

Exploração da Complementaridade Eólica - Solar no Uso Eficiente dos Contratos de Uso do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica

Rafael B. S. Veras* Augusto A. A. Chaves** Clovis B. M. Oliveira***
Denisson Q. Oliveira Osvaldo R. Saavedra Shigeaki L. de Lima
Daniel O. Cortes

* *Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,
MA, (e-mail: rafael.brito@discente.ufma.br).*

** *Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,
MA, (e-mail: augusto.aranha@discente.ufma.br)*

*** *Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,
MA, (e-mail: clovis.oliveira@ufma.br)*

*Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA,
(e-mail: dq.oliveira@ufma.br)*

*Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA,
(e-mail: o.saavedra@ieee.org)*

*Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA,
(e-mail: shigeaki.lima@ufma.br)*

*Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA,
(e-mail: daniel.oc@discente.ufma.br)*

Abstract: In this paper, the exploration of the complementarity between renewable sources to improve the use of the transmission capacity contracted by the generating agent considering the new rules established by the Brazilian regulatory body is proposed. To quantify the complementarity between sources, the Pearson coefficient is used. The results of the case study prove that the exploitation of complementarity through the implementation of hybrid projects based on renewable energy sources leads to significant gains in the exploitation of the transmission contract, thus bringing benefits to the generating agent.

Resumo:

Neste artigo é proposta a exploração da complementariedade entre fontes renováveis para melhorar o uso da capacidade de transmissão contratada pelo agente gerador considerando as novas regras estabelecidas pelo órgão regulador Brasileiro. Para quantificar a complementariedade entre fontes utiliza-se o coeficiente de Pearson. Os resultados do estudo de caso comprovam que a exploração de complementariedade através da implantação de empreendimentos híbridos baseados em fontes renováveis de energia permite ganhos significativos na exploração do contrato de transmissão, trazendo assim benefícios para o agente gerador.

Keywords: Complementarity; Transmission system; Renewable energy

Palavras-chaves: Complementaridade; Sistema de transmissão; Energias renováveis

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da expansão do mercado de geração de energia a partir de fontes renováveis reflete sobretudo uma percepção coletiva de preocupações com impactos ambientais causados pela exploração de fontes de energia que degradam o ecossistema. Este cenário convergiu-se em políticas públicas de incentivo ao desenvolvimento tecnológico e à consolidação de mercados e da indústria de base voltados à exploração de fontes primárias de energias renováveis, as colocando no centro dos debates dos organismos multilaterais globais (Coutinho et al., 2019).

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE 2030) estima que o Brasil, até o final do horizonte decenal, sairá de 15,9 GW em 2020 para 32,2 GW de potência eólica instalada. A previsão de crescimento dos empreendimentos de geração solar de grande porte direciona-se de 3,1 para 8,4 GW de potência instalada. Essa previsão mais modesta se deve ao fato de que grande parte da geração solar em 2030 será distribuída na condição de micro ou minigeração, tendo uma crescente de 4,2 para 24,5 GW (EPE, 2021). A região nordeste do país aparece em destaque nas projeções de geração solar FV, já que apresenta altos índices de Irradiância solar direta na superfície, atendendo o principal requisito para a viabilidade desta tecnologia de geração (Pereira et al., 2020).

Apesar de serem renováveis e promoverem a descarbonização da matriz energética, a utilização dessas fontes traz complexidade à operação devido à sua natureza estocástica e intermitente. A energia solar fotovoltaica, por exemplo, só está disponível no período diurno. Já a eólica está disponível durante o dia inteiro, porém apresenta uma intermitência que na literatura é modelada usando distribuição de Weibull, com parâmetros ajustados para cada local. Uma estratégia que se apresenta como uma solução para mitigar o aspecto da intermitência relacionada às fontes de energia renováveis variáveis (FERV) é a “hibridização” dos empreendimentos de geração através da união de fontes com características complementares entre si (Risso et al., 2018).

Em (Jurasz et al., 2020) a complementaridade é definida como a capacidade de atuar de forma complementar, sendo observada no tempo, espaço e de forma conjunta em ambos os domínios. Analogamente, (Marenda et al., 2017) descreve este conceito como a capacidade de duas (ou mais) fontes de energia apresentarem disponibilidade complementar entre elas podendo ocorrer entre fontes iguais ou de tipos diferentes.

Os diferentes perfis de intermitência de fontes primárias distintas em uma mesma localidade podem se complementar de forma temporal. Essa associação entre fontes se apresenta com potencialidade para atenuar os degraus de potência, produzidos, por exemplo, por uma passagem de nuvem sobre um painel FV ou até mesmo um aumento no vento turbulento em microescala em um parque eólico. Essa abordagem foi explorada em (François et al., 2016), (Han et al., 2019) e (Neto et al., 2020). Estes trabalhos mostram que a diversificação dos recursos energéticos resulta em curvas de geração de potência mais suaves, uniformes e previsíveis.

