹. Em diversos casos, é apontada a existência de alguma complementaridade entre as fontes, a possibilidade de otimização dos custos de operação e de investimento, especialmente na conexão e a redução de impactos socioambientais. Com base nesses argumentos, alguns agentes geradores têm proposto a criação de produtos nos leilões de energia para contratação de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas, buscando dessa forma ampliar o espaço para novos empreendimentos no Nordeste, contornando parte das restrições do sistema de transmissão para escoamento da energia eólica e fotovoltaica.

Dada a evidência e a relevância da discussão sobre empreendimentos híbridos, e tendo em vista as afirmações de alguns agentes de geração sobre complementaridade da produção eólica e fotovoltaica e as vantagens decorrentes disso, a EPE entendeu ser oportuno se aprofundar sobre as bases metodológicas para estudos desse tipo, conhecer os fatores mais relevantes para avaliação de eventuais benefícios dessas usinas híbridas e obter evidências sobre a possibilidade de generalizar ou regionalizar os resultados obtidos.

Inicialmente, entende-se como complementaridade energética a capacidade de dois ou mais recursos (da mesma fonte ou de fontes distintas) apresentarem disponibilidade energética complementar no tempo. A complementaridade “perfeita” entre dois recursos ocorreria se, no momento em que um está com grande disponibilidade, o outro está com pouca disponibilidade, e quando a situação se inverte para o primeiro, também se inverte para o segundo. Essa avaliação pode ser feita em diferentes escalas temporais (diária, mensal, anual, etc.). Além disso, ainda que o conceito de usina híbrida seja mais amplo e abranja as mais diversas fontes energéticas, vale ressaltar que especificamente nesta nota técnica um empreendimento híbrido é formado por uma geração conjunta, em qualquer proporção, proveniente de recurso eólico e solar utilizando tecnologia fotovoltaica.

¹ Como exemplos, há projetos da (i) Renova Energia com financiamento da Finep Inovação e Pesquisa na região de Caetité (<http://www.renovaenergia.com.br/pt-br/imprensa/noticias/paginas/noticia.aspx?idn=572>), na Bahia; (ii) da Enel Green Power localizado no município de Tacaratu (<http://www.canalbioenergia.com.br/inaugurada-primeira-usina-hibrida-do-brasil/>), no Pernambuco; e (iii) da Sowitec, no norte da Bahia (projeto apresentado no Brasil Solar Power 2016).

Tendo em vista o exposto, este trabalho buscou encontrar locais com boa disponibilidade tanto de recurso solar quanto eólico, que não fossem somente nas regiões já analisadas em outros estudos e, principalmente, que houvesse disponibilidade de medições de vento e irradiação num período concomitante e com resolução sub-horária. Para esses sítios, simulou-se a produção de usinas eólicas e fotovoltaicas, avaliando-se os perfis de geração de energia elétrica e os cortes (*curtailments*)² para determinadas premissas de capacidade de escoamento descritas na seção 4 – Metodologia e Premissas.

2. Objetivo

O objetivo principal do trabalho é descrever uma metodologia de análise da complementaridade entre a geração a partir do recurso eólico e a geração a partir do recurso solar (fotovoltaico) em uma mesma localidade onde possa ser desenvolvido um empreendimento híbrido.

Propõe-se avaliar as perdas de energia (cortes) quando da instalação de um empreendimento fotovoltaico junto a um empreendimento eólico existente, compartilhando uma capacidade limitada de escoamento de energia. São analisados também os principais parâmetros que influenciam tais cortes de energia, com o intuito de fazer o melhor uso possível de uma possível complementariedade local de recursos.

Ressalta-se que este estudo está focado na complementariedade local, visando a ganhos de otimização nos investimentos em conexão. Não é objetivo desta Nota Técnica avaliar a complementariedade em escala regional ou efeito portfolio de um grupo numeroso de empreendimentos.

3. Dados utilizados

Para avaliar o efeito da complementariedade entre as fontes eólica e solar, este trabalho adotou como referência a disponibilidade de dados anemométricos e

² Neste documento utiliza-se indistintamente os termos *curtailment* e corte para representar o montante de energia gerada e não aproveitada por limitação do sistema elétrico para escoamento dessa energia.

solarimétricos medidos simultaneamente, por pelo menos doze meses, com alta resolução temporal e em regiões próximas (até 20 km).

3.1 Locais avaliados

Para seleção dos locais a serem avaliados, o primeiro critério adotado foi a necessidade de medições, tanto anemométricas quanto solarimétricas *in loco*, por período não inferior a 12 meses consecutivos. Sabe-se que quanto maior o período de medição, mais significativa a amostra. Porém, salvo raras exceções, não estavam disponíveis séries de dados de irradiação com período de medição superior a 12 meses.

De posse das estações solarimétricas candidatas, teve início a busca por torres anemométricas próximas. Foi adotado que a distância máxima entre os estações não deveria ultrapassar 20 km, devido à premissa de que as usinas compartilhariam o mesmo ponto de conexão. Além disso, foram selecionados dados anemométricos cujo período de medição fosse concomitante por pelo menos um ano completo com o período de medição da solarimétrica próxima.

Após a aplicação dos critérios de seleção, foram identificados cinco locais com disponibilidade de dados, onde a complementariedade entre as fontes eólica e solar poderia ser avaliada. O mapa com a indicação aproximada dos locais estudados pode ser verificado na Figura 1, representando distintas características de vento e irradiação.

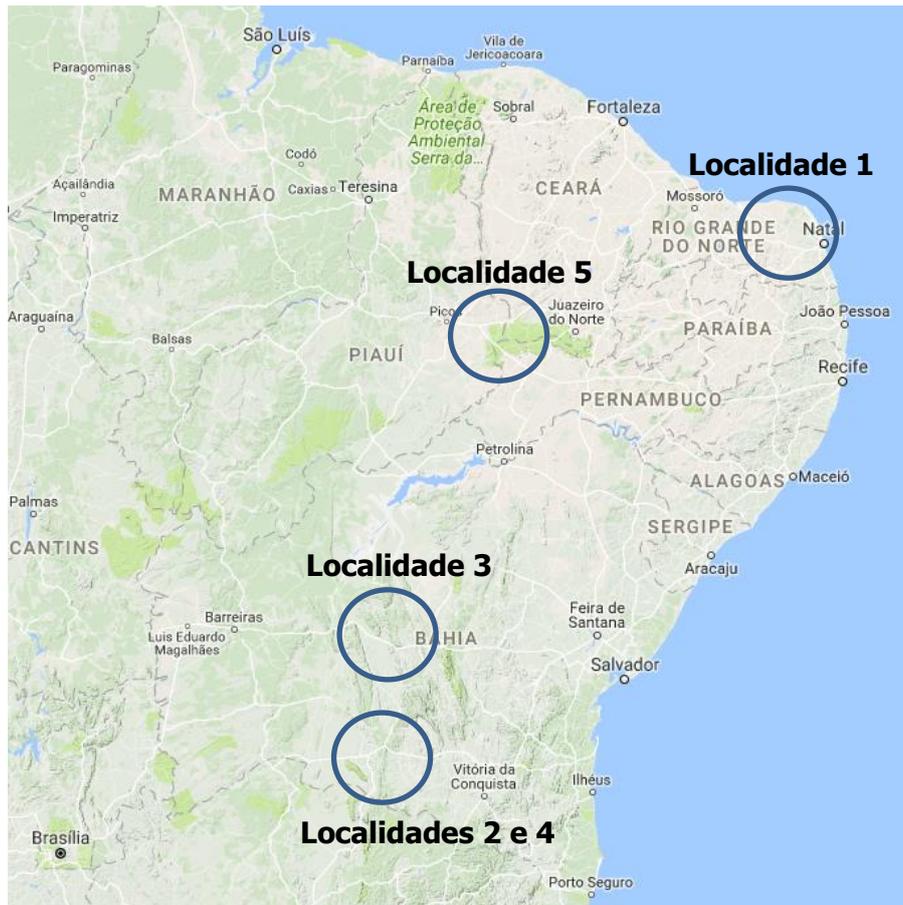


Figura 1 – Locais estudados

3.2 Dados anemométricos e solarimétricos

A fim de subsidiar estudos elétricos e energéticos relacionados ao recurso eólico, a EPE vem, desde 2009, constituindo uma base de dados climatológicos e anemométricos, denominada Sistema de Acompanhamento de Medições Anemométricas (AMA). As medições são realizadas em estações anemométricas instaladas nos parques eólicos vencedores de leilões de energia, conforme determinação expressa nos contratos firmados com esses parques, e seguem normas e procedimentos internacionais destinados a garantir a qualidade das medições (EPE, 2016). Cabe registrar que um cuidado especial é tomado para garantir o sincronismo horário de todas as estações anemométricas de modo que as medições possam ser utilizadas em estudos com resolução horária, tal como o que se apresenta.

O Sistema AMA armazena medições registradas a cada 10 minutos, o que permite que avaliações do recurso possam ser feitas nesta resolução temporal ou em intervalos maiores, como de hora em hora. Esta possibilidade de análise em curtos intervalos

torna possível o estudo de variações do recurso dentro da sazonalidade diária, tão importante na avaliação da inserção dos recursos renováveis variáveis (IRENA, 2017).

Para garantir a qualidade das medições do Sistema AMA, os registros recebidos passam por um processo de consistência em que são avaliadas todas as medições anemométricas e climatológicas (velocidade e direção do vento, pressão, temperatura e umidade) e toda a inconsistência de medição é assinalada. Para a devida substituição das medições incoerentes, é efetuado um processo de MCP (Medir-Correlacionar-Prever) entre torres próximas e com boa correlação das medições. A EPE mantém constante contato com agentes para garantia da qualidade da base de dados.

A base de dados solarimétricos utilizada considerou as medições apresentadas na EPE para fins de cadastramento e habilitação técnica nos leilões de energia. Os requisitos para participação de empreendimentos nos leilões de energia do Sistema Interligado exigem que a estação solarimétrica possua pelo menos dois piranômetros para medição da radiação solar horizontal, padrão "First Class" ou superior, além da medição de umidade relativa, temperatura e velocidade de vento (EPE, 2016 - b). Tais dados são posteriormente tratados e certificados por um certificador independente, garantindo certa confiabilidade aos dados utilizados.

Assim como os dados anemométricos, os dados solarimétricos possuem discretização temporal de 10 minutos. Considerando a variabilidade das fontes analisadas, tal resolução é relevante para a avaliação da produção de energia, uma vez que poderá capturar as oscilações que a análise de produção média horária ou diária não capturam.

Cada um dos 5 locais selecionados possui recurso eólico com perfil diário de velocidade distinto, enquanto o perfil de irradiação global é similar para as localidades, como pode ser observado na Figura 2³.

³ As distorções verificadas no perfil de irradiação para as localidades 1 e 4 decorrem de sombreamentos parciais nos piranômetros das torres solarimétricas destes locais.

