

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

ANÁLISE DAS REGIÕES DA BAHIA COM MAIOR POTENCIAL DE HIBRIDIZAÇÃO DE USINAS EÓLICA-FOTOVOLTAICA, CONSIDERANDO A MARGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.

NINA BORDINI BRAGA(1); ANDRÉ LUIZ FONSECA BARBOSA(2); BRUNO SOARES MOREIRA CESAR BORBA(5); NATÁLIA DO VALLE ALVES SILVA(3); RAQUEL DE LUCA MATTOS (4)
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (1)

RESUMO

Análise do potencial de hibridização eólica-solar na Bahia, considerando a complementariedade entre as fontes e margem para escoamento da geração pelo sistema de transmissão. A metodologia aplicada se resume a uma análise estatística de séries históricas da velocidade do vento e da insolação total, feita a partir dos dados do INMET, sendo realizada análise de componentes principais - PCA. A metodologia, associa ainda a margem para escoamento da geração na rede, por meio de estudo em regime permanente e de complementariedade a partir de dados da EPE. O objetivo é auxiliar a tomada de decisão dos agentes.

PALAVRAS-CHAVE

Usinas híbridas/Associadas, Margem Transmissão, Eólica, Fotovoltaica, PCA.

1.0 INTRODUÇÃO

No cenário Brasileiro a geração híbrida ganhou destaque com a justificativa de que a complementariedade entre determinadas fontes possibilita otimização e melhor utilização do sistema de transmissão. Além de promover maior previsibilidade, a partir da complementariedade em função do perfil de geração de diferentes fontes, sendo o caso da geração eólica e fotovoltaica, no qual é notório que em algumas regiões do Brasil a incidência de ventos é maior durante a noite e notoriamente de sol apenas durante o dia. Em razão disso, os benefícios são potencializados, sendo o fator de capacidade otimizado, trazendo implicações futuras como postergação de investimentos na transmissão.

Conforme (1), a Tarifa do Uso da Transmissão (TUST) e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) representam os principais custos operacionais de usinas. Assim, com a implantação da lei nº 14.120/2021 (2), criada a partir da Medida Provisória (MP) nº 998 (3) de 2020, que na busca da racionalização dos subsídios retira, em um prazo determinado, os incentivos tarifários de agentes geradores de fontes renováveis, acarretará aumento dos encargos de uso do sistema de transmissão (EUST) pagos por esses agentes. Deste modo, a contratação híbrida/associada possibilita o compartilhamento de Montante do Uso do Sistema de Transmissão (MUST) ou de distribuição (MUSD), podendo assim reduzir significativamente os custos de operação destas usinas e trazer maior modicidade tarifária aos consumidores. Nessa perspectiva, a contratação do MUST/MUSD de forma otimizada consiste na análise central para promover os projetos híbridos/associados. Haja vista que, com a contratação de um único MUST, inferior ao somatório das potências instaladas dos projetos, promove alívio na contratação do uso do sistema de transmissão, reduzindo os encargos a serem remunerados pelos geradores, bem como otimizando as instalações de interesse restrito e consequentemente postergando ampliações e reforços no sistema (4).

A seleção de um local ideal para a implantação de usinas híbridas eólico-solar depende de diversos fatores, tais como irradiação solar, velocidade do vento, topografia, complementariedade entre as fontes, capacidade de escoamento do sistema de transmissão (margem da transmissão), mapeamento de áreas com proteção ambiental, dentre outros. Portanto, é necessário aplicar uma metodologia que permita a integração e o processamento de todos os dados considerados. Na literatura existem diversas metodologias e ferramentas para auxiliar na tomada de decisão para fins de escolha do melhor local para tal, e não existe melhor método, depende da aplicação e situação específica.

Dentre os métodos existentes a análise multicritério - *Multi-criteria Analysis* (MCA) é bastante utilizada nos estudos para a avaliação da viabilidade e/ou capacidade, para fins de instalação de empreendimentos, em virtude dessa metodologia apresentar a aplicabilidade de englobar critérios distintos sem quaisquer relações. Çalişkan e Özcan realizam em (5) um estudo que elenca as melhores regiões para implantação de uma usina híbrida eólica-fotovoltaica na Turquia. Tal estudo baseia-se em dois métodos de multicritérios o *Ideal Matter Element* (IME) e o AHP com *Benefit, Opportunity, Cost and Risk* (BOCR). Em (6) Vicari faz uma análise de multicritério em conjunto com um SIG, para fins de levantamento do potencial de implantação de usinas eólicas e solares no estado do Rio Grande do Sul,

considerando o potencial energético, distâncias de infraestruturas, características do terreno e áreas de proteção ambiental, sendo gerados mapeamentos de potencial de instalação na área estudada. Em (7) a empresa de consultoria MRTS elaborou uma análise de complementariedade entre as fontes eólica e solar, com base em séries temporais medidas e oriundas de modelos de mesoescala, de nove localidades das regiões nordeste e sul do país. Concluiu-se que o estado da Bahia apresentou as melhores correlações entre as séries analisadas.

Posto isto, o presente trabalho além de identificar as regiões com maior potencial de geração eólica-solar na Bahia, realiza essa análise com base nas componentes principais. A PCA é uma técnica de análise multivariada por meio de combinações lineares, que objetiva reduzir a covariância e a variância de um conjunto de variáveis ou dimensões. Cabe destacar que, a PCA não introduz subjetividade para fins de decisão nas análises, diferentemente da técnica AHP aplicada em (5). Adicionalmente, é feita uma análise de complementariedade dessas fontes, por meio de um estudo de séries temporais de velocidade do vento e insolação/irradiação a partir dos dados energéticos disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Ademais, de forma complementar aos trabalhos (5) (6) (7), o presente estudo associa ainda o cálculo de margens de escoamento do sistema de transmissão, haja vista que a escolha de um local com margem de transmissão é fundamental para o empreendedor na tomada de decisão para fins de instalação de plantas eólica-solar. Portanto, essencial para viabilizar a implantação e o acesso do empreendimento ao SIN e, importante na escolha da melhor região para fins de hibridização.