Ainda que se encontre na literatura trabalhos como (Castro and Crispim, 2018), (Lopez-Rey et al., 2019), (Guezgouz et al., 2021) e (Gallardo et al., 2020) que abordam complementaridade em diferentes contextos, incluindo a utilização de dispositivos de armazenamento de energia, poucas investigações tem como foco o uso da complementaridade relacionada à contratação do sistema de transmissão, o qual se propõe este estudo.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de análise da complementaridade eólico-solar à luz da melhora na eficiência dos contratos de uso do sistema de transmissão. Para tal, a partir de dados de medição em campo, são realizadas modelagens de usinas com diferentes configurações de potência instalada. As usinas são então avaliadas com o uso de diversos índices, inclusive o coeficiente de correlação de Pearson e o Índice de Aproveitamento de Uso do Sistema de Transmissão (IAMUST), proposto neste trabalho.

2. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

O Coeficiente de correlação de Pearson é uma métrica estatística que mostra o quão duas variáveis distribuídas de forma aleatória estão relacionadas uma à outra. É um valor que varia de -1 a 1. Um valor de correlação próximo ou igual a 1 representa uma relação linear positiva entre as variáveis, ou seja, a complementaridade é mínima nesse

cenário. Além disso, o coeficiente de correlação assume um valor nulo ou próximo disso quando o conjunto de valores não possuem relação linear direta. E por fim, um coeficiente com valor próximo ou igual a -1 indica que as duas variáveis são altamente complementares. O valor do coeficiente de correlação é obtido através da divisão da covariância entre as duas variáveis pela multiplicação dos desvios padrões das duas variáveis, como é visto em (1).

$$\text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad (1)$$

Na qual:

$\text{cov}(X, Y)$ é a covariância entre as variáveis X e Y ;

$\sigma(X)$ e $\sigma(Y)$ são os desvios padrões das variáveis X e Y .

Desta forma, esperar-se-á um valor de coeficiente de correlação próximo a -1, quando se observa, por exemplo, numa mesma localidade, melhores condições de vento durante a noite e condições de radiação solar e temperatura propícias à alta produção fotovoltaica.

3. CONTRATAÇÃO DO ACESSO AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Os Contratos de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) são regulamentados, principalmente, pela Resolução Normativa nº 666, de 23 de junho de 2015 da ANEEL (ANEEL, 2015). Essa resolução determina que o Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST), em MW contratado pelo empreendimento, por um período de 4 anos, é dado através do valor declarado pelo usuário da máxima potência elétrica injetável no sistema e que deverá ter valor no mínimo igual à potência instalada subtraída da mínima carga própria. Sendo assim, os encargos de uso do sistema de transmissão a serem pagos pela central geradora são descritos em (2).

$$\text{Encargos de uso}[R\$] = TUST \left[\frac{R\$}{MW} \right] MUST[MW] \quad (2)$$

Na qual:

TUST é a tarifa do uso do sistema de transmissão;

MUST é o montante do uso do sistema de transmissão contratado.

Embora a legislação vigente determine como regra que o MUST contratado seja a potência instalada, subtraída do próprio consumo, com o intuito de promover o incentivo da instalação de empreendimentos híbridos, a ANEEL homologou em de 30 de novembro de 2021 a REN Nº 954, na qual fica estabelecido o conceito de faixa de potência, correspondendo ao intervalo entre a potência nominal da fonte de energia predominante e a soma total de todas as fontes compreendidas na planta de geração, conforme o esquema ilustrado pela figura 1 (ANEEL, 2021).

Como forma de mitigar o efeito da sazonalidade percebida anualmente, a nova regulamentação permite ao usuário a redução não onerosa de 5 % no MUST contratado uma vez ao ano.

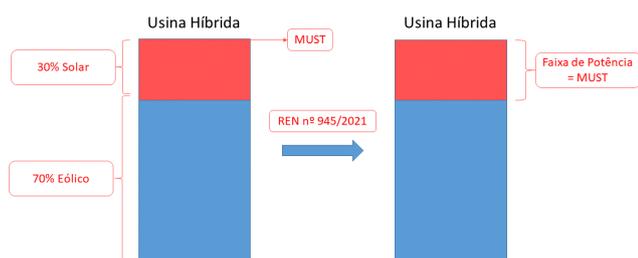


Figura 1. Faixa de potência escolhido pelo usuário.

Sendo a ANEEL, através de resoluções normativas, responsável pela regulamentação do uso do sistema de transmissão, o Operador Nacional do Sistema (ONS) fica responsável pela execução das cobranças e monitoramento do uso pelas unidades geradoras e consumidoras como ilustra o esquema na Fig. 2.