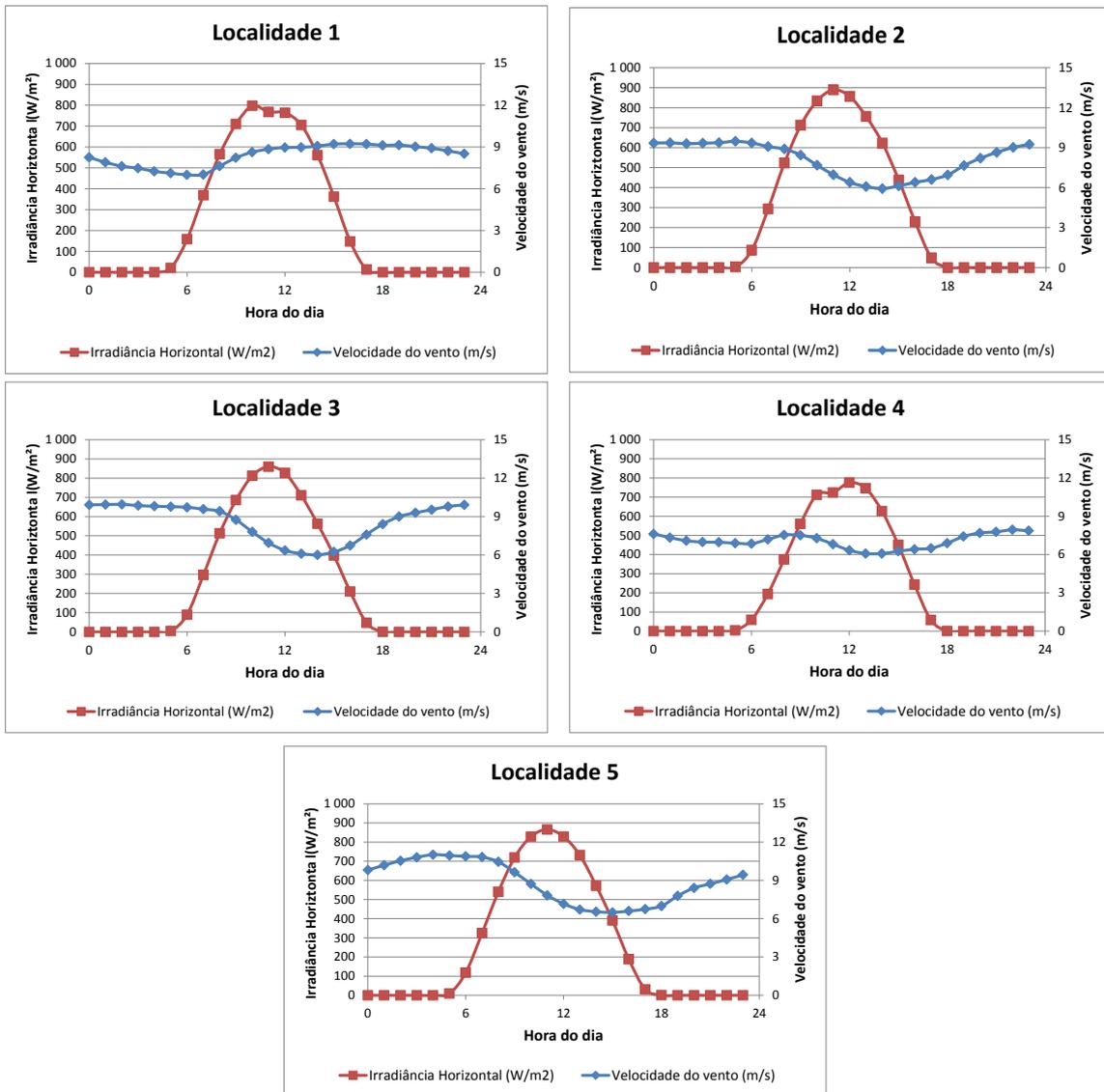


Figura 2 - Médias horárias dos recursos eólico e solar para os locais estudados

Além dos perfis horários da velocidade do vento, é importante conhecer a permanência de velocidade em cada um dos locais. Como neste estudo será analisada a interação entre energia solar e eólica, os gráficos da Figura 3 mostram a permanência de velocidade apenas no período diurno (5:00 até 18:00), quando existe geração solar. No Local 2, por exemplo, pode-se ver que em 20% do período analisado, a velocidade média do vento é maior ou igual a 10 m/s.

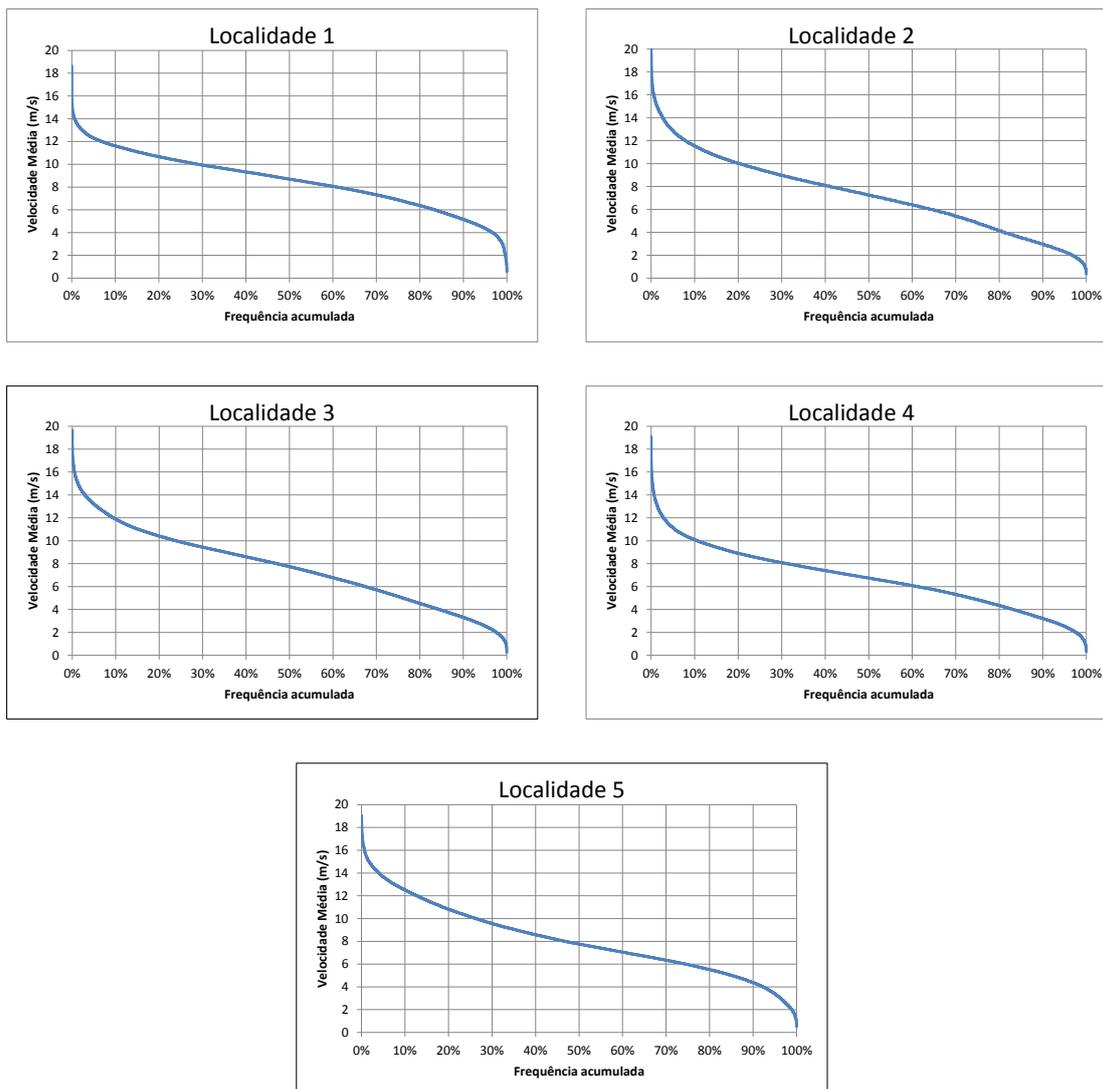


Figura 3 – Permanência da Velocidade Média nos locais estudados

4. Metodologia e Premissas

4.1 Parâmetros de análise

Para avaliar a produção e o *curtailment* de usinas híbridas, simulou-se para cada local a produção eólica e fotovoltaica separadamente. Assumindo a independência entre a produção de energia de cada fonte, a produção total é obtida através da soma, a cada 10 minutos, das produções individuais. Assumiu-se que ambas as usinas estariam conectadas à mesma subestação/sistema de transmissão, com capacidade equivalente à potência instalada da usina eólica. Admitiu-se que toda a energia elétrica gerada a partir da fonte eólica seria escoada por essa subestação e que sua capacidade ociosa (quando a produção da usina eólica é inferior à sua capacidade nominal) poderia ser ocupada pela energia proveniente da usina fotovoltaica. Adotou-se assim que, se a produção combinada eólica e fotovoltaica ultrapassar a capacidade de escoamento, o corte se dará na usina fotovoltaica.

Tendo em vista o caráter modular das fontes⁴, avaliou-se o montante de energia fotovoltaica “cortada” para diferentes proporções de potência de cada usina, partindo-se do caso base 1-10: 1 unidade de potência de UFV (fotovoltaica) para cada 10 unidades de potência de EOL (eólica). Devido às diferentes potências unitárias dos equipamentos avaliados, as capacidades instaladas de cada fonte são tratadas de forma adimensional, isto é, a razão equivalente da potência de uma fonte em relação à outra.

4.2 Cálculo da produção eólica

Para simulação de energia eólica, foram utilizados os dados registrados em intervalos de 10 minutos de pressão atmosférica, temperatura, umidade e velocidade média do vento, bem como a curva de potência de cada aerogerador utilizado. Para cada uma das simulações, considerou-se que o parque eólico é representado por um único aerogerador instalado no local de medição. A geração total é escalonada pela potência total do parque eólico considerado neste estudo, sem consideração de perdas elétricas, indisponibilidades forçadas e programadas, efeito “esteira” e dispersão da geração em relação ao local de medição dos ventos. Esta metodologia, apesar de simplificada, gera resultados consistentes, como foi mostrado em EPE (2016 - c).

⁴ No caso da eólica, a potência total da usina corresponde à soma das potências nominais dos aerogeradores. Na fotovoltaica, equivale à soma das potências das unidades geradoras (conjuntos de séries e arranjos fotovoltaicos conectados a um inversor).

Para cada local, foi avaliada a influência de dois parâmetros dos aerogeradores: a potência nominal e o diâmetro do rotor. Para analisar as consequências da mudança de potência nominal, foram escolhidos três modelos de aerogeradores do mesmo fabricante, mantendo-se o diâmetro de rotor e variando a potência do aerogerador. Neste caso, foram utilizados os modelos da fabricante ENERCON com diâmetro de rotor de 82 metros e potências unitárias de 2,05 MW, 2,35 MW e 3,0 MW. As curvas de potência dos aerogeradores são mostradas na Figura 4.

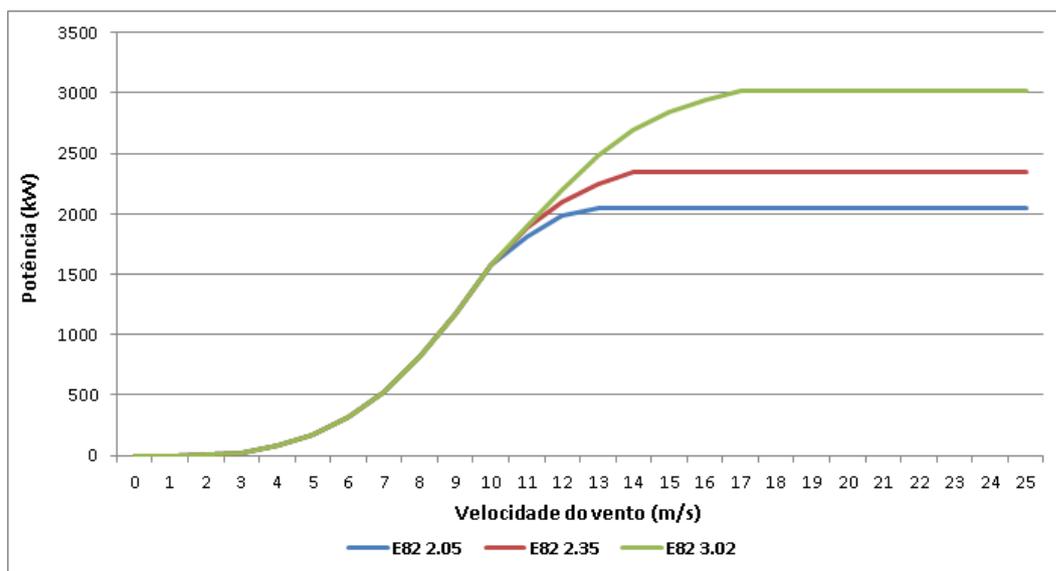


Figura 4 – Curva de potência com variação de potência unitária

Para analisar a influência da mudança do diâmetro do rotor, foram escolhidos três modelos de aerogeradores do mesmo fabricante, mantendo-se a potência do aerogerador e variando o diâmetro de rotor. Neste caso, foram utilizados os modelos da fabricante GAMESA com potência unitária de 2,0MW e diâmetros de rotor de 87m, 97m e 114m. As curvas de potência dos aerogeradores são mostradas na Figura 5.