2.0 METODOLOGIA

A metodologia empregada nesta pesquisa foi realizada em 3 (três) etapas. Em resumo, na primeira etapa, analisa a insolação/irradiação solar e vento, identificando a região do estado da Bahia com maior potencial solar e eólico. Tal análise foi feita a partir dos dados da normal climatológica obtidos no sítio eletrônico do INMET (8). A partir dos dados obtidos foram realizadas análises gráficas (*boxplot*) e estatística multivariada, análise de componentes principais – PCA (*Principal Component Analysis*).

A segunda etapa, realiza a análise da margem para escoamento da geração pelo sistema de transmissão na Rede Básica do SIN, para o ano de 2024, a fim de avaliar a viabilidade de escoamento da região. O cálculo foi feito a partir dos resultados obtidos na primeira etapa, isto é, considerou-se as subestações/barramentos próximos da área que se destacou com maior potencial de geração eólica-solar. Para tanto, foi utilizado o programa ANEREDE, baseando-se nas premissas e critérios estipuladas pelo ONS e EPE na Nota Técnica nº ONS NT 0008/2021 / EPE-DEE-RE-008-r0/2021(9). Verificou-se então as margens existentes das subestações elencadas como de maior potencial de geração eólica-solar. A partir desse resultado escolheu-se a melhor subestação considerando tanto a margem quanto o potencial eólico-solar. Adicionalmente, de posse dos resultados da segunda etapa, isto é, o melhor ponto de conexão existente no sistema de transmissão, com margem de escoamento e grande potencial eólico-solar, foi feita na terceira etapa uma análise de complementariedade da geração eólica e solar na região elencada. Tal análise, foi feita a partir de dados de geração simulados pela EPE (10), sendo realizada tanto uma análise gráfica, quanto uma correlação de *Pearson* para verificar a complementariedade.

De forma simplificada, a FIGURA 1 apresenta as principais etapas em relação a metodologia aplicada neste trabalho.

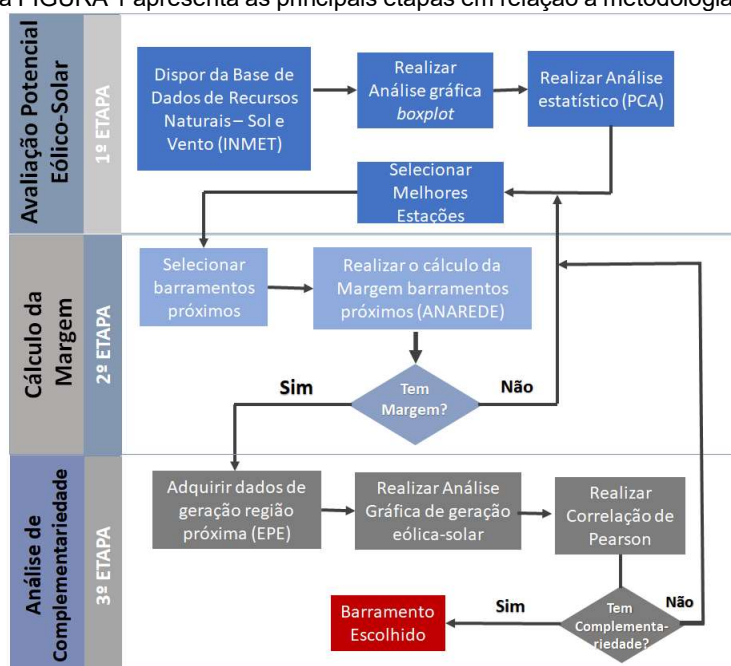


FIGURA 1 - Fluxograma da Metodologia aplicada.

3.0 ANÁLISE DO POTENCIAL DE HIBRIDIZAÇÃO DO VENTO SOLAR NO ESTADO DA BAHIA

Para análise desse trabalho considerou-se o banco de dados do INMET que utiliza estações meteorológicas automáticas e convencionais, distribuídas em todo o território nacional (8).

Como o presente trabalho se limitou a estudar o estado da Bahia, foram analisadas 27 (vinte e sete) estações disponibilizadas pelo INMET neste estado, sendo elas e as suas latitude | longitude, respectivamente (ALAGOINHAS: -12,148 | -38,425; BARRA: -11,083 | -43,16; BARREIRAS: -12,15 | 45,007; BOM JESUS DA LAPA: -13,251 | -43,405; CAETITE: -14,066 | -42,483; CANAVIEIRAS: -15,666 | -38,950; CARAVELAS: 17,739 | -39,258; CARINHANHA: -14,2833 | -43,766; CIPO: -11,083 | -38,516; CORRENTINA: -13,332 | -44,617; CRUZ DAS ALMAS: -12,666 | -39,083; GUARATINGA: -16,733 | -39,550; IRECE: -11,3 | -41,866; ITABERABA: -12,5166 | -40,283; ITIRUCU (JAGUAQUARA): -13,528 | -40,119; ITUACU: -13,812 | -41,3; JACOBINA: -11,172 | -40,534; LENCOIS: -12,5575 | -41,388; MONTE SANTO: -10,442 | -39,331; MORRO DO CHAPEU: 11,216 | -41,216; PAULO AFONSO: -9,366 | -38,216; REMANSO: -9,633 | -42,1; SALVADOR (ONDINA): 13,005 | -38,505; SENHOR DO BONFIM: -10,466 | -40,183; SERRINHA: -11,633 | -38,966; STa. R. DE CASSIA (IBIPETUBA): -11,016 | -44,516; VITORIA DA CONQUISTA: -14,883 | -40,8).

A partir dos dados obtidos da Normal Climatológica do Brasil calculados por 30 (trinta) anos (1981-2010), foram elaborados gráficos *boxplot* com objetivo de avaliar a variação anual (de janeiro a dezembro) dos dois parâmetros analisados, ou seja, de insolação total (horas) e velocidade de vento (m/s), para as estações amostrais analisadas da Bahia. Em relação à velocidade de vento (m/s) a variação foi de 1,20 (meses: janeiro a março e julho; Estação – BOM JESUS DA LAPA) a 4,8 (meses: agosto e setembro; Estação – CAETITÉ), apresentando como média total $2,69 \pm 0,8$. Ressalta-se que a estação CAETITÉ apresentou a maior média dentre as 27 estações analisadas, de $4,02 \pm 0,54$ (m/s). Já estação de IRECE apresentou a segunda maior média, com $3,91 \pm 18,50$ (m/s), conforme FIGURA 2 (a).