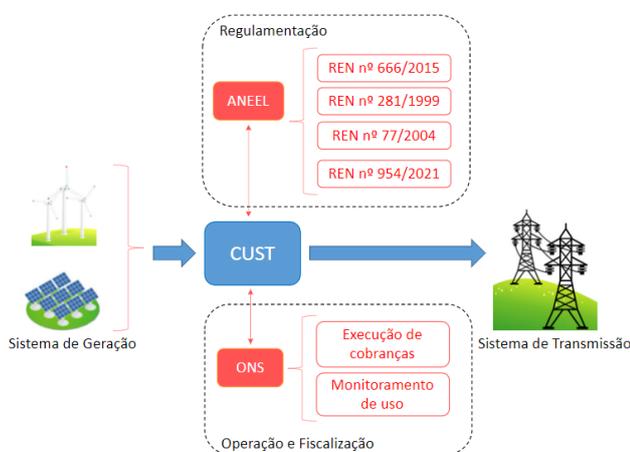


Figura 2. Execução de cobrança e regulamentação do uso do sistema de transmissão.

O MUST verificado ($MUST_v$) utilizado no processo de monitoramento dos encargos é obtido do Sistemas de Medição para Faturamento (SMF) e do Sistema de Coleta de Dados de Energia (SCDE), de acordo com o esquema da Fig. 3.

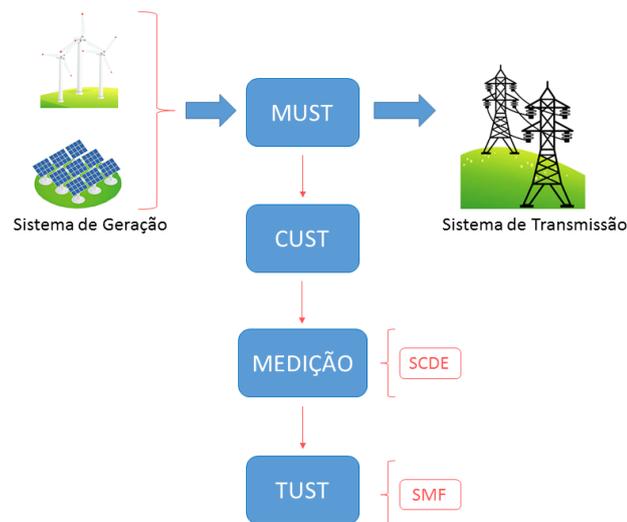


Figura 3. Tarifação do Uso do Sistema de Transmissão.

Para a obtenção do $MUST_v$ são apuradas as injeções de energia no ponto comum de conexão. Esses valores são obtidos em kWh por período com medições para cada intervalo de 5 minutos e são convertidos para dados de potência média equivalente, em MW, a cada 15 minutos, como descreve (3) para unidades geradoras.

$$PM_{15} = \frac{4[(PM_{5G1} + PM_{5G2} + PM_{5G3}) - (PM_{5C1} + PM_{5C2} + PM_{5C3})]}{1000} \quad (3)$$

Sendo:

PM_{15} a potência média a cada 15 minutos para o ponto de medição (MW);

PM_{5G_i} a energia medida no canal de geração no período i de 5 minutos (kWh);

PM_{5C_i} a energia medida no canal de consumo no período i de 5 minutos (kWh).

Para unidades de geração, que são objeto de estudo deste trabalho, segundo a REN nº 666, o $MUST_v$, representado em (3) por PM_{15} , não pode ser superior a 1,01 do MUST contratado em caráter permanente. Caso essa referência seja violada pela unidade de geração, são aplicadas multas em reais (R\$) por Parcela de Ineficiência por Ultrapassagem (PI_u). Um ponto importante a ser levado em consideração é que a reincidência desta violação coloca a rede em risco e pode ocasionar a perda de contrato da unidade geração. Logo, soluções considerando injeções de potência na rede superiores ao contrato não serão consideradas. É assumido, como indica a REN Nº 954, que a unidade de geração lida com a sua energia excedente sem injetá-la na rede.

4. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, avalia-se um cenário hipotético de uma usina híbrida em Alcântara-MA a partir de uma campanha de medição de dados microatmosféricos realizada no ano de 2019, considerando a problemática do MUST contratado.

4.1 Base de Dados

Os dados são provenientes de uma torre anemométrica de 72 metros de altura que está localizada na cidade de Alcântara no estado do Maranhão, Brasil, com um intervalo de 10 minutos. Já os dados de Irradiância solar têm intervalo de aquisição de 1 minuto e são medições realizadas no mesmo período e localização das medições eólicas. A figura 4 ilustra uma média horária dos dados eólico e solar.

A tabela 1 apresenta os valores mensais do coeficiente de correlação eólico-solar dos dados vistos na Fig. 4.