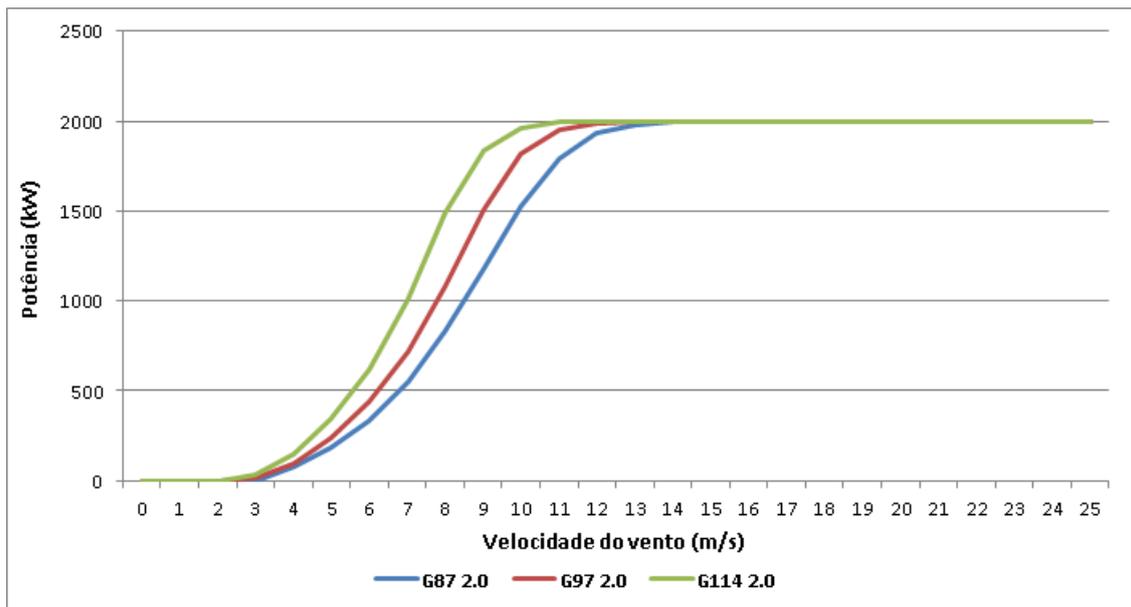


Figura 5 – Curva de potência com variação de diâmetro do rotor

Esta análise foi motivada pelo fato de que, no Brasil, conforme a evolução da tecnologia e com um melhor conhecimento do recurso eólico das regiões, diferentes modelos de aerogeradores foram sendo instalados em locais próximos. Ressalta-se que os modelos de aerogeradores utilizados neste estudo não correspondem aos modelos realmente instalados nos locais.

4.3 Cálculo da produção fotovoltaica

Para o cálculo da produção fotovoltaica foi utilizado o *software* SAM (System Advisor Model), desenvolvido pelo NREL (National Renewable Energy Laboratories), órgão vinculado ao Departamento de Energia dos Estados Unidos. Este programa realiza simulações para diferentes fontes de energia renovável e é disponibilizado gratuitamente no endereço eletrônico da instituição. A escolha deste *software* deveu-se em grande parte ao fato de possuir a capacidade de simular a produção de um sistema fotovoltaico com resolução temporal menor que 1 hora, como necessário para realização deste estudo. É possível simular a produção de energia com resolução de 1 minuto para o período de um ano, desde que se possua dados de entrada para tanto.

Para cada local, a partir dos dados disponíveis de irradiância global horizontal (GHI) e temperatura ambiente a cada 10 minutos, foi gerado o arquivo de entrada para utilização no *software*. Contudo, para cálculo da produção fotovoltaica, é necessário que se possua, além da GHI, dados de radiação direta ou difusa. A irradiância difusa horizontal (DHI) foi então estimada por meio da Correlação de Erbs, que utiliza o índice de claridade atmosférica (k_t) a cada instante para fornecer, a partir da GHI

medida, uma estimativa de DHI. Mais detalhes sobre tal procedimento podem ser obtidos em Duffie & Beckman (2006).

Foram gerados dois casos base para análise: usina fotovoltaica (i) com estrutura fixa e (ii) com rastreamento em um eixo. Observa-se uma tendência cada vez maior em projetos de geração centralizada no Brasil de utilização de sistema de rastreamento em um eixo, tendo em vista o maior aproveitamento do recurso proporcionado pelo uso dessa solução. Contudo, a análise preliminar de perfis de ventos em alguns locais indicam que o sistema com estrutura fixa poderia ser mais adequado do ponto de vista da hibridização. Com a simulação dos dois sistemas, é possível avaliar o *curtailment* em cada caso, permitindo uma melhor análise das vantagens e desvantagens do uso de rastreamento em uma usina híbrida eólico-fotovoltaica.

Para ambas as configurações simuladas, em todos os locais, utilizou-se uma usina padrão formada por unidades geradoras com um inversor de 1 MW de capacidade nominal, e 1,23 MWp de módulos fotovoltaicos, dispostos em um arranjo de 18 módulos em série, com 220 séries em paralelo. Os módulos fotovoltaicos e o inversor foram selecionados a partir do banco de dados do *software*, utilizando-se modelos de fabricantes reconhecidos no mercado. Os módulos selecionados são da tecnologia de silício policristalino, com potência nominal de 310 Wp.

Por ser um projeto genérico, não foram consideradas perdas por sombreamento próximo, implicando assim no uso de um terreno suficientemente grande para que o espaçamento entre os módulos minimize tal efeito. Para os demais parâmetros de perda, foram adotados valores padrão que foram utilizados em todas as simulações.

Uma limitação que surge ao se simular sistemas fotovoltaicos em bases de tempos menores que uma hora é o erro devido à não-consideração de inércia térmica dos módulos fotovoltaicos⁵. É assumido que este erro não tem influência significativa nas análises realizadas neste trabalho, por possuir caráter aleatório e ter a tendência de se anular considerando períodos mais longos.

⁵ O modelo de cálculo de temperatura de célula utilizado pelo SAM (e pelos demais softwares do mercado) considera esta como proporcional à temperatura ambiente, à irradiância e à velocidade de vento no instante considerado. Quando a resolução temporal diminui, na prática as variações de temperatura ocorrem mais lentamente do que as variações na irradiância, devido à inércia térmica dos módulos. Assim, a temperatura calculada difere da que será observada na usina real, introduzindo um erro na produção de energia.

O resultado obtido dessas simulações foram valores de potência a cada dez minutos para o ano estudado, que foram utilizados nas avaliações de corte de energia quando da hibridização com a fonte eólica.

4.4 Limitações da metodologia

É importante ressaltar as limitações da metodologia adotada e das informações disponíveis. Uma delas diz respeito ao período avaliado. Além da dificuldade, já abordada, em se obter dados anemométricos e solarimétricos próximos e concomitantes, estes, quando disponíveis, resumem-se a um período limitado. Nas avaliações para este estudo, considerou-se para todos os locais a geração ao longo de doze meses, não sendo necessariamente o mesmo período (data de início e fim) para os diferentes locais. Com isso, não estão sendo avaliados os efeitos da variabilidade interanual dos recursos, algo relevante, sobretudo no caso da fonte eólica. De maneira resumida, é possível que o período avaliado tenha sido de ventos mais fracos, reduzindo a produção eólica e, conseqüentemente, reduzindo os cortes da produção fotovoltaica excedente, favorecendo a conclusão sobre o efeito complementar das fontes. Da maneira análoga, a situação inversa pode ter ocorrido, o que não está sendo avaliado neste trabalho.

A variabilidade espacial dos recursos também está sendo tratada de maneira simplificada. Na seleção de estações anemométricas e solarimétricas, admitiu-se uma distância máxima de 20 km entre elas e simulou-se a produção das duas fontes nessa região, sem considerar a extrapolação horizontal dos recursos, efeitos de microclima, relevo local, etc.

5. Resultados

Conforme a metodologia descrita, para cada um dos 5 locais foram calculadas 6 configurações para geração eólica e 2 configurações para geração fotovoltaica. Desta forma, no total, foram analisados 60 casos.

Para cada caso, foram avaliados os percentuais de corte de energia fotovoltaica ao longo de 1 ano, detalhando a influência dos equipamentos utilizados, bem como do comportamento específico dos recursos presentes em cada localidade. Também foi avaliada a relação entre o fator de capacidade diurno dos parques eólicos com os cortes de energia.

Em seguida os resultados foram apresentados em bases temporais menores, permitindo uma análise mais detalhada do comportamento dos cortes de energia. Por

fim, foram simulados os percentuais de corte para proporções de potência fotovoltaica e eólica diferentes do caso base (1-10).

5.1 Curtailment anual

A Figura 6 mostra o percentual da energia fotovoltaica produzida que seria cortada para cada um dos 60 casos, no respectivo ano de análise. Os cortes apresentaram uma alta discrepância, variando entre 0,05% e 33,99%. Observa-se que para cada um dos 60 casos, os valores de corte são diferentes, evidenciando que os resultados são dependentes do comportamento dos recursos do local, do modelo de aerogerador utilizado e da estrutura da usina fotovoltaica.

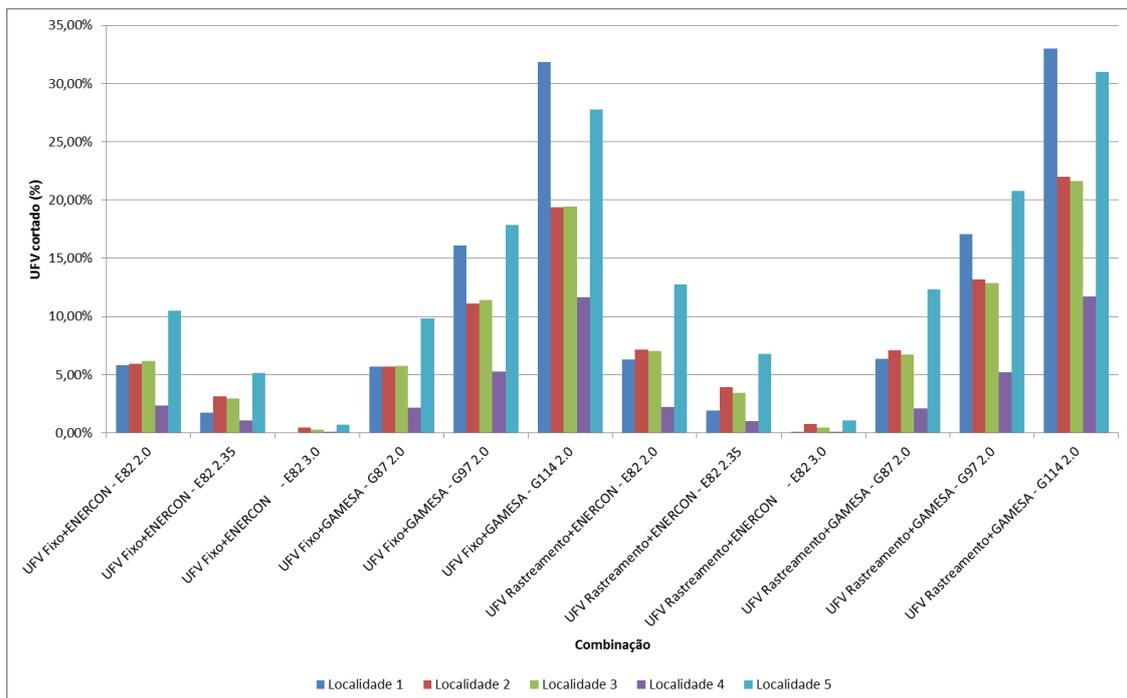


Figura 6 - Curtailment por combinação e local (60 casos).

Avaliando a influência da mudança da potência nominal do aerogerador, detalhada na Figura 7, observa-se que, para um mesmo diâmetro do rotor, quanto maior a potência nominal, menor foi o corte percentual de energia. Analisando as curvas de potência dos aerogeradores, vê-se que os casos com a turbina de maior velocidade nominal resultam em menos cortes de energia. Isso ocorre pois essas turbinas funcionam menos tempo operando na sua potência nominal, causando uma maior capacidade ociosa de transmissão.

Além disso, observa-se que, mesmo para combinações iguais, os resultados variam de acordo com o local estudado, reforçando a importância de análises específicas para cada local, evitando generalizações.

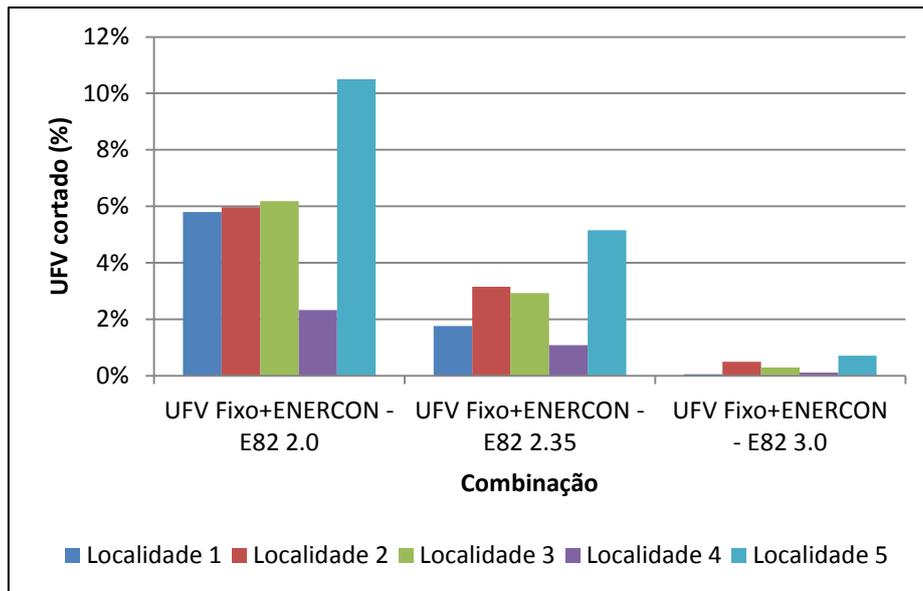


Figura 7 - Curtailment para UFV fixo + EOL Enercon (3 potências)

Analisando a influência do diâmetro do aerogerador em todos os locais, conforme Figura 8, conclui-se que quanto maior o diâmetro do aerogerador maior o corte de energia. Isso ocorre pois, para uma mesma velocidade média, máquinas com maiores diâmetros geram mais energia, diminuindo a capacidade ociosa de transmissão.