No que se refere à insolação total (horas) para as 27 estações, a variação de 123,70 (Mês – julho; Estação – SERRINHA) a 309,10 (Mês – Agosto; Estação – BARRA), apresentando como média total $212,46 \pm 38,08$ de insolação total (horas). Cumpre destacar que a estação BARRA apresentou a maior média dentre as estações analisadas, com $261,13 \pm 28,93$ de insolação total (horas). Já a estação de IRECE apresentou a quinta maior média, com $247,81 \pm 18,50$, e a estação de CAETITÉ a décima maior média, com $221,59 \pm 21,89$, conforme observado na FIGURA 2 (b). No entanto, avaliando os dois parâmetros, de velocidade de vento e de insolação total, tanto a estação de BARRA quanto a estação CAETITÉ apresentaram, respectivamente, uma média histórica anual de velocidade de vento e de insolação não tão expressivas. Haja vista que para se encontrar a região na qual seja factível a hibridização das fontes não basta apenas que tal região estudada apresente a maior média de vento ou insolação separadamente, é fundamental que ambas as variáveis sejam abundantes, justificando, portanto, o mínimo requisito técnico para início dos estudos para implantação da usina.

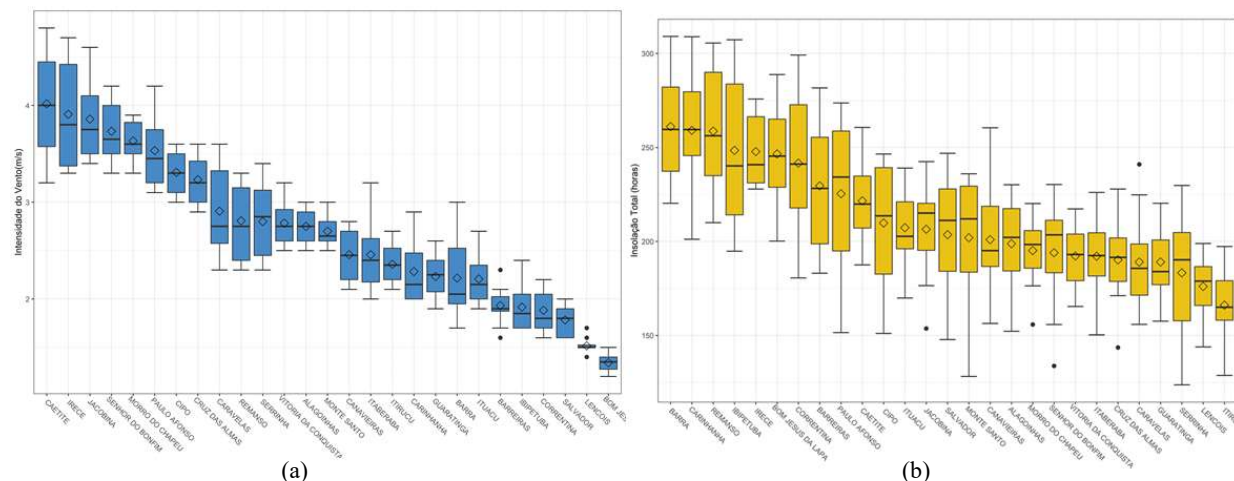


FIGURA 2 - Diagrama *Boxplot* de Velocidade de vento (m/s) e Insolação (horas) das 27 estações BA (INMET).

3.1. Análise Integrada Sol e Vento com base na análise de componentes principais – PCA

Isto posto, para avaliar a distribuição das variáveis, insolação total e intensidade do vento, foi realizada a análise de componentes principais – PCA. Técnica de análise multivariada por meio de combinações lineares, com objetivo de reduzir a variância e a covariância de um conjunto de variáveis ou dimensões (11), um procedimento estatístico multivariado que estabelece, a partir de uma matriz de correlação, um conjunto de fatores ou eixos correlacionados. Nesse sentido, foi realizada a PCA, com base nos resultados dos 02 (dois) elementos analisados, vento (m/s) e

insolação total (horas), em 27 (vinte e sete) estações, totalizando de 54 (cinquenta e quatro) análises. A técnica é utilizada para fins de redução de dimensionalidade, em um conjunto de dados com grandes variáveis, tornando mais clara a correlação dos dados, auxiliando, portanto, na interpretação dos resultados para fins da análise dos resultados obtidos. Na FIGURA 3 verifica-se que o fator 1 foi responsável por 54,88% da variância total e apresentou correlação positiva com a Intensidade do Vento. Em contrapartida, correlacionado inversamente a esse fator apresenta-se a Insolação Total. Já o fator 2 foi responsável por 45,12% da variância total, se correlacionando negativamente com ambas as variáveis analisadas (Insolação Total e Intensidade de Vento).

O posicionamento das amostras no plano do PCA corroborou com observado por meio das análises gráficas *boxplot* citadas, conforme FIGURA 2.

A partir da análise do fator 2 evidencia que as amostras foram divididas em dois grupos. Positivamente relacionadas com o fator 2 encontram-se as estações que apresentaram as menores taxas de insolação total (horas) e intensidade de vento (m/s), como por exemplo a estação meteorológica nº 27 LENÇÓIS, na qual apresentou uma das menores médias de insolação total e vento (conforme FIGURA 2) e consequentemente se encontra entre os quadrantes I e II, isto é, mais positivamente correlacionada com o Fator 2. Em contrapartida, negativamente correlacionadas com o fator 2, localizadas nos quadrantes III e IV, localizam-se as estações que apresentaram as maiores taxas de insolação total e intensidade de vento, como por exemplo a estação de nº 4 BARRA e a estação de nº1 CAETITÉ.