Tabela 1. Coeficiente de correlação entre as fontes eólica e solar.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
-0,54	-0,17	-0,29	-0,42	-0,36
Jun	Jul	Ago	Set	Out
-0,45	0,25	0,21	0,23	-0,28

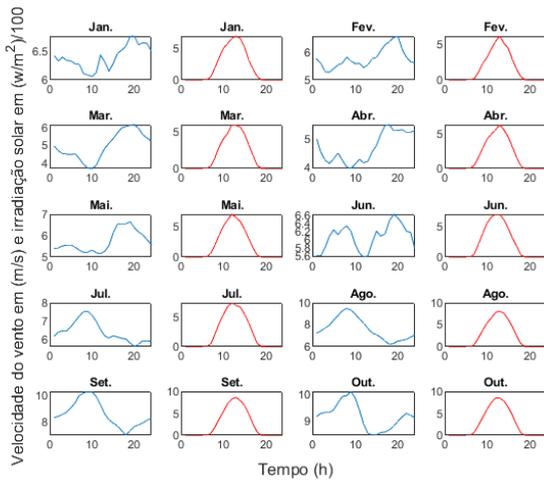


Figura 4. Dados de velocidade do vento (azul) e Irradiância solar(vermelho).

Os meses com maior complementaridade entre as fontes são janeiro e junho, com valores de coeficiente de correlação a -0,54 e -0,45 respectivamente, correspondendo a aqueles períodos com menor velocidade do vento em horário de pico de Irradiância solar.

4.2 Avaliação das Usinas Híbridas

Adotou-se como caso base as condições de operação de um parque eólico, sem hibridização, cujas injeções de potência foram calculadas a partir de dados obtidos entre os meses de janeiro e outubro do ano de 2019. Os dados de novembro e dezembro deste ano não foram computados por se encontrarem indisponíveis.

De forma a atender os requisitos da REN Nº 77 de 18 de agosto de 2004, que estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas de transmissão, e para manter no mesmo padrão que é praticado nacionalmente devido a essa REN, a planta modelada tem potência instalada de 30 MW (ANEEL, 2004). O modelo de aerogerador selecionado é o E-115 ENERCON com potência nominal de 3000 kW, assim, um parque 100 % eólico teria 10 unidades instaladas. A conversão solar é realizada com o painel da Canadian Solar CS6K- 310 Wp. A eficiência deste modelo é de 18.94 % com uma potência nominal de 310 Wp.

A Fig. 5 ilustra o comportamento de uma planta eólica com geração baseada nos dados de vento para o mês de janeiro. Os números que preenchem a matriz correspondem à porcentagem de frequência de ocorrência na hora representada pelas colunas da matriz. Na coordenada (1,2) da matriz, por exemplo, tem-se o número 0,6, significando que 0,6 % das amostras de potência, ocorridas entre 2 e 3 horas daquele mês, estiveram dentro da faixa de 90 a 100 % da potência nominal do empreendimento.

A matriz do mês de janeiro representada pela Fig. 5 mostra que haveria uma grande ociosidade no MUST contratado para escoar a geração desta planta. Nota-se que há uma grande concentração de geração entre 0 e 20 % no período das 4 às 11 horas da manhã. Para analisar o quanto a adição da segunda fonte melhora

o uso do MUST contratado, simulou-se, no mesmo mês de janeiro, período com melhor complementaridade entre as fontes, um cenário no qual 10 % da geração desta planta seria proveniente de fonte solar. A Fig. 6 ilustra o comportamento desta planta híbrida.

Nota-se uma modesta melhora na distribuição da potência gerada pelo empreendimento no período diurno. A concentração de potência que ocorria entre 0 e 10 % do MUST total, agora se encontra ligeiramente espalhada neste cenário. Como forma de medir esse desempenho da adição da segunda fonte, se propõe um indicador que quantifica a performance do uso do MUST contratado. Trata-se do Índice de Aproveitamento do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (IAMUST).

4.3 IAMUST

Neste trabalho é proposto o IAMUST, índice que aponta a eficiência do contrato de uso do sistema de transmissão. Este indicador é similar ao fator de capacidade, mas com a possibilidade da redução do valor da potência instalada. Tem o objetivo de indicar a eficiência da transmissão contratada mesmo quando este valor não é igual à potência instalada. A equação (4) descreve o cálculo deste índice.

$$IAMUST = \frac{\sum_0^n PG_i - PGE_i}{nMUST_c} \quad (4)$$

Na qual:

PG_i = Potência que a usina está gerando no instante i (kW);

PGE_i = Potência excedente gerada no instante i , ou seja, em caso de ultrapassagem da potência contratada, corresponderá à diferença entre a potência gerada e a potência contratada (kW). Quando não houver ultrapassagem, este valor será nulo.

n = número total de amostras.

Um valor ideal igual a 1 implica em uma planta elétrica que sempre entrega à transmissão 100 % do montante contratado. Já uma planta com IAMUST igual a 0,1 entrega, no período analisado, 10 % do montante contratado. A tabela 2 apresenta os valores de IAMUST para os meses de janeiro a outubro de 2019 em uma planta híbrida com variação de proporção da penetração entre as fontes, considerando que o MUST contratado corresponderá à soma das potências nominais das duas fontes de geração. A planta analisada tem variação entre totalmente eólica, 0/10, a 50 % eólica e 50 % solar, 5/5.

Tabela 2. IAMUST para diferentes proporções de potência instalada.