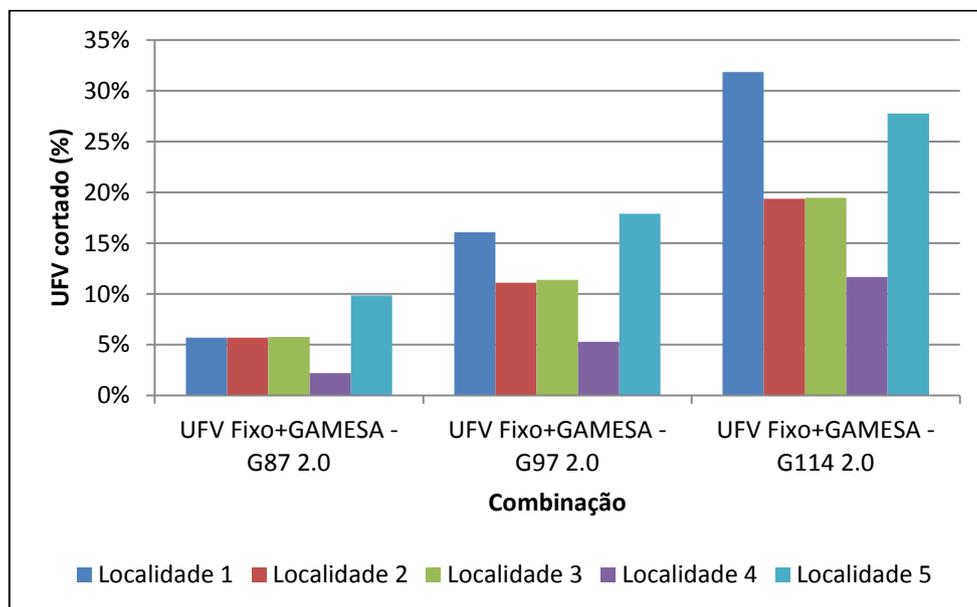


Figura 8 - Curtailment para UFV fixo + EOL Gamesa (3 diâmetros)

Para analisar a influência do uso de rastreamento solar de 1 eixo, são mostrados na Figura 9, os cortes percentuais para configurações com a mesma turbina eólica,

variando o tipo de estrutura de suporte e o local. Estruturas com rastreamento possibilitam maior aproveitamento da energia solar, especialmente no início da manhã e no final da tarde, fato ilustrado na Figura 10. No caso de ocorrência de altas velocidades de vento nesses períodos, o corte de energia será maior, como foi verificado nos locais avaliados. Para o local 5, por exemplo, tal simultaneidade ocorre principalmente no início da manhã, conforme demonstrado na Figura 2.

Destaca-se que o comportamento da radiação é similar para os cinco locais analisados, ao contrário do que se verificou com os perfis de vento, que apresentam comportamentos distintos a depender do local. Desta forma, percebe-se que o aumento dos cortes de energia causado pelo uso de rastreamento em uma usina híbrida são mais dependentes das características do vento do que da radiação.

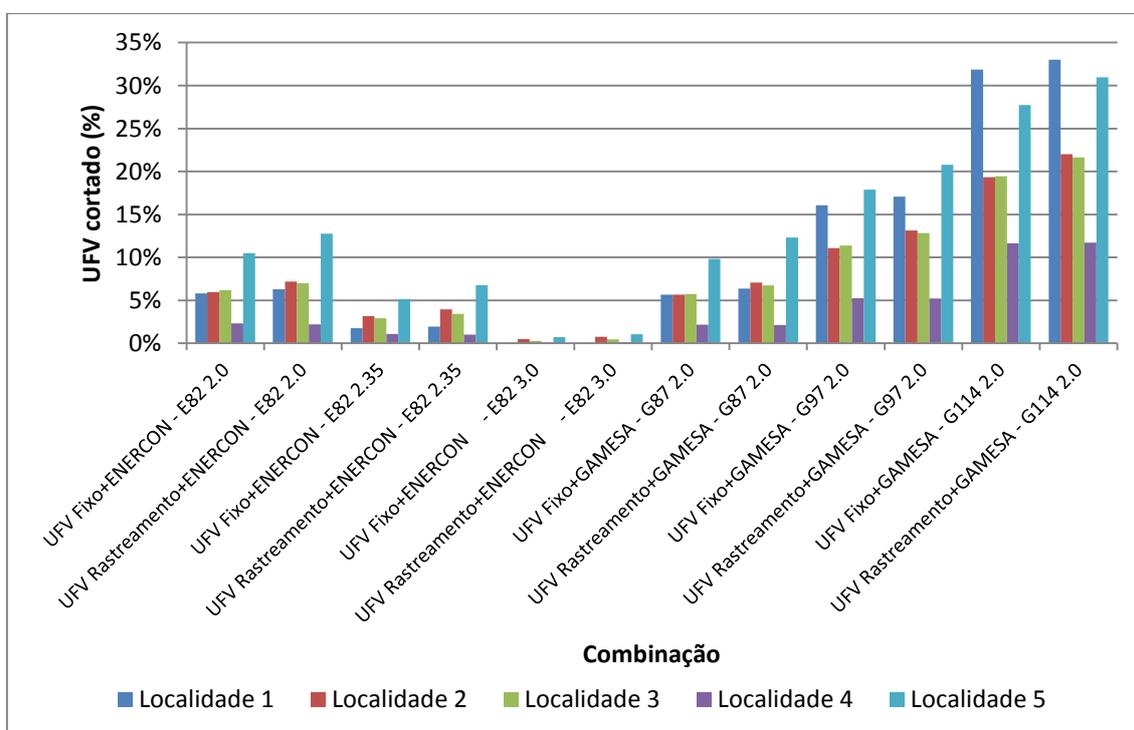


Figura 9 - Curtailment para UFV fixo e Rastreamento

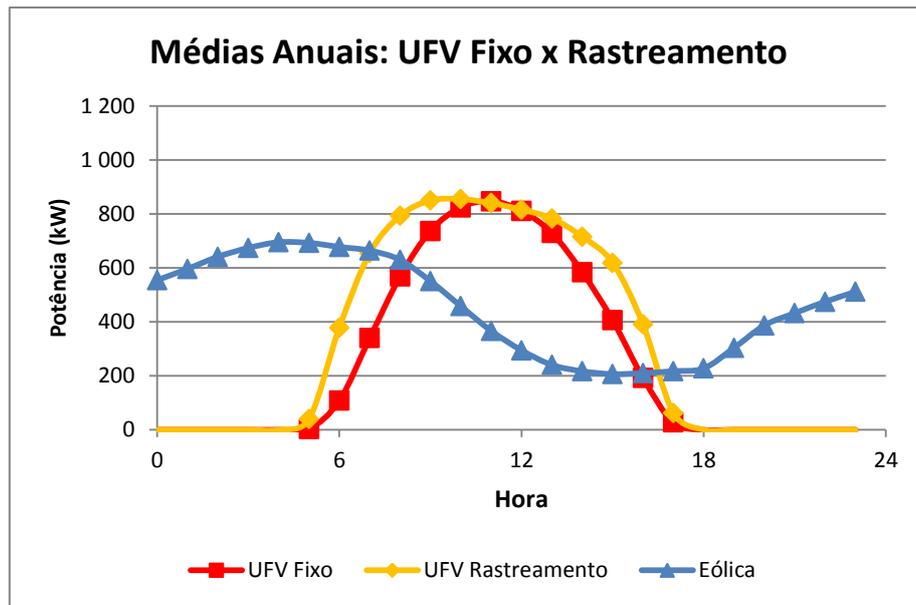


Figura 10 - Médias anuais de potência (kW) para a localidade 5.

Apesar do percentual de corte ser maior para parques com estruturas de rastreamento de um eixo do que para os de estrutura fixa, a energia líquida injetada na rede (energia solar gerada menos cortes de energia) ainda é superior. Foi verificado que, mesmo com maiores cortes de energia, a produção líquida injetada é cerca de 25% superior quando utilizada a estrutura de rastreamento, como indica o exemplo mostrado na Figura 11.

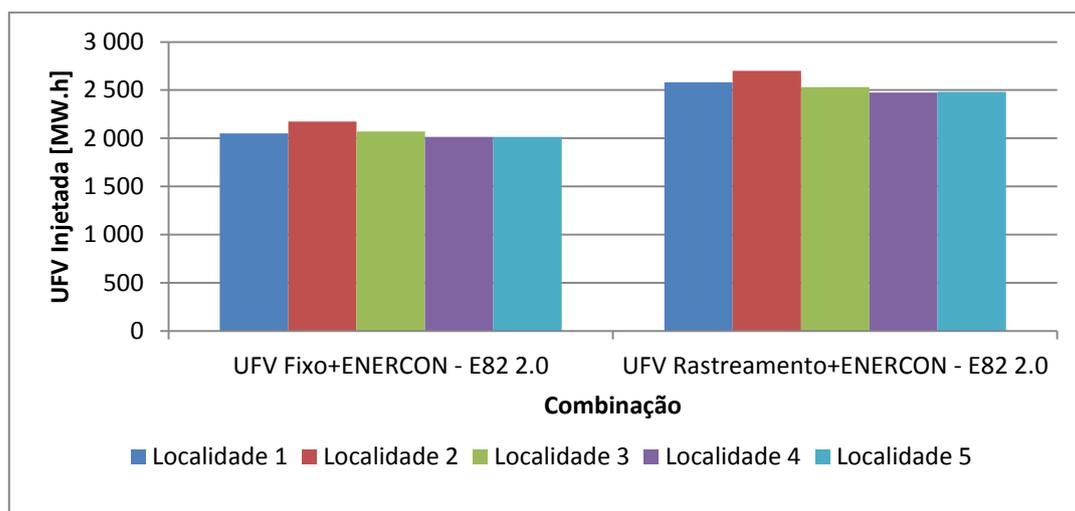


Figura 11 - Energia Fotovoltaica Injetada x Estrutura de Suporte

Por fim, para avaliar a relação entre o fator de capacidade diurno do parque eólico e a energia cortada, os resultados obtidos para cada um dos 60 casos foram comparados,

conforme apresentado na Figura 12. É possível perceber que há, de fato, uma tendência de aumento do corte com o aumento do fator de capacidade diurno.

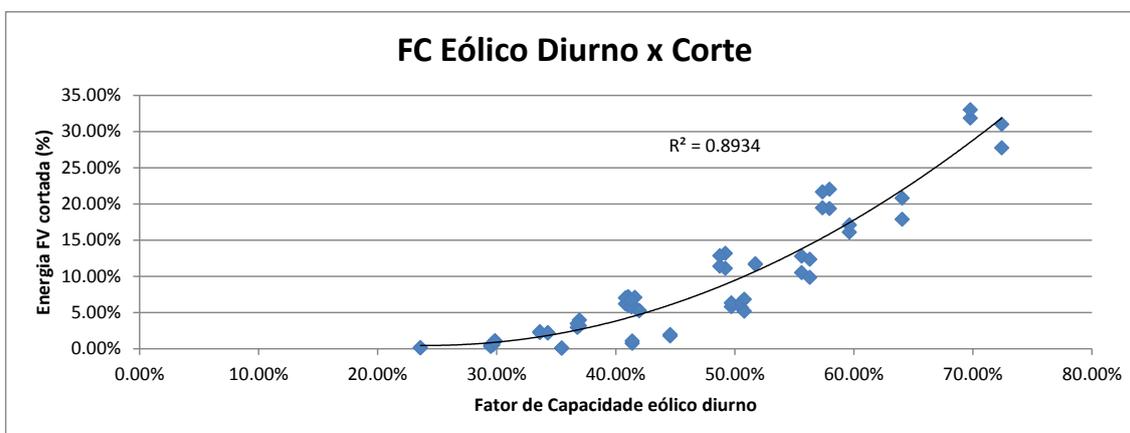


Figura 12- Corte em função do fator de capacidade eólico diurno.

5.2 Análise sazonal e horária.

Para melhor compreensão dos resultados apresentados anteriormente, foram realizadas algumas análises adicionais. A localidade 3 foi escolhida para estes estudos detalhados.

Devido à sazonalidade nos perfis de recurso, principalmente eólico, é esperado que o corte de energia também seja variável ao longo do ano. Com o intuito de avaliar esse efeito, repetiu-se a análise dos cortes de energia com a mesma metodologia, mas apresentando-se os resultados em base mensal. A Figura 13 apresenta o resultado obtido de corte total de energia fotovoltaica (em percentual) a cada mês do período simulado.