Outro ponto que merece destaque, é que as estações representadas na FIGURA 3 que estão mais próximas ao círculo unitário possuem maior contribuição em relação as estações que estão mais afastadas. Assim, no que se refere aquelas mais bem relacionadas com o sol e vento a estação de IRECÊ de nº 4 se destacou. Também foi verificado que as estações de PAULO AFONSO nº 7 e CAETITÉ nº 1 apresentaram bons resultados.

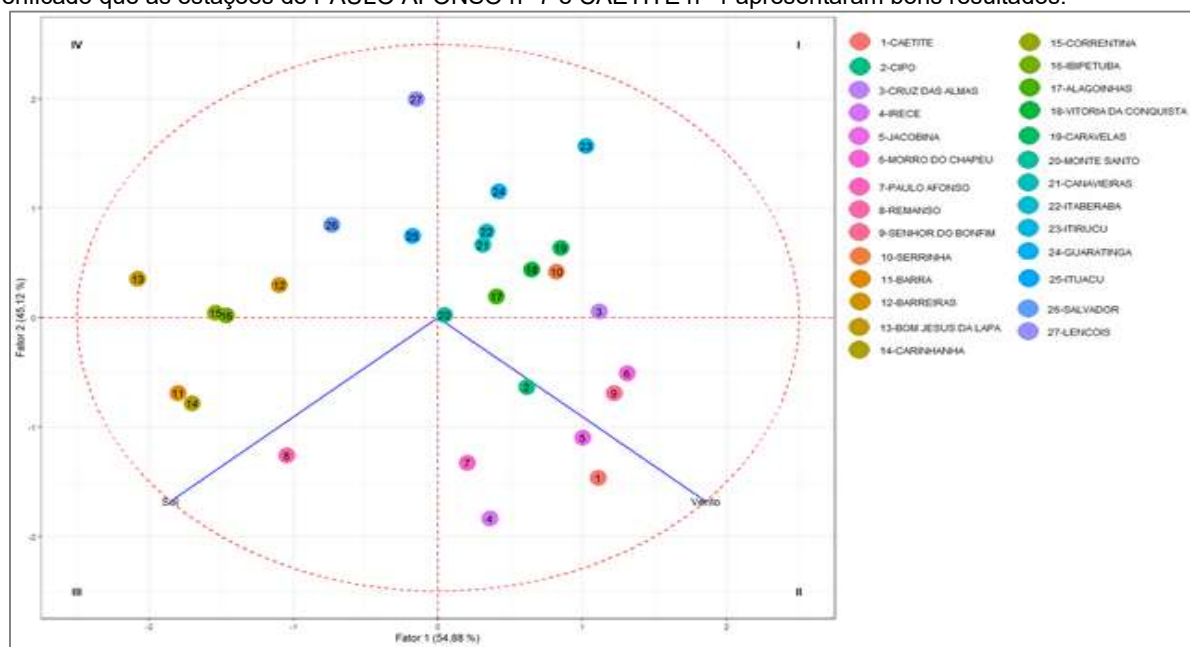


FIGURA 3 - Distribuição de Variáveis de Insolação Total (horas) e Velocidade do Vento (m/s) das 27 estações BA (INMET).

3.2. Análise Integrada Sol e Vento dados médios

Adicionalmente, para fins de corroborar com os resultados apresentados pela PCA e confirmar a metodologia adotada, foi realizada uma análise por meio do gráfico *boxplot* com os dados médios da normal climatológica em relação ao ano, de forma a apresentar as estações meteorológicas com as maiores médias de velocidade de vento (em m/s) e insolação total (em horas) por ano. Das 27 estações analisadas, verificou-se que apenas a estação de IRECÊ apresentou ambas as médias de vento ($3,91 \pm 0,52$) e insolação total ($247,81 \pm 18,50$) acima do quartis superiores (75%) de vento (3,30) e sol (235,88). Portanto, se destacando das demais analisadas, de acordo com a FIGURA 4.

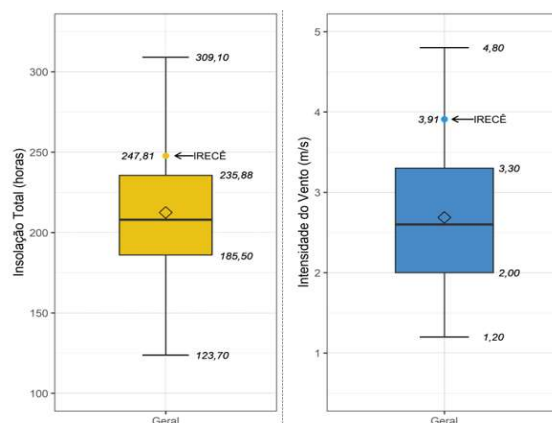


FIGURA 4 - Gráfico *boxplot* Insolação média (horas) e Velocidade média do vento (m/s), de acordo com dados do INMET (8).

4.0 ANÁLISE DA MARGEM PARA ESCOAMENTO DA GERAÇÃO NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.

Destaca-se que, as regiões que possuem melhores recursos energéticos não necessariamente localizam-se em áreas com um sistema de transmissão adequado para conexão, ou ainda, que o sistema de transmissão existente tenha capacidade de suportar o montante a ser injetado, isto é, com margem para escoamento da geração. Outrossim, especificamente no Brasil as dimensões continentais, tal qual a dispersão espacial das fontes de produção e as distâncias entre os centros de carga refletem em um complexo e extenso sistema de transmissão, que interliga os quatro subsistemas elétricos do país: Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste, Norte e Sul, denominado SIN (12). Esses quatro subsistemas interagem na transmissão de energia, promovendo equilíbrio entre carga e geração. No entanto, há alguns troncos/redes/equipamentos de transmissão que atualmente encontram-se próximos ao limite de escoamento, ou sobrecarregados, isto é, sem margem para escoamento de energia adicional. Em razão disso, para fins de segurança na operação e coordenação de sistemas de transmissão é necessário estabelecer limites à contratação de energia em cada barra, área ou subárea elétrica, respeitando os critérios de segurança, de acordo com a capacidade remanescente, considerando equipamentos de transmissão existentes e os licitados, com previsão de entrada em operação comercial até o horizonte de análise.