Sol- Vento	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
0/10	0.32	0.24	0.15	0.13	0.23	0.26	0.31	0.47	0.60	0.69
1/9	0.31	0.23	0.16	0.14	0.23	0.25	0.30	0.45	0.56	0.64
2/8	0.30	0.22	0.16	0.14	0.22	0.25	0.29	0.43	0.53	0.60
3/7	0.29	0.21	0.16	0.14	0.22	0.24	0.28	0.40	0.49	0.56
4/6	0.27	0.20	0.16	0.15	0.21	0.24	0.27	0.38	0.46	0.51
5/5	0.26	0.20	0.16	0.15	0.21	0.23	0.26	0.35	0.42	0.47

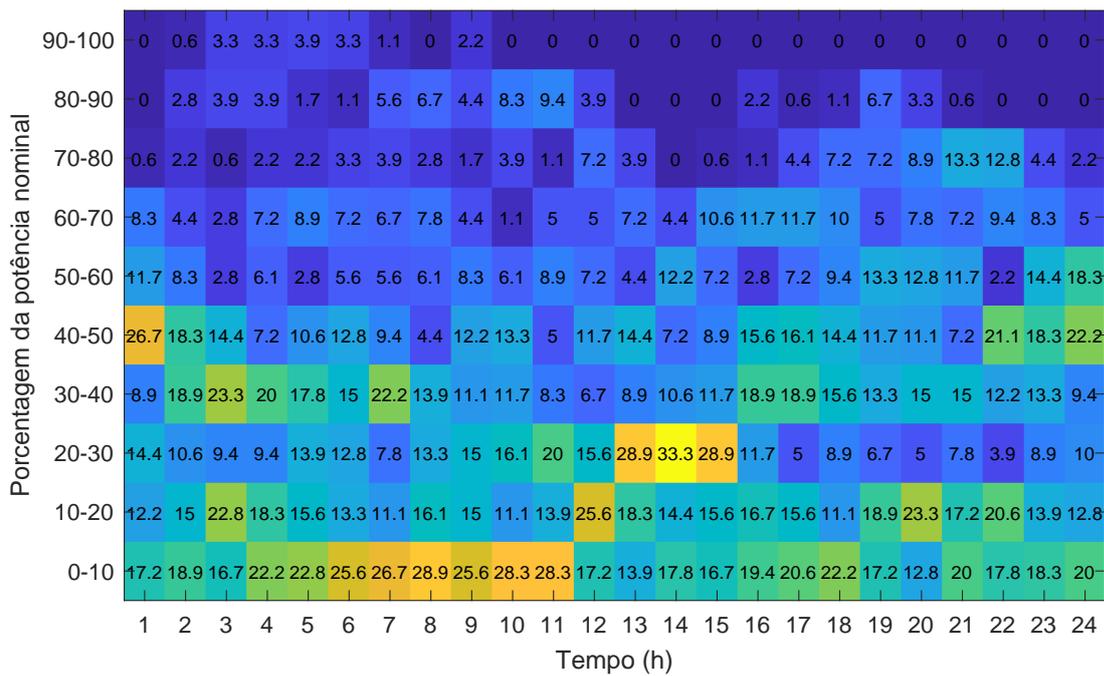


Figura 5. Ocorrência de geração eólica durante o mês de janeiro.