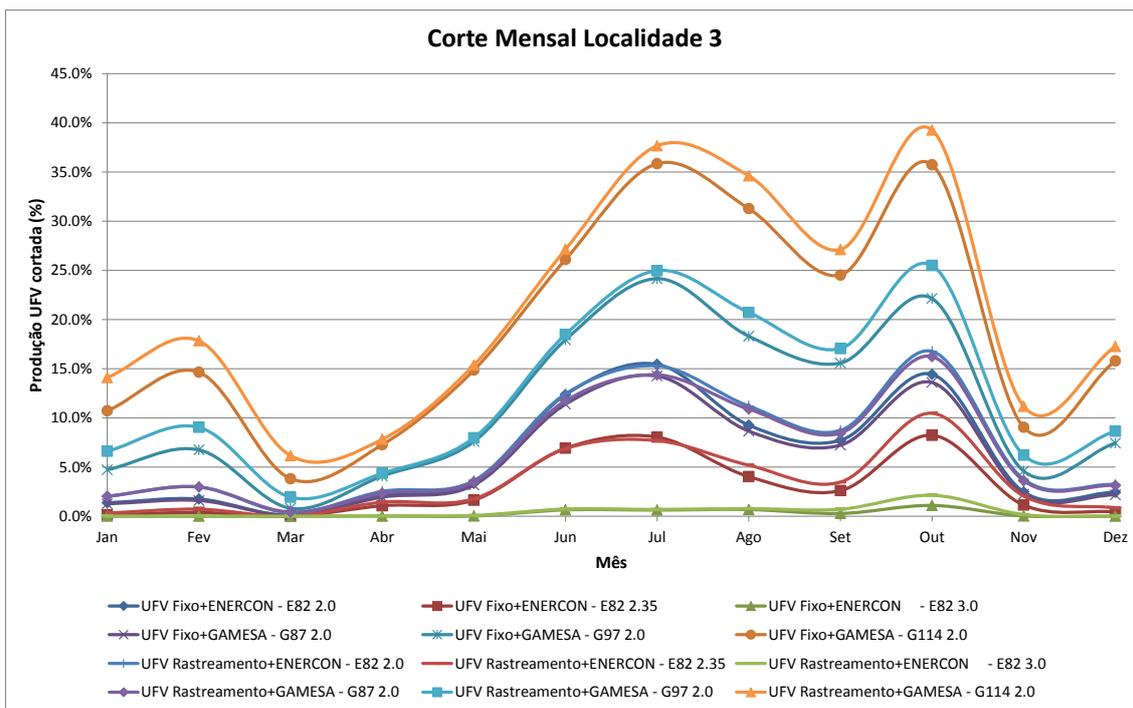


Figura 13- Corte mensal de energia na localidade 3

Verifica-se que de fato há forte caráter sazonal nos cortes de energia, para as doze combinações simuladas. Para a combinação que apresenta o maior corte, este chega a cerca de 40% no mês de Outubro, indicando que, neste mês, grande parte da produção fotovoltaica ocorre quando a produção eólica está próxima ao seu limite. Já para o mês de Março, esta mesma combinação apresenta perdas um pouco superiores a 5%.

Este resultado pode ser melhor compreendido a partir da visualização da produção em dias específicos, como mostrado na Figura 14 e na Figura 15, em que são mostradas respectivamente as produções de energia deste local para um dia de Abril, quando há menores velocidades de vento, e para um dia de Setembro, para o qual o recurso eólico foi mais favorável.

Percebe-se que no dia 20/04, apresentado na Figura 14, a produção eólica é reduzida, sendo possível escoar toda a produção fotovoltaica. Já no dia 18/09, para o qual a produção é mostrada na Figura 15, verifica-se que durante um longo período, abrangendo toda a manhã, a usina eólica operou em sua potência nominal, não sendo possível escoar a produção fotovoltaica. Durante a tarde, com a redução da velocidade do vento, houve espaço para a injeção da energia fotovoltaica disponível.

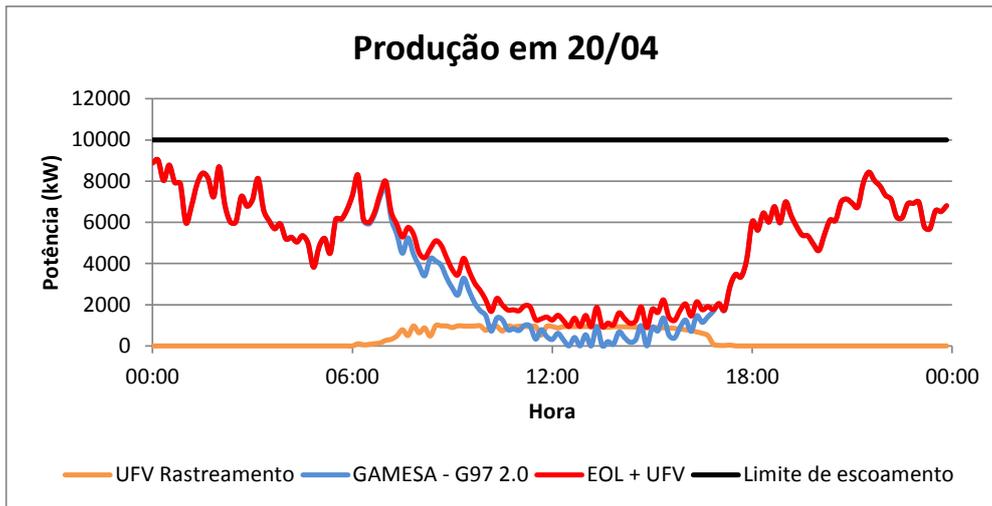


Figura 14 – Produção de energia por fonte e combinada em 20/04

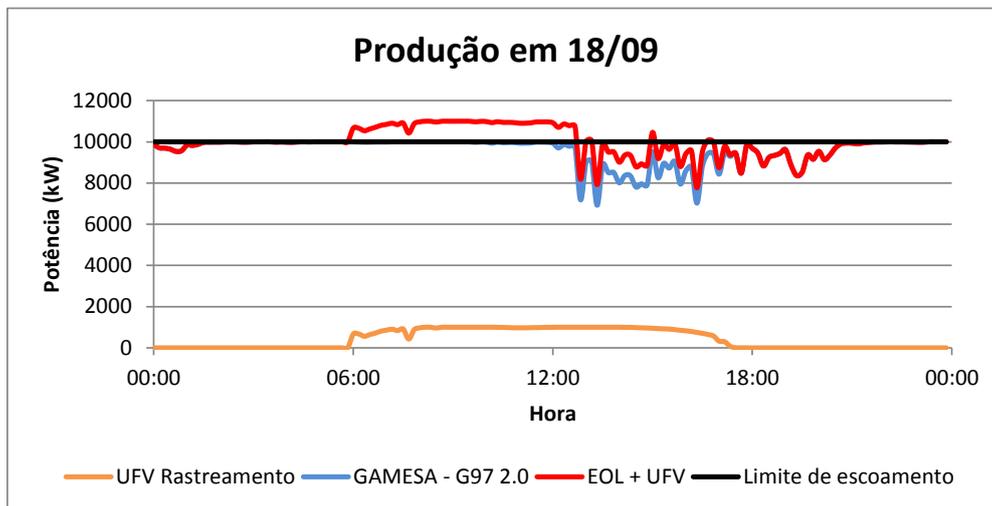


Figura 15 – Produção de energia por fonte e combinada em 18/09

Tais perfis, com velocidades de vento maiores pela manhã, são comuns para este local, como pode ser verificado na Figura 2. Este perfil do recurso resulta em um caráter horário para os cortes de energia, conforme apresentado pela Figura 16, que mostra os cortes de energia por horário do dia.

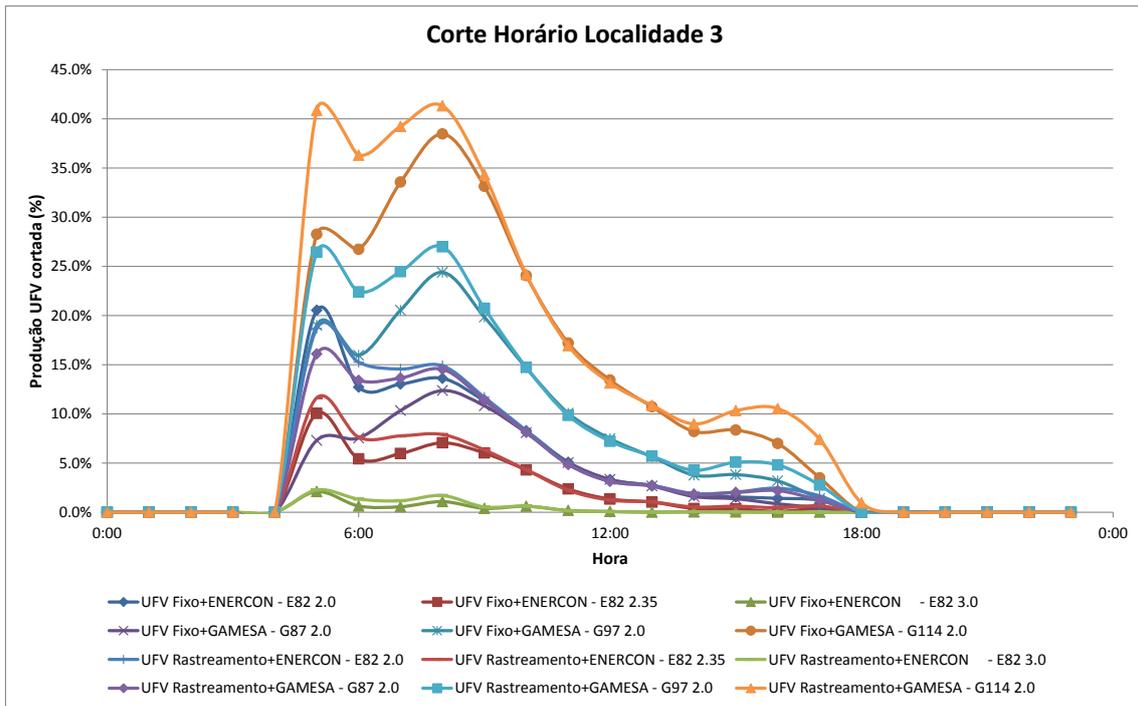


Figura 16 – Corte percentual médio de energia na localidade 3 em função da hora do dia

Cabe ressaltar que este resultado representa o perfil médio anual dos cortes de energia fotovoltaica em função da hora do dia. Ao se separar o resultado de cada mês, por exemplo, seriam verificados patamares e possivelmente comportamentos horários diferentes para cada período.

5.3 Efeito da proporção de potências instaladas fotovoltaica e eólica

Todos os resultados apresentados anteriormente basearam-se numa proporção de 10-1 entre potência instalada eólica e fotovoltaica. Para avaliar o impacto de diferentes proporções entre as fontes, as simulações foram repetidas variando-se tal proporção, desde 10-0,5 até 10-10, com variação de 0,5 na proporção fotovoltaica a cada simulação, como mostrado na Figura 17.

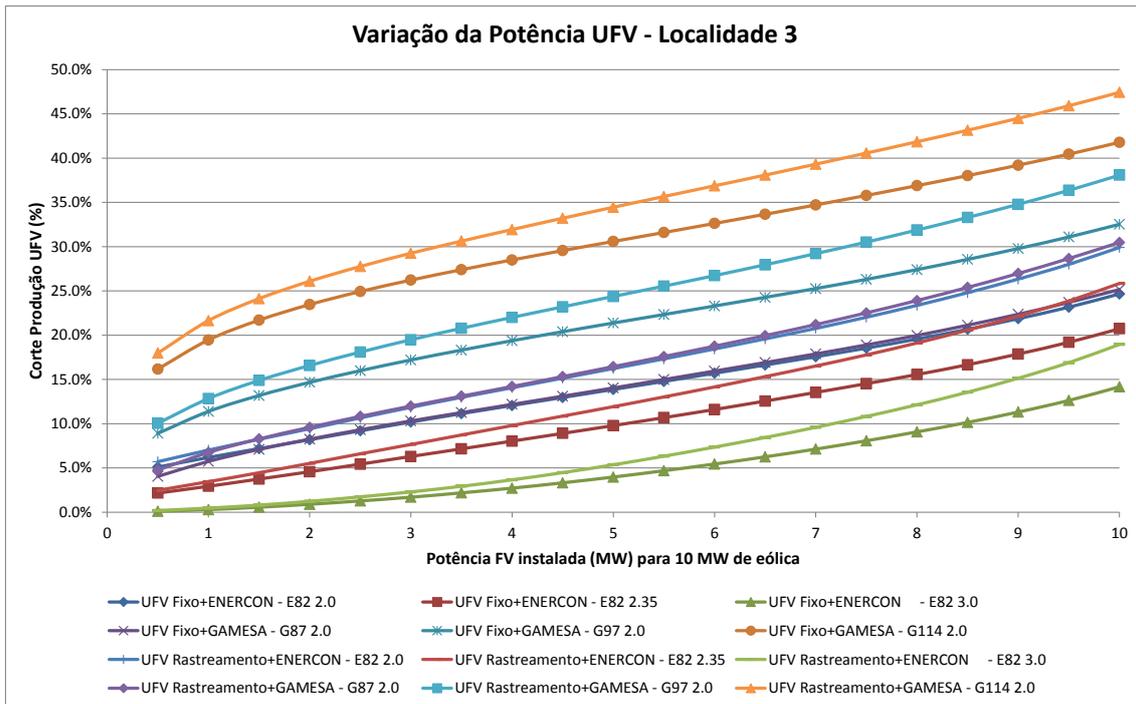


Figura 17 – Corte de energia anual em função da potência fotovoltaica instalada na localidade 3

Para a maioria das combinações simuladas, o comportamento do corte de energia é aproximadamente linear para boa parte da faixa de potências fotovoltaicas avaliadas. Novamente, é possível confirmar a forte dependência do corte com os equipamentos utilizados no projeto. Para combinações nas quais a máquina eólica opera longe de sua capacidade nominal, mesmo em proporções de 10-5 perde-se menos de 15% da energia fotovoltaica. Por outro lado, combinações onde a máquina eólica possui um fator de capacidade elevado apresentam níveis de corte superiores a 15%, mesmo para proporções baixas, como 10-0,5.