A partir de 2013, com a publicação pelo MME da Portaria nº 132/2013 (13), foi estabelecido um novo formato para os leilões de geração no ambiente de contratação regulada (ACR). Este tipo de leilão considera a capacidade de escoamento da rede básica e da rede básica de fronteira, para fins de conexão dos empreendimentos de geração ao sistema de transmissão, sendo denominado “Leilão de Margem” (14). A proposta do leilão baseia-se em realizar o cálculo da máxima injeção de potência em um ponto do sistema sem que ocorram violações, tanto em operação normal (N) quanto em emergência (N-1), de modo que não sejam necessárias ampliações e reforços no sistema de transmissão do SIN (15). Para fins de classificação na primeira fase do leilão, além da ordem de preço é considerada a capacidade de escoamento, e caso a injeção de potência exceda o limite da margem, os projetos são desclassificados para a próxima fase (13). Em um panorama de crescimento expressivo de renováveis, com tempos de implantação reduzidos em relação ao maior tempo de implantação da transmissão, o cálculo da margem de transmissão foi uma importante ferramenta para gerenciamento da expansão da geração versus transmissão. Com a prerrogativa de calcular e reservar margem de transmissão disponível, para entrada de geração adicional vencedora do certame a ser integrada no sistema de transmissão. Logo, o leilão de margem foi implantado para fins de mitigar o risco de restrição à geração no momento de entrega de energia, em relação ao descasamento de expansão da transmissão (14). A margem de transmissão é calculada pelo ONS sob premissas e critérios definidos de forma conjunta com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e divulgada antes da realização do leilão, tomando como base os casos atualizados do Plano de Ampliações e Reforços (PAR). Já as instruções dos referidos leilões com cálculo de margem são definidas por meio de portarias específicas emitidas pelo Ministério de Minas e Energia – MME.

A metodologia proposta pelo ONS e pela EPE (9) indica três níveis de análise: Área, subárea e barramento candidato, conforme apresentado na FIGURA 5. Área é conjunto de Subáreas que concorrem pelos mesmos recursos de transmissão; A Subárea, o conjunto de barramentos candidatos; e os Barramentos Candidatos são os possíveis pontos de conexão da Rede Básica, DIT ou ICG, no qual empreendimentos de geração acessam a rede de transmissão do SIN, seja de forma indireta, isto é, por meio de conexão no sistema de distribuição, ou de forma direta ao sistema de transmissão. Cabe destacar que este barramento pode ou não ter uma geração existente, em que se estuda a conexão de um novo gerador com uma injeção adicional (9).

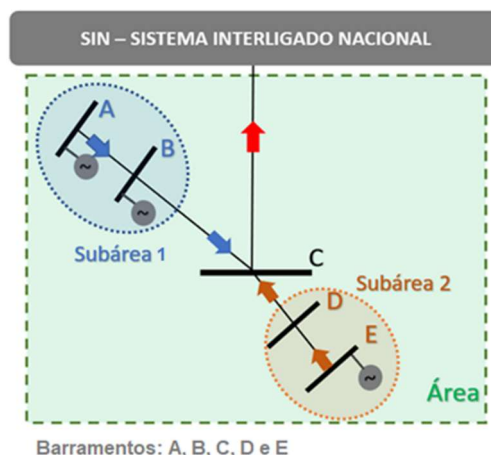


FIGURA 5 - Sistema hipotético para cálculo da Margem – Adaptado de (15).

Portanto, para além da escolha de um local que detenha de maior recurso de sol e de vento, bem como apresentem boa complementariedade de geração entre as fontes, a escolha de um local com margem de transmissão é essencial para o empreendedor na tomada de decisão para fins de instalação de plantas eólica-solar, sendo um grande e importante aliado na escolha da região para fins de instalação do empreendimento de geração, para viabilizar a instalação de um parque.

A partir dos resultados obtidos na seção 3.0, de que a estação IRECÊ apresentou a melhor correlação de sol e de vento no estado da Bahia, em seguida das estações de CAETITÉ e PAULO AFONSO, foi realizada a análise da margem para escoamento da geração pelo sistema de transmissão na Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), para o ano de 2024, a fim de avaliar a viabilidade de escoamento da região, associados os barramentos próximos existentes. A referida análise avaliou a capacidade de escoamento de geração existente na região, considerando as premissas e critérios estipulados pelo ONS e EPE na Nota Técnica nº ONS NT 0008/2021 / EPE-DEE-RE-008-r0/2021 (9). Para tanto é utilizado o programa computacional do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), de Análise de Redes Elétricas (ANEREDE).

Os resultados são apresentados na TABELA 1, que mostra os valores das margens de escoamento remanescentes calculados no ano de 2024, sendo realizadas em etapas o cálculo de margens, de barramento, de subárea e área, respectivamente. Ressalta-se que foram definidos os valores que apresentaram maior limitação entre todas as combinações.

TABELA 1 - Resultados de margens de escoamento remanescentes para os barramentos próximos a estação meteorológicas analisadas BA no ano de 2024.

Estação Meteorológica	Barramentos Candidatos	Tensão	Margem / Capacidade Remanescente (MW)		
		(kV)	Barramento	Subárea	Área
IRECÊ	SE Irecê	500	0	0	0
		230	0	0	0
		69	0	0	0
	SE Morro do Chapéu II	500	≤ 350	≤ 350	≤ 350
		230	0	0	0
		69	0	0	0
	Gentio do Ouro II	500	≤ 1.200	SEs 500 kV + 230 kV ≤ 1.200	SEs 500 kV + 230 kV + Sec. Juazeiro da Bahia III – Ourolândia II C1 ≤ 500
		230	≤ 1.050		
CAETITÉ	Pindaí II	230	0	0	0
		69	0	0	0
	Igaporã III	500	0	0	0
		230	0	0	0
	Brumado II	230	≤ 260	≤ 260	≤ 260
PAULO AFONSO	SE Paulo Afonso III	230	0	0	0
	SE Paulo Afonso IV	500	≤ 600	≤ 600	≤ 600
	Luiz Gonzaga	500	≤ 600	≤ 600	≤ 600

Nesse sentido, a partir das análises destaca-se que os barramentos de 500, 230 e 69 kV da SE Irecê, de 230 e 69 kV da SE Morro do Chapéu, 500 e 230 kV da SE Pindaí II, 500 e 230 kV da SE Igaporã II e 230 kV da SE Paulo Afonso III não apresentaram margem para fins de conexão de novas usinas no ano de 2024. Isto posto, cumpre destacar que nesses barramentos não há viabilidade de escoamento da potência adicional, para fins de garantir o critério de violação tanto em operação normal (N) quanto em operação de emergência (N-1). Assim por mais que detenham boa disponibilidade de recursos, inviabiliza no horizonte de análise a implantação de usinas híbridas, considerando o critério de margem adotado.