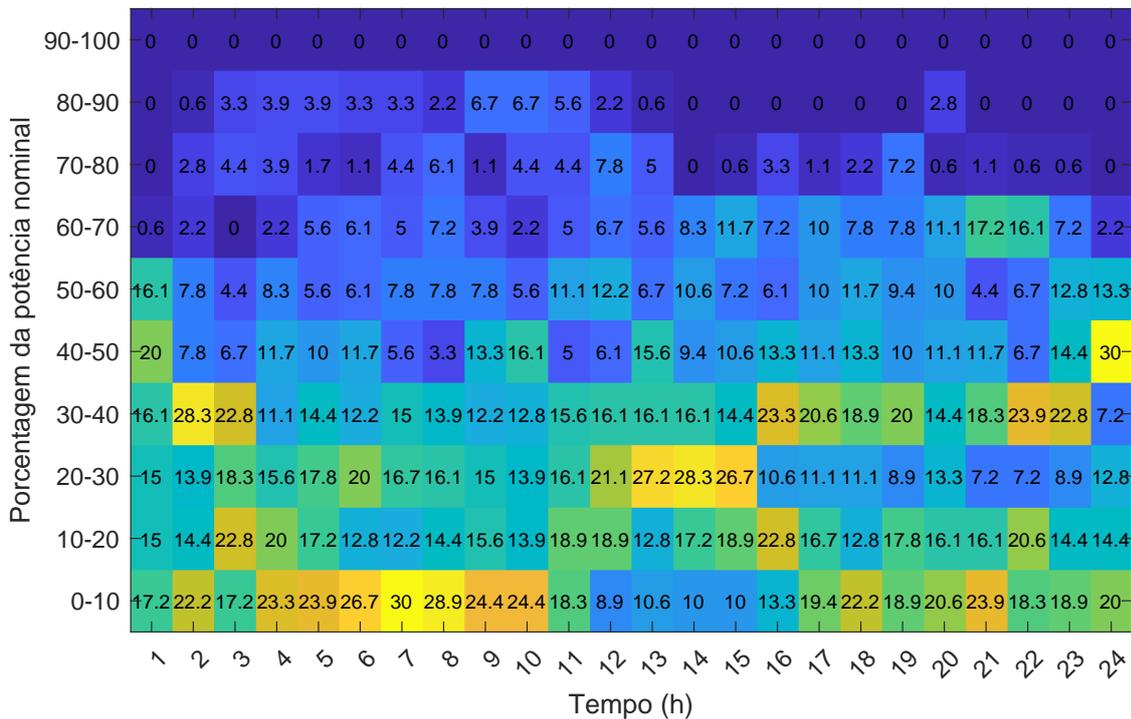


Figura 6. Ocorrência de geração híbrida durante o mês de janeiro.

Nos meses com melhor correlação entre fontes, janeiro e junho, nota-se queda no IAMUST ao passo que a parcela de geração solar aumenta. Esse padrão também é evidente nos meses com pior complementaridade entre fontes, meses com coeficiente de correlação positivo. Essa inconsistência entre correlação e IAMUST ocorre devido ao volume de

geração proporcionado pela fonte eólica nesse período ser maior que o solar. Portanto, a substituição da fonte eólica pela solar nestes meses derruba o IAMUST mesmo quando há complementaridade entre os recursos energéticos. Os únicos dois meses que apresentam melhora no IAMUST com o aumento da parcela de potência solar instalada são

abril e março. Esse aumento no IAMUST ocorre devido à geração eólica nestes meses ser muito baixa.

Observa-se que na maioria dos meses não há um ganho no aproveitamento do MUST com a adição da segunda fonte e que nos meses em que há uma melhora, março e abril, este valor é inexpressivo, pois a geração eólica é muito baixa potencializando a contribuição da fonte solar para a melhoria do IAMUST.

Destaca-se também que nos meses com melhor condição climática de vento, agosto, setembro e outubro, o IAMUST cai muito quando a fonte solar é adicionada. Isso se deve ao fato de o parque eólico estar trabalhando muito próximo à sua potência nominal nestes meses. Fica claro que não seria economicamente vantajoso para um acordo de transmissão a hibridização de uma usina eólica no cenário regulatório anterior à homologação da REN Nº 954. Logo, deseja-se verificar como o novo cenário regulatório vigente a partir de setembro de 2021 altera a dinâmica de contratação do sistema de transmissão por usinas híbridas.

4.4 Avaliação de uma usina híbrida considerando a REN Nº 954

A REN Nº 954 estabelece que o MUST contratado poderá ser definido a partir de uma faixa de potência. Uma usina com 60 % de sua potência proveniente de fonte eólica e 40 % de fonte solar, pode acordar um contrato de transmissão de 60 a 100 % de sua potência total instalada. Para este estudo foi definido que a usina adotará uma potência total na qual 70 % será da fonte eólica e 30 % solar, cuja proporção ótima não se encontra no escopo deste trabalho. Este valor foi definido para que seja possível a variação da contratação do MUST de 70 a 100 %. A Fig. 7 ilustra o comportamento da geração desta nova usina híbrida durante o mês de janeiro.

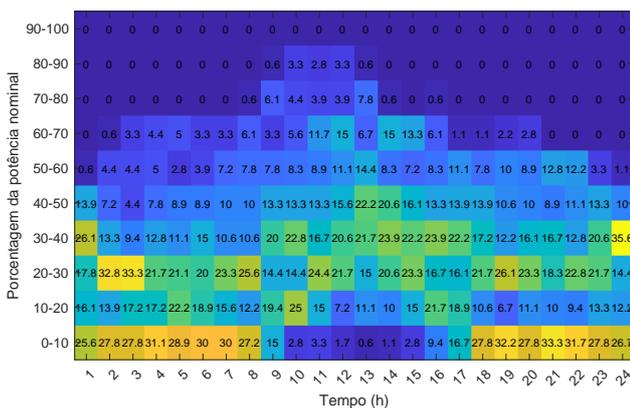


Figura 7. Ocorrência de geração híbrida durante o mês de janeiro.

Nota-se que há uma grande parcela da geração acima dos 70 % da potência nominal e essa geração ocorre sempre durante o período diurno de incidência solar. Logo, um aumento da parcela de geração solar muito acentuado reduziria as opções do usuário quanto à seleção de faixa de potência, já que a geração solar somada à eólica, durante o período de sol, atinge a potência máxima instalada da usina. Uma seleção de faixa de potência muito abaixo dos

100 % com uma planta predominantemente solar resultaria em uma grande parcela de ultrapassagem.