Os resultados das análises de corte mensal, corte horário e variação do corte de energia variando a potência fotovoltaica instalada para as outras 4 localidades são apresentadas no Anexo A.

6. Conclusões

Conforme abordado inicialmente, diversos estudos e notícias têm sido divulgados com a indicação de uma complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica, favorecendo a implantação das chamadas usinas híbridas. No entanto, os resultados apresentados nesta Nota Técnica mostram que esse efeito depende de diversas variáveis, reforçando a importância de uma avaliação pautada em uma metodologia consistente.

Tomando como base a métrica estabelecida, de contabilização da produção fotovoltaica que excede a capacidade de escoamento da subestação (com capacidade igual à da potência eólica instalada), verifica-se que o montante de energia não aproveitada é função, principalmente, das (i) características dos recursos energéticos locais, sobretudo do perfil diário e sazonal de ventos; e (ii) do dimensionamento e características técnicas de cada usina.

Verifica-se a partir das simulações apresentadas, que para um mesmo local, é possível obter resultados variados, a depender do dimensionamento considerado, demonstrando não ser possível generalizar resultados. Percebe-se ainda que, mesmo para sítios localizados no mesmo estado, foram obtidos resultados distintos, denotando a importância dos efeitos climáticos localizados.

Outra conclusão relevante é que não basta avaliar a eventual complementariedade de recursos (perfil de vento ou de irradiação global horizontal, por exemplo), uma vez que a curva de produção de energia elétrica pode ter comportamento distinto, a depender do dimensionamento adotado, o que fica claro ao analisar a produção eólica a partir de diferentes aerogeradores para um mesmo sítio.

Ao avaliar o excedente de produção ("curtailment"), ficou clara também a importância da discretização da base de dados. O caráter variável e estocástico das fontes avaliadas faz com que a produção apresente oscilações em curtos intervalos de tempo, o que não seria capturado ao se trabalhar com valores médios horários, por exemplo. Mesmo dispondo de dados dos recursos e da produção a cada 10 minutos, sabe-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 subestação operará no limite de sua capacidade nominal.

Pelo exposto, fica clara a importância de avaliações caso a caso, para cada local e configuração de usinas, com base em metodologia consistente, levando em consideração as medições dos recursos com bases discretizadas e por períodos extensos, de forma a contemplar a variabilidade interanual dos mesmos.

Cabe destacar que o resultado analisado em última instância neste trabalho foi a quantidade de energia proveniente da usina fotovoltaica vertida ("curtailment"). Pode haver outros critérios de análise de maior relevância para cada agente, como por exemplo, eventual redução de custos de investimento ao implantar uma usina "híbrida", melhor uso do terreno disponível, a otimização do uso das instalações de interesse restrito, dentre outros. Reforça-se também que o presente estudo não aborda questões regulatórias ou econômico-financeiras.

7. Sugestões para trabalhos futuros

As análises presentes neste estudo foram feitas apenas do ponto de vista energético, utilizando como principal indicador o percentual de energia fotovoltaica perdida. Deste modo, ainda existem outros aspectos importantes para análise das usinas híbridas, que poderão considerados em outros estudos, como por exemplo:

- metodologia para contratação e contabilização;
- normas e condições regulatórias para implantação de empreendimentos com capacidade instalada acima da potência nominal da subestação em que estão conectados;
- avaliação do impacto da inserção de grandes volumes de usinas híbridas em uma mesma subáreas ou áreas do SIN.

Ademais, dado que os cortes de energia são mais dependentes do comportamento do recurso eólico, pode-se avaliar se, quando não existem dados medidos localmente, as análises poderiam utilizar o Ano Meteorológico Típico (TMY) ou dados reais medidos em locais com distância acima de 20 km. Desta forma, as restrições de localização e período de análise seriam relacionadas apenas aos dados anemométricos disponíveis, permitindo avaliação dos efeitos da variabilidade eólica interanual.

8. Referências

Duffie & Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3ª Edição, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.

EPE (a). Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos. Série Recursos Energéticos. EPE-DEE-RE-057/2016 – r1. Dezembro de 2016.

EPE (b). Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica. EPE-DEE-RE-065/2013-r3. Março de 2016

EPE (c). Algumas estatísticas obtidas da simulação da geração eólica na região Nordeste. EPE-DEE-RE-107/2016. Dezembro de 2016.

IRENA. *Planning for the renewable future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2017.

ANEXO A – Análises adicionais para as demais localidades

São apresentados, para as 4 localidades que não foram abordadas no texto principal, os resultados de corte de energia fotovoltaico em função do mês ou da hora do dia, além da variação no corte em função da potência fotovoltaica instalada.

Localidade 1

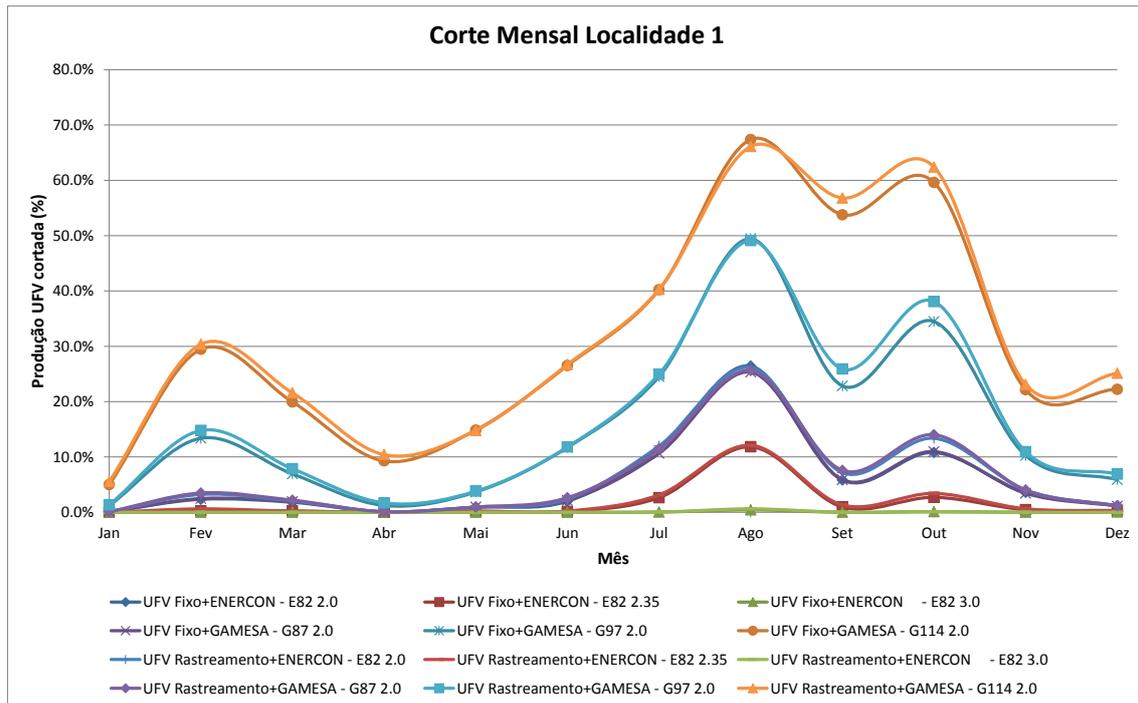


Figura 18– Corte mensal de energia para a localidade 1

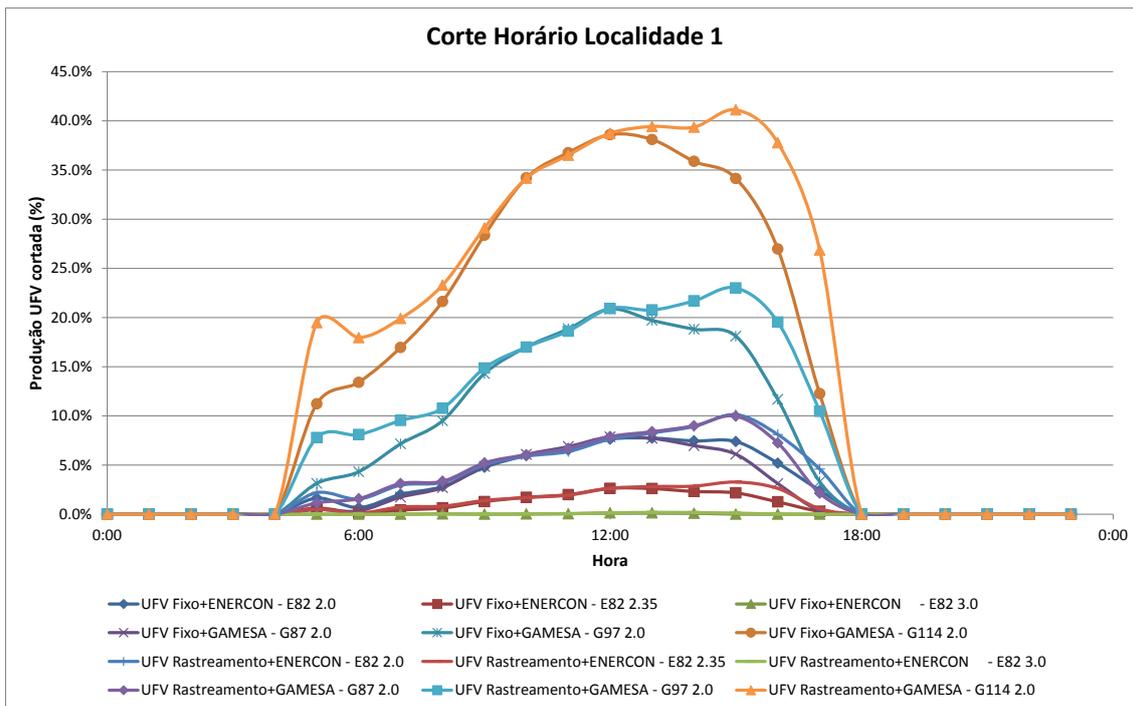


Figura 19 – Corte horário de energia para a localidade 1

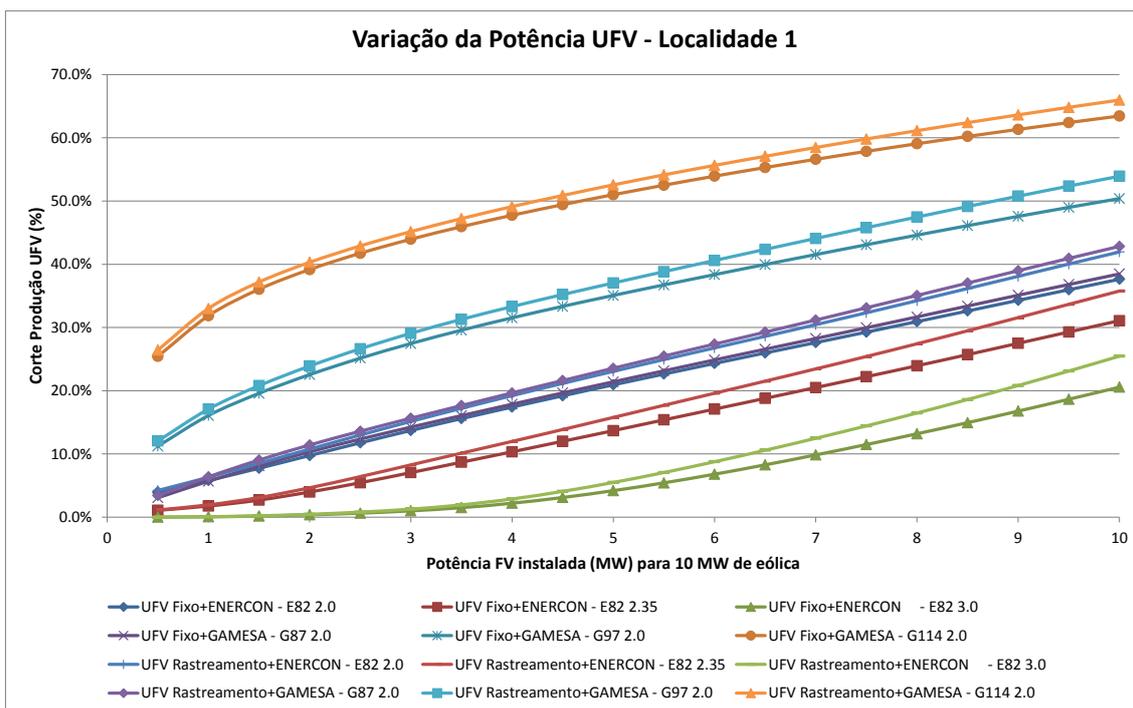


Figura 20 – Corte anual de energia em função da potência fotovoltaica instalada na Localidade 1