Já em relação as subestações que apresentaram margem para escoamento, cabe destacar que, apesar dos setores de 500 e 230 kV da SE Gentio do Ouro II, terem apresentado uma margem expressiva na análise de barramento (≤ 1.200 e ≤ 1.050 , respectivamente), foram identificadas grandes limitações nas análises de área e subárea. No caso mais conservador de análise da área, somando-se as injeções dos setores de 500 kV e 230 kV da SE Gentio do Ouro II, bem como do seccionamento da LT 500 kV Juazeiro da Bahia II – Ourolândia II c1 verificou-se uma margem de apenas 500 MW. Os resultados apresentados na TABELA 1 estão coerentes com os dados apresentados na Nota Técnica 0044 (16), validando as simulações realizadas neste trabalho. Ressalta-se que as SEs Paulo Afonso IV 500 kV e Luiz Gonzaga 500 kV apresentaram as maiores margens para fins de escoamento de transmissão, de até 600 MW, ambas subestações se localizam na região próxima a estação meteorológica de PAULO AFONSO. Em segundo lugar, os setores de 500 kV e 230 kV da SE Gentio do Ouro II, com uma margem de até 500 MW cada, a subestação localiza-se na região próxima a estação meteorológica de IRECÊ. O fator limitante encontrado foi a sobrecarga na LT 230 kV Ourolândia II – Irecê na hipótese de contingência da LT 500 kV Morro do Chapéu II – Ourolândia II, na configuração do Cenário 3, detalhado em (9). Em terceiro lugar verificou-se que a SE Morro do Chapéu 500 kV, localizada na região próxima a estação meteorológica de IRECÊ, sendo o valor máximo possível de ser injetado na referida subestação de 350 MW. O fator limitante observado foi sobrecarga na LT 230 kV Brotas de Macaúbas – Irecê na contingência da LT 500 kV Ourolândia II – Gentio do Ouro II, considerando o Cenário 1 detalhado em (9). Já a SE Brumado II 230 kV foi a subestação que apresentou menor margem para fins de escoamento, sendo o valor máximo possível de ser injetado na referida subestação de 260 MW. O fator que limitou tal injeção foi a sobrecarga na LT 230 kV Poções - Brumado C1, na contingência da LT 230 kV Ibicoara - Brumado C1, considerando o Cenário 1 detalhado em (9).

Portanto, conclui-se que as subestações de rede básica Morro do Chapéu II 500 kV, os setores de 500 e 230 kV da Gentio do Ouro II, Brumado II 230 kV, Paulo Afonso IV 500 kV e Luiz Gonzaga 500 kV, são elegíveis para novas conexões, haja vista que todas foram classificadas como Tipo A, isto é, com espaço físico para conexão de novos bays, de acordo com (9), e possuem margem para escoamento de transmissão. No entanto, deverão ser respeitadas os limites de margem estipulados para tal na contratação do MUST. Assim dependendo das características técnicas de cada usina, podem ser escolhidos a conexão nos diferentes barramentos elencados, considerando a estratégia de negócio de cada empreendedor e a concorrência de outros empreendimentos. Considerando que o resultado obtido na seção 3.0 elencou a estação de IRECÊ como sendo a de maior potencial eólico e fotovoltaico foi então escolhido a SE Gentio do Ouro II (500 ou 230 kV), que apresentou margem de escoamento de 500 MW e encontra-se próxima a estação meteorológica de IRECÊ.

5.0 ANÁLISE DE COMPLEMENTARIEDADE ENTRE FONTES EÓLICA-FOTOVOLTÁICA

A proposta de projetos híbridos neste trabalho procura otimizar o uso do sistema de transmissão, logo pode-se dizer que o projeto ótimo é aquele em que a geração total não seja a soma efetiva das capacidades instaladas de cada usina, devendo portanto apresentar uma boa complementariedade entre as fontes solar e eólica, para que nos horários de pico de uma fonte não seja coincidente com o de outra fonte, podendo assim haver a contratação de montante em valor inferior ao somatório das capacidades instaladas. Isto posto, a partir dos resultados das metodologias aplicadas nas seções 3.0 e 4.0 foram considerados regiões próximas as estações meteorológicas e barramentos que apresentaram os melhores recursos de sol e vento e com margem de escoamento de transmissão. Nesse sentido, foram feitas estimativas energéticas a partir dos critérios estabelecidos EPE (10). A partir dessa análise, avaliou-se a complementariedade das gerações eólica-fotovoltaica.

A partir da FIGURA 6 verifica-se que em todos os meses analisados (de janeiro a dezembro) o pico de geração fotovoltaica ocorre em torno do horário de 12h, excetuando-se os meses em que há horário de verão (de outubro a fevereiro), ocorrendo em torno de 11h. Já o pico de geração eólica tem tendência noturna. Evidenciando que no momento que há um pico de geração eólica não há geração solar, apresentando assim uma complementariedade notória. Além disso, observa-se uma evidente redução de variabilidade na geração global eólica e solar (em p.u.), representando uma geração híbrida eólica-solar.