A tabela 3 apresenta os valores de IAMUST e de energia excedente para uma contratação de 70 % da potência instalada do sistema de geração.

Tabela 3. IAMUST para contratação de 70 % da potência instalada.

	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
IAMUST	0,41	0,30	0,23	0,21	0,31	0,34	0,40	0,56	0,68	0,76
Excedente	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,06	0,06

Nos meses de janeiro a maio não há geração expressiva de energia acima da capacidade de transmissão acordada pela usina. Por outro lado, em outubro, quando a geração eólica e solar é mais expressiva, ocorre ultrapassagem que chega a 6 %. Essa ultrapassagem ocorre em prol de uma melhora do MUST de 0,56 para 0,76. Isso representa uma melhora de 35 % no aproveitamento do MUST contratado e uma redução de 30 % no valor do contrato. Já no mês de abril ilustrado na Fig. 8, mês com geração menos expressiva, não há ultrapassagem significativa.

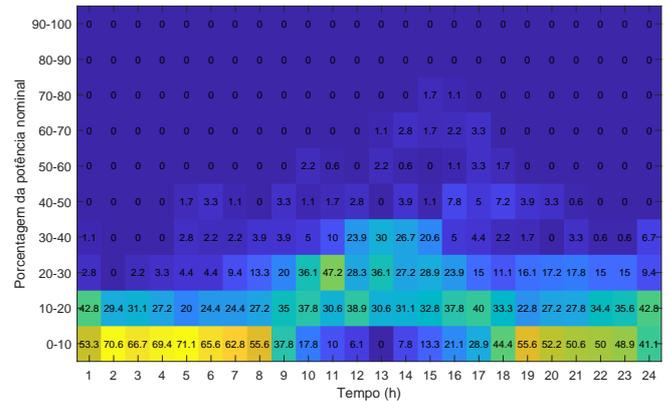


Figura 8. Ocorrência de geração híbrida durante o mês de abril.

De acordo com os dados da tabela 3 há uma sazonalidade na geração de energia elétrica através das fontes eólica e solar na região do Maranhão. Essa sazonalidade é ilustrada Fig. 9. No mês de outubro, por exemplo, a velocidade média dos ventos está em torno de 9 m/s, já em março fica na faixa dos 5 m/s.

Para mitigar o impacto da sazonalidade nos contratos de uso do sistema de transmissão celebrados por usinas híbridas, a nova regulamentação possibilita ao usuário um ajuste do MUST contratado em 5 % uma vez ao ano. Analisa-se em seguida, por tanto, um cenário no qual é aplicada essa redução não onerosa de 5 % entre os meses de janeiro a julho. A tabela 4 apresenta os dados de IAMUST e excedente de energia gerada utilizando a redução no MUST de 75 % para 70 % da potência instaladas até o mês de julho. Com essa estratégia, o excedente de energia caiu pela metade nos meses de setembro e outubro com uma redução de IAMUST de aproximadamente 9 %.

A tabela 4 mostra que a redução de 5 % no MUST contratado, permitido pela nova regulamentação, não foi suficiente para zerar o excedente de energia gerada acima do limite do CUST, porém foi possível se reduzir esse

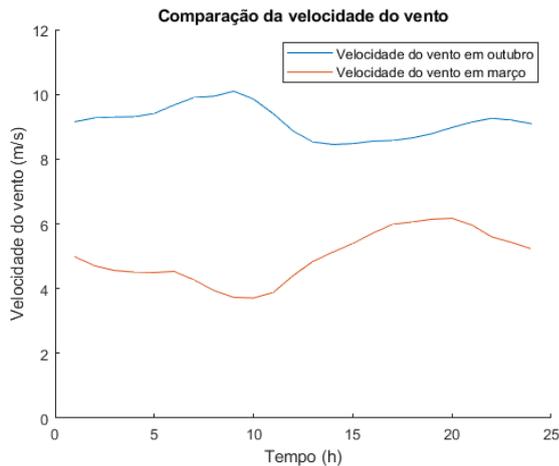


Figura 9. Velocidade do vento entre os meses de outubro e março.

Tabela 4. IAMUST para contratação de 75 % da potência instalada com ajuste sazonal.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
IAMUST	0,41	0,30	0,23	0,21	0,31	0,34	0,40	0,53	0,64	0,72
Excedente	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03

excedente pela metade. A tabela 5 compara os valores de IAMUST entre a usina somente eólica e a usina híbrida, antes e depois da nova regulamentação.