Localidade 2

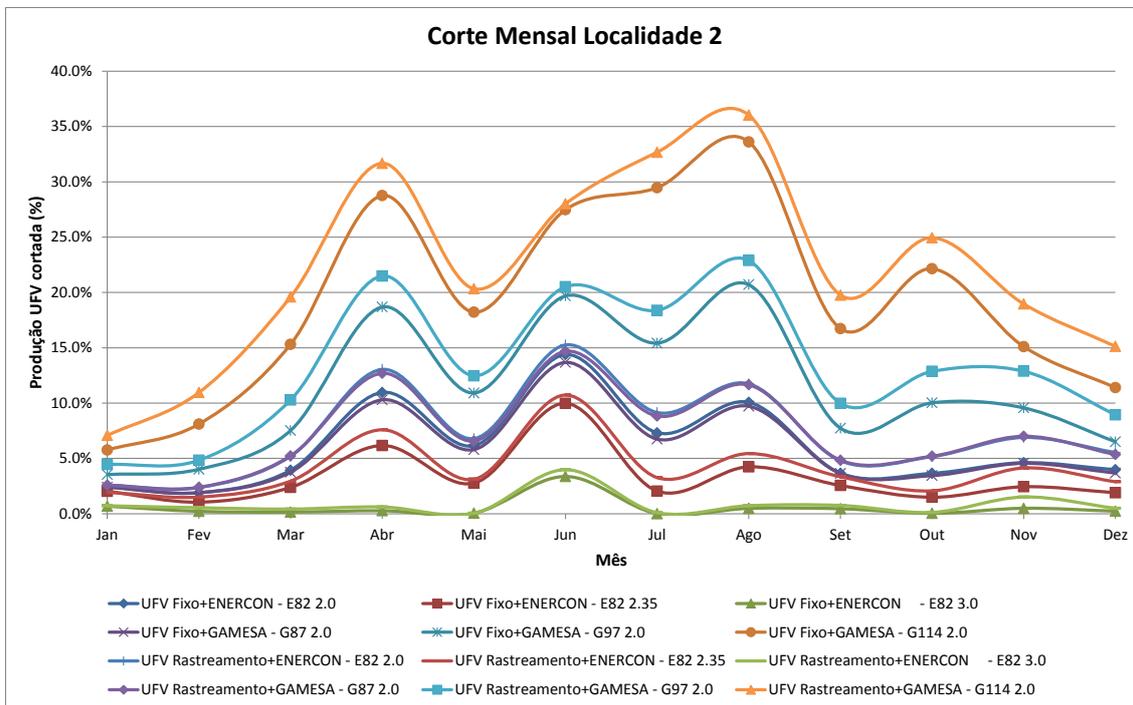


Figura 21 – Corte mensal de energia para a localidade 2

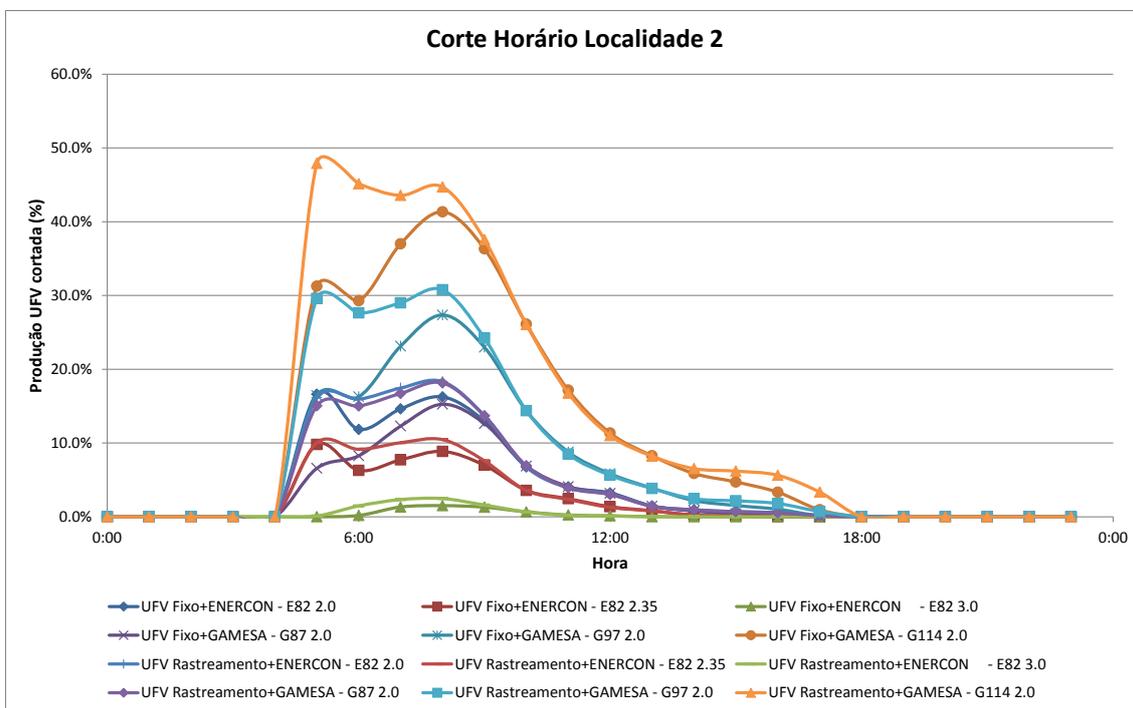


Figura 22 – Corte horário de energia para a localidade 2

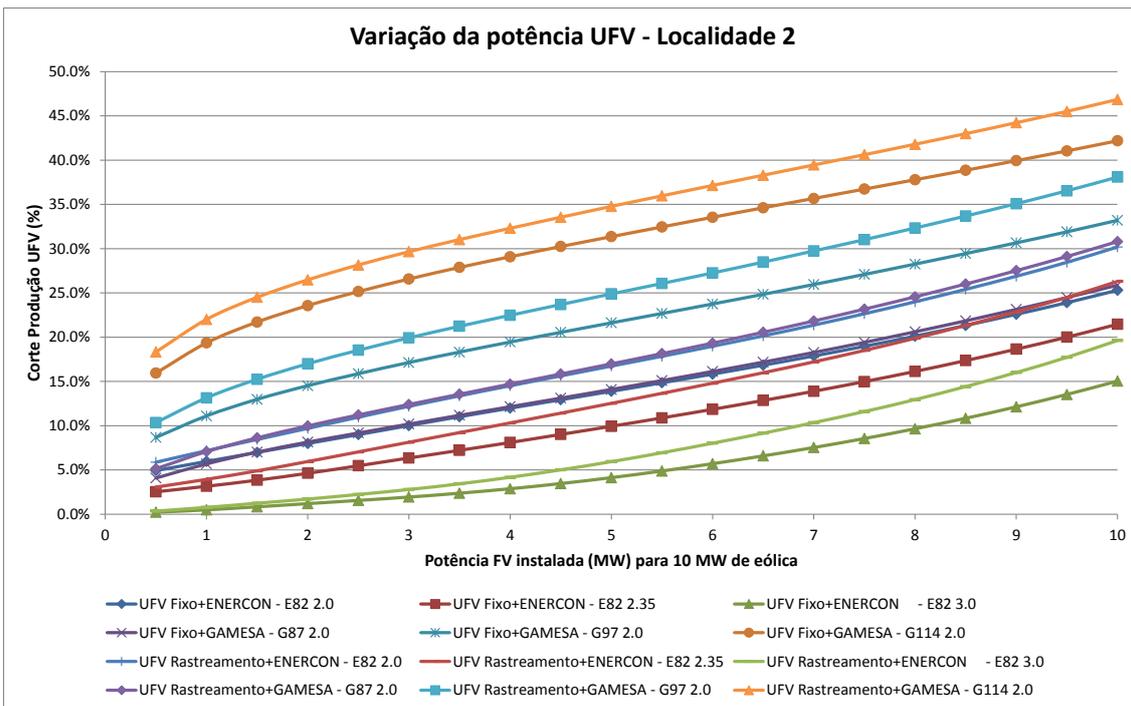


Figura 23– Corte anual de energia em função da potência fotovoltaica instalada na Localidade 2