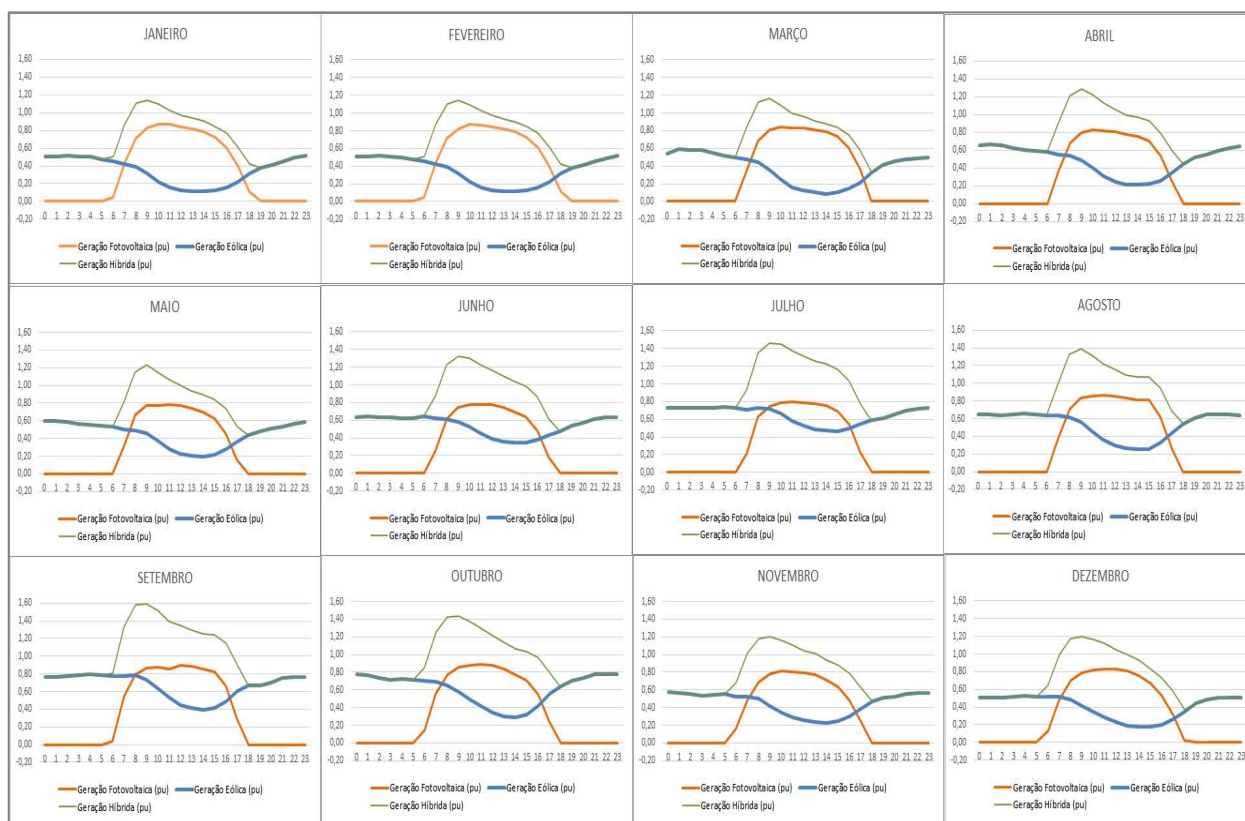


FIGURA 6- Gráfico de Complementariedade da geração eólica solar e híbrida (eixo vertical: Geração em p.u. e eixo horizontal: Horas do dia).

Para corroborar com as análises gráficas de complementariedade de geração, foi realizado ainda uma análise de correlação de *Pearson* mensal. A partir da análise de correlação mensal, apresentado na FIGURA 7, verificou-se que todos os meses apresentam correlação negativa, isto é, há complementariedade entre as gerações em todos os meses analisados.

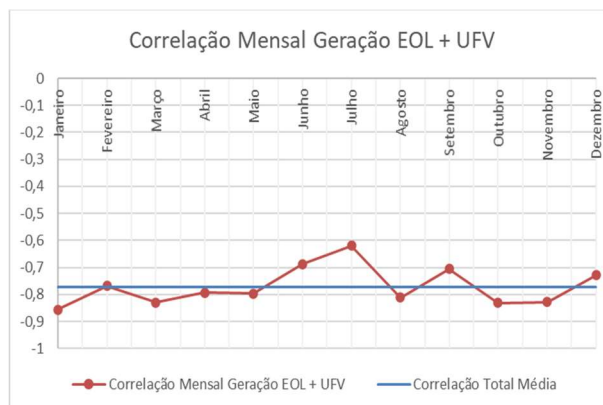


FIGURA 7 - Gráfico de correlação de geração eólica e fotovoltaica mensal.

Destacam-se os meses de janeiro, outubro e março que apresentaram, respectivamente, correlações de -0,85549, -0,83083 e -0,82952, valores próximos de -1 e, portanto, evidenciam maior complementariedade entre as gerações. Os meses que apresentaram menor correlação negativa foram os meses de julho, junho e setembro, apresentando correlação de -0,68811, -0,61879 e -0,7048. De acordo com (7) a radiação solar se reduz nos meses de inverno devido ao movimento de translação da terra, e, assim, explicando uma redução na correlação. A média da correlação foi de -0,77111 o que evidencia que há boa complementariedade ao longo de todo ano.

6.0 CONCLUSÕES

Pelas análises realizadas, constatou-se que a estação meteorológica de Irecê apresentou melhor potencial de hibridização, ou seja, com potencial significativo de incidência e insolação de ventos, além de boa relação de complementaridade entre as fontes. Nesse contexto, a avaliação realizada neste trabalho, elencou a SE Gentio do Ouro II (500 e/ou 230 kV) (Latitude: -11,28° e Longitude: -42,66°), como sendo a melhor subestação para fins de implantação de um parque híbrido eólico-fotovoltaico em 2024, com 500 MW de margem, subestação próxima da estação meteorológica IRECÊ (Latitude: -11,30° e Longitude: -41,86°). Além disso, considerando que a margem de escoamento da geração está em constante mudança, o crescimento expressivo da conexão das usinas eólicas e fotovoltaicas no SIN, atrelado à dinâmica do planejamento da expansão da transmissão, provoca grande competição para os agentes geradores, nos pontos de conexão. Assim, há necessidade de uma atualização constante dos valores de margem.