Tabela 5. IAMUST para cenários distintos.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Usina Eólica	0,32	0,24	0,15	0,13	0,23	0,26	0,31	0,47	0,60	0,69
Usina Híbrida	0,29	0,21	0,16	0,14	0,22	0,24	0,28	0,40	0,49	0,56
Usina Híbrida*	0,41	0,30	0,23	0,21	0,31	0,34	0,40	0,53	0,64	0,72

Usina Híbrida* = Cenário de usina híbrida depois da nova regulamentação

Com a hibridização da usina, a saída de potência se torna mais homogênea ao longo do dia. Esse comportamento permite ao usuário acordar faixas de potência para contratação de MUST abaixo da potência instalada, elevando o aproveitamento do MUST e reduzindo o valor pago pelo usuário pelo acesso à transmissão como mostram os dados na tabela 5.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta uma metodologia que investiga as potências de geração eólica e solar entregues à rede, o índice de aproveitamento da contratação do sistema aliado aos dados de correlação e a energia excedente na usina. Após aplicação da metodologia foi obtido uma redução no MUST 25 % a 30 % com o ônus de uma ultrapassagem de até 3 por cento nos meses de geração eólica mais expressiva. Como os encargos de uso do sistema de transmissão são diretamente proporcionais ao MUST, essa redução diminui os encargos na mesma proporção.

Apesar de não eliminar totalmente o efeito da intermitência na planta de geração, a estratégia de hibridização da usina tornou possível um amortecimento na curva de saída

de potência do empreendimento. Com o amortecimento, houve uma redução nos picos de geração que possibilitou a redução nos custos com o uso de sistema de transmissão. Portanto, fica claro que a complementaridade é uma estratégia funcional para reduzir os efeitos negativos da variabilidade das fontes renováveis.

O coeficiente de correlação de Pearson utilizado no estudo, quantificou a correlação entre as fontes eólico e solar, descrevendo a complementaridade na região estudada. Entretanto, é notório a necessidade de outras métricas de complementaridade para validar qualitativamente a associação entre fontes primárias de energia.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) código de financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), da Equatorial Energia e da Gera Maranhão.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2004). Resolução normativa aneel nº 77, de 18 de agosto de 2004.
- ANEEL (2015). Resolução normativa nº 666, de 23 de junho de 2015.
- ANEEL (2021). Resolução normativa aneel nº 954, de 30 de novembro de 2021.
- Castro, R. and Crispim, J. (2018). Variability and correlation of renewable energy sources in the Portuguese electrical system. *Energy for Sustainable Development*, 42, 64–76. doi:10.1016/j.esd.2017.10.005. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0973082617302831>.
- Coutinho, A., Ramos, D.S., Udaeta, M.E.M., and Relva, S.G. (2019). Hybrid Power Supply Assessment in Long Term Basis Considering Complementarity of Wind and Solar Resources. In *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 1–6. IEEE, Porto, Portugal. doi:10.1109/SEST.2019.8849004. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8849004/>.
- EPE (2021). Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. URL <https://www.epe.gov.br/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>.
- François, B., Hingray, B., Raynaud, D., Borga, M., and Creutin, J. (2016). Increasing climate-related-energy penetration by integrating run-of-the river hydropower to wind/solar mix. *Renewable Energy*, 87, 686–696. doi:10.1016/j.renene.2015.10.064. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115304171>.
- Gallardo, R.P., Ríos, A.M., and Ramírez, J.S. (2020). Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122323. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122323. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620323702>.
- Guezgouz, M., Jurasz, J., Chouai, M., Bloomfield, H., and Bekkouche, B. (2021). Assessment of solar and wind

- energy complementarity in Algeria. *Energy Conversion and Management*, 238, 114170. doi:10.1016/j.enconman.2021.114170. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890421003460>.
- Han, S., Zhang, L.n., Liu, Y.q., Zhang, H., Yan, J., Li, L., Lei, X.h., and Wang, X. (2019). Quantitative evaluation method for the complementarity of wind-solar-hydro power and optimization of wind-solar ratio. *Applied Energy*, 236, 973–984. doi:10.1016/j.apenergy.2018.12.059. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918318774>.
- Jurasz, J., Canales, F., Kies, A., Guezgouz, M., and Beluco, A. (2020). A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, 195, 703–724. doi:10.1016/j.solener.2019.11.087. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X19311831>.
- Lopez-Rey, A., Campinez-Romero, S., Gil-Ortego, R., and Colmenar-Santos, A. (2019). Evaluation of Supply-Demand Adaptation of Photovoltaic-Wind Hybrid Plants Integrated into an Urban Environment. *Energies*, 12(9), 1780. doi:10.3390/en12091780. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/9/1780>.
- Mareda, T., Gaudard, L., and Romerio, F. (2017). A parametric genetic algorithm approach to assess complementary options of large scale windsolar coupling. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4(2), 260–272. doi:10.1109/JAS.2017.7510523. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/7894136/>.
- Neto, P.B.L., Saavedra, O.R., and Oliveira, D.Q. (2020). The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids. *Renewable Energy*, 147, 339–355. doi:10.1016/j.renene.2019.08.134. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119313217>.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., and Costa, R.S. (2020). Atlas Brasileiro de Energia Solar. 80.
- Risso, A., Beluco, A., and Marques Alves, R. (2018). Complementarity Roses Evaluating Spatial Complementarity in Time between Energy Resources. *Energies*, 11(7), 1918. doi:10.3390/en11071918. URL <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1918>.