Localidade 4

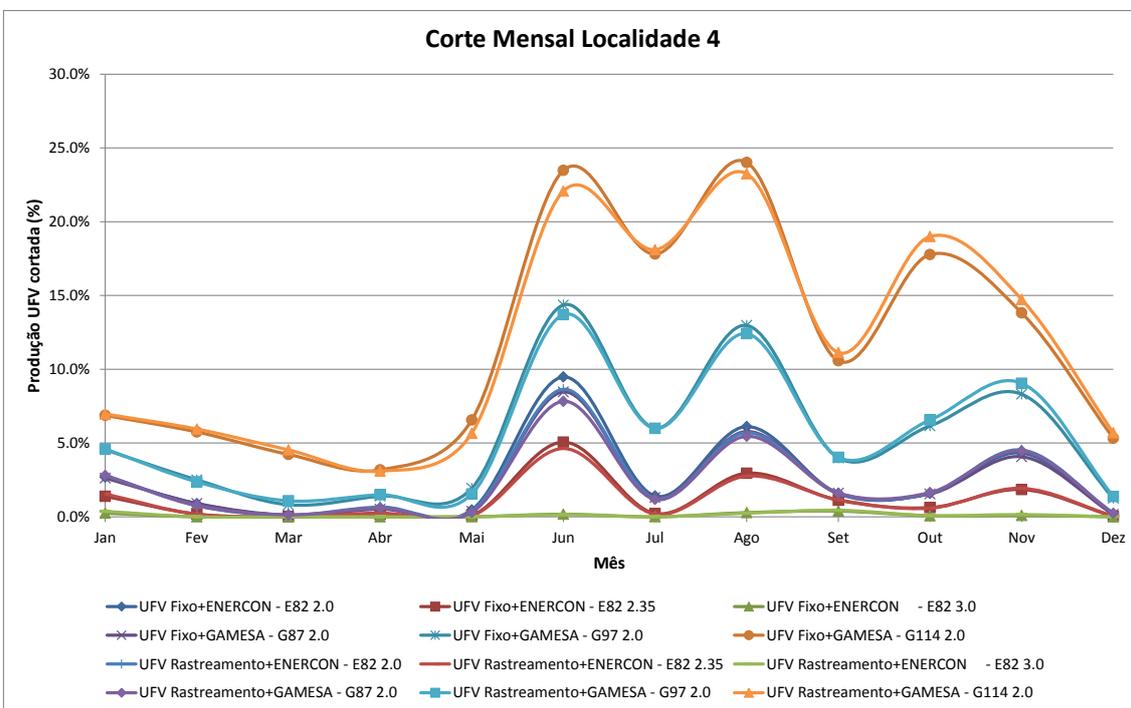


Figura 24 - Corte mensal de energia para a localidade 4

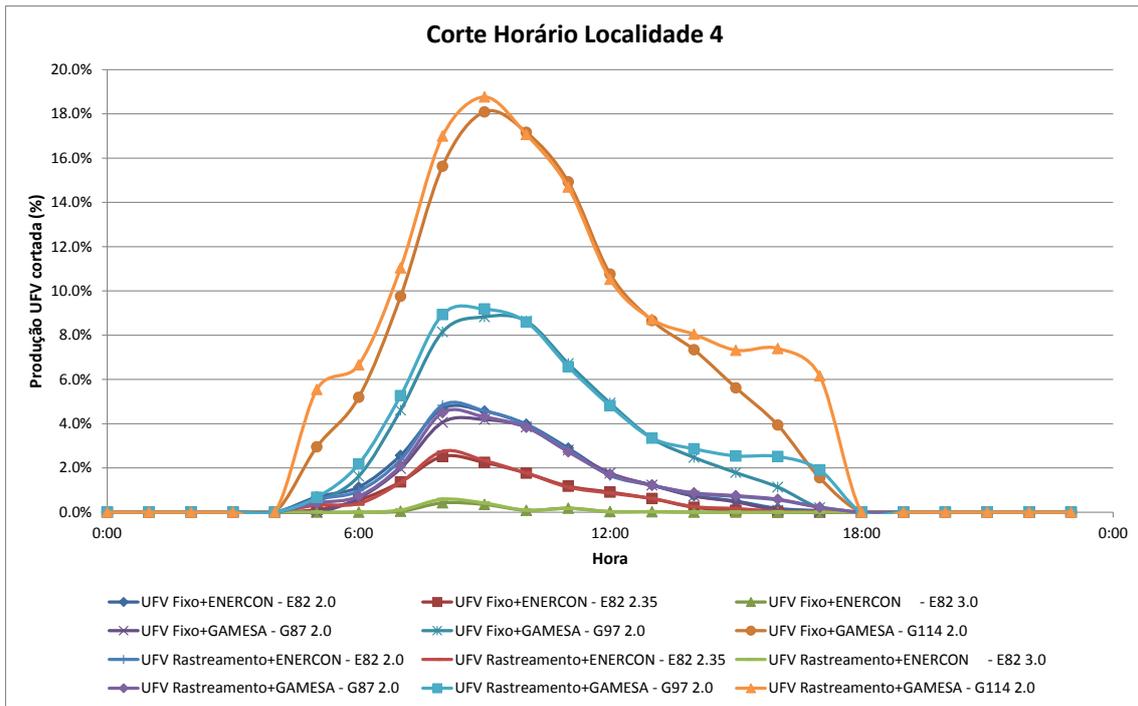


Figura 25 – Corte horário de energia para a localidade 4

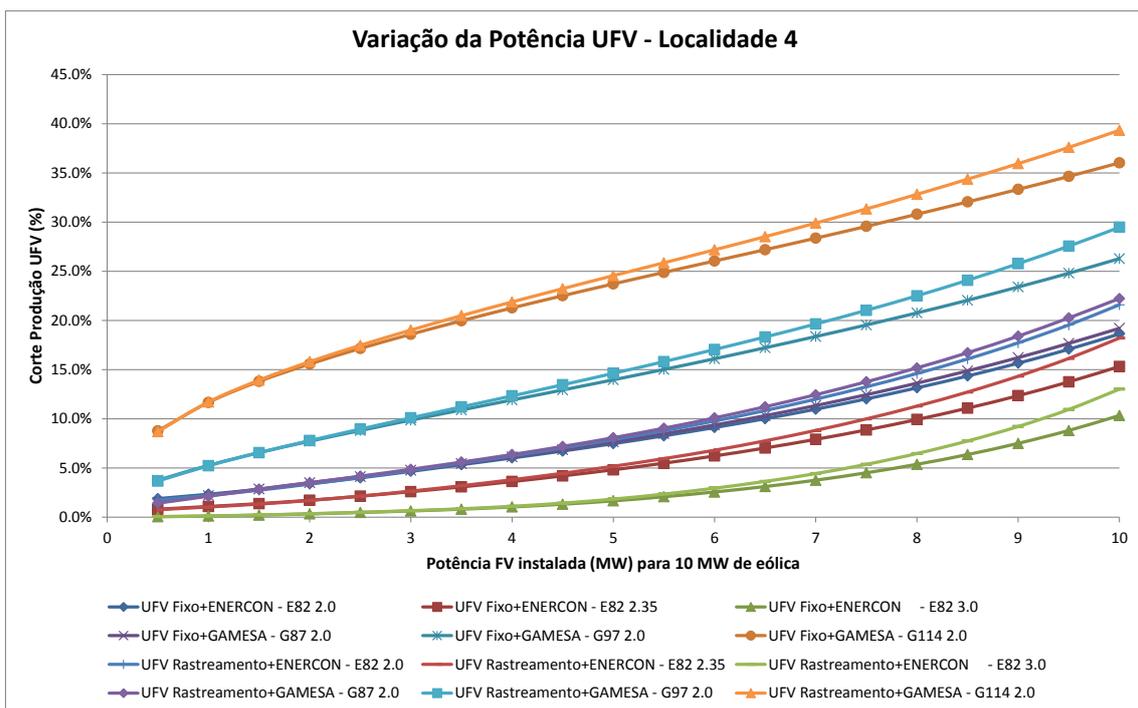


Figura 26 – Corte anual de energia em função da potência fotovoltaica instalada na Localidade 4

Localidade 5

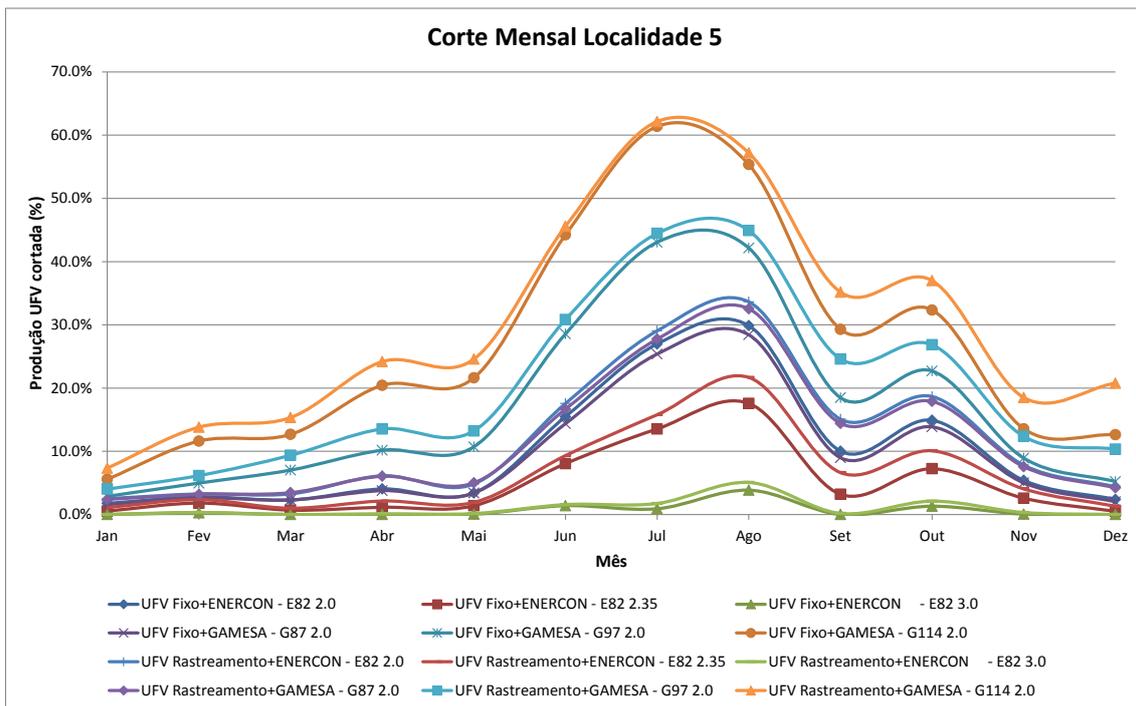


Figura 27 - Corte mensal de energia para a localidade 5

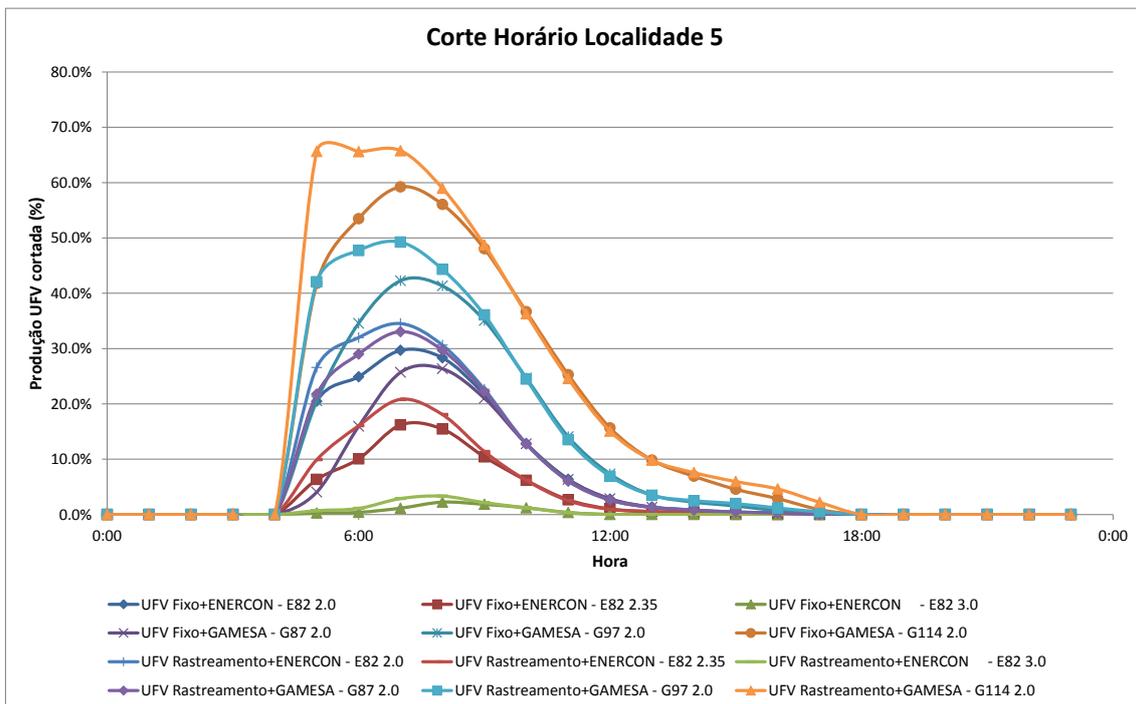


Figura 28 – Corte horário de energia para a localidade 5

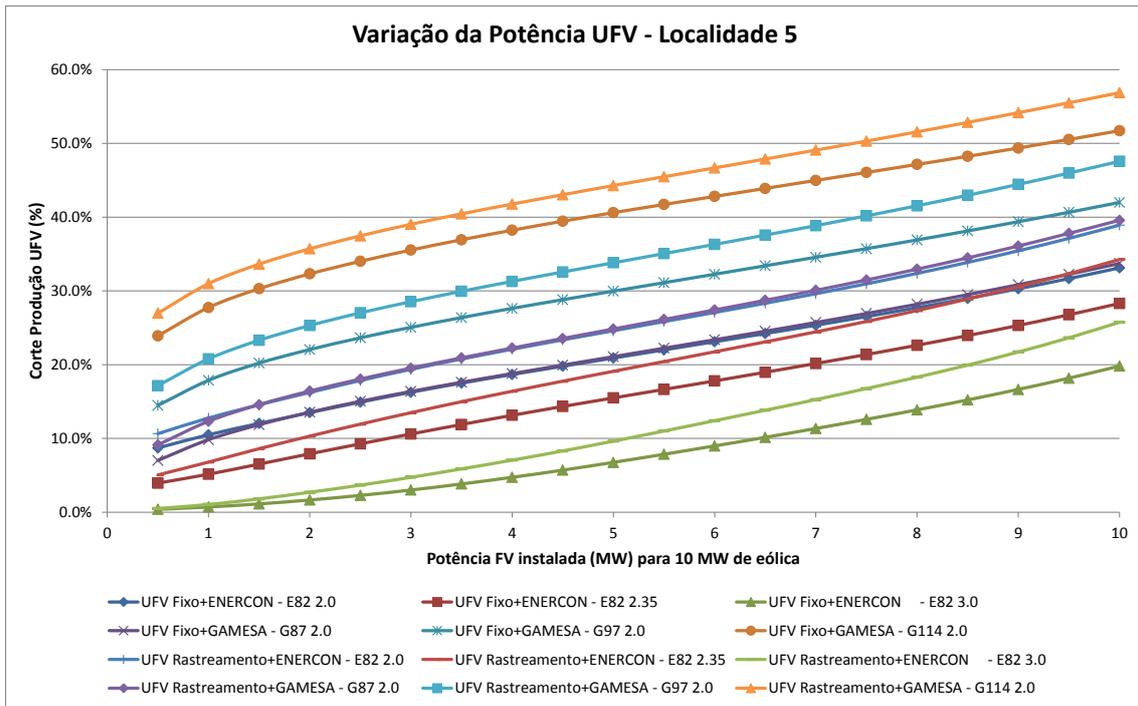


Figura 29 – Corte anual de energia em função da potência fotovoltaica instalada na Localidade 5