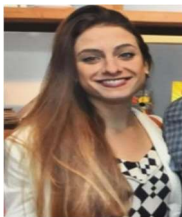
Logo, esse estudo permite realizar o levantamento em uma escala macro, dado que ainda não há uma granularidade de dados reais de velocidade de vento e insolação/irradiação global disponíveis ao público. Outra consideração importante é que, resultado obtido refere-se a um retrato da condição específica de margem à ocasião da realização das simulações, podendo, portanto, ser diferente da época de tomada de decisão dos agentes para conectar geração híbrida eólica-fotovoltaica. O crescimento contínuo de agentes de geração conectados ao sistema de transmissão, atrelado ainda, a dinâmica do planejamento da expansão de transmissão, corrobora a necessidade de atualização constante dos valores de margem.

Essa metodologia realiza uma análise macro das melhores regiões para fins de hibridização e não considera apenas os potenciais de geração de ambas as fontes e sua complementaridade, como na maioria dos estudos consolidados na academia, mas associa a margem de escoamento de geração, dado que atualmente tem sido um ponto crítico e essencial para fins de conexão de usinas ao SIN. Nesse contexto, o trabalho trouxe contribuição para estudos e análise de mapeamento de regiões para hibridização de usinas eólicas e solares no estado da Bahia, possibilitando que essa metodologia seja aplicada para outros estados e regiões a serem estudadas.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) (EPE & MME (2021). Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2030 - Parâmetros de Custos - Geração e Transmissão. 1–20.
- (2) BRASIL (2021). Lei nº 14.120, DE 1º de Março de 2021. 1–9.
- (3) BRASIL (2020). Medida Provisória - MP nº 998, de 1º de Setembro de 2020. 1–7.
- (4) Moura, P.S.; Almeida, A.T. de Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 5, p. 1461–1468, 2010.
- (5) ÇALIŞKAN, A.; ÖZCAN, M. Site Selection for Wind-Solar Hybrid Power Plant in Turkey. *Ankara, Turquia*, 2017.
- (6) Vicari, M.B. (2012). Uso de SIG e Análise Multicritério para Levantamento do Potencial de Implantação de Usinas Eólica e Solar no Rio Grande do Sul. (54) , 1–2.
- (7) MRTS Consultoria, USP, APINE, ABEEólica, & ABSolar (2019). Análise da complementaridade entre duas ou mais Fontes de Energia objetivando a otimização do uso dos Sistemas de Escoamento e ajuste dos Processos Regulatórios em Projetos Híbridos. 1–35.
- (8) INMET (2021). 07/02/2021 inmet : bdmep. 2021.
- (9) EPE; ONS Nota Técnica 0008/2021 - EPE-DEE-RE-008-R0/2021: LEN A-3 E A-4/2021: Metodologia, Premissas e Critérios para a definição da capacidade remanescente do SIN para Escoamento Geração Pela Rede Básica , DIT e ICG. 29 de janeiro de 2021. 2021.
- (10) EPE (2021). Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas.
- (11) Johnson, R.A.; Wichern, D. w. *Applied Multivariate Statistics*. Pdf. 2007.
- (12) Ferraz de Andrade Santos, J.A.; Jong, P. de; et al. Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil. *Utilities Policy*, v. 67, n. June, 2020.
- (13) MME (2013). Portaria nº 132, de 25 de Abril de 2013. 1–8.
- (14) Monteath, L. & França, F.A.X. (2016). Workshop - ANEEL: 2º Leilão de Energia de Reserva de 2016 - Esclarecimentos Técnicos. 1–85.
- (15) Fernandes, R.P., Gatta, P.O. La, Alves, F.R.D.M., Almeida, L.P. De, Nunes, R.D.S., Bianco, A., Teresa, E., Colaço, M., Santanna, E.G.S. De, Dos, A.D.F., Anjos, Souza, A. De, & Mazon, C.J. (2019). Utilização de Ferramenta para Cálculo Automático de Margem de Transmissão em Estudos para Leilões de Energia. *XXV SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 53.
- (16) ONS (2021). Nota Técnica NT-ONS DPL 0044/2021. LEN A-3/2021: Quantitativos da Capacidade Remanescente do SIN para escoamento de geração pela Rede Básica, DIT e ICG. *Revisão 2*, 23, 1–143.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) NINA BORDINI BRAGA é Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) recebido em 2014 e recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense (UFF), em 2021. Possui experiência profissional no setor elétrico brasileiro, com atuação nas áreas de acesso e integração às instalações de transmissão, apuração dos encargos da transmissão, regulação do setor elétrico e energias renováveis. Atualmente trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

(2) ANDRÉ LUIZ FONSECA BARBOSA é Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida (UVA) em 2015, atualmente é Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Atua no setor elétrico brasileiro desde 2009, tendo iniciado sua carreira na área de operação da distribuição e, posteriormente (2011), migrado para os setores de operação da geração e transmissão. Atualmente, trabalha no departamento de Assuntos Regulatórios de Energias Renováveis da Neoenergia Renováveis S.A. (subsidiária do grupo Iberdrola S.A.).

(3) NATÁLIA DO VALLE ALVES SILVA Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (UFF) recebido em 2018. Possui experiência profissional no setor elétrico brasileiro, com atuação nas áreas de Energias Renováveis, Estudos Elétricos de Regime Permanente, Planejamento e Expansão da Transmissão e da Distribuição. Atualmente aluna no programa de pós-graduação no Mestrado de Engenharia Elétrica em Modelagem e Análise de Sistemas de Energia na Universidade Federal Fluminense (UFF).

(4) RAQUEL DE LUCA MATTOS recebeu o título de Engenheira Eletricista pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2017. Possui experiência no setor de distribuição de energia elétrica, desenvolvendo estudos de fluxo de potência nos sistemas média tensão voltados para o planejamento da expansão e análises de unidades geradoras e cargas. Atualmente atua como analista na área de Planejamento de Redes da Enel Distribuição Rio e é aluna de mestrado em Engenharia Elétrica no campo de Modelagem e Análise de Sistemas de Energia, também na UFF.

(5) BRUNO SOARES MOREIRA CESAR BORBA é professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói – Brasil. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e recebeu os títulos de Mestre e Doutor em Planejamento Energético pela UFRJ (2008 e 2012). Atua nas áreas de planejamento energético e energia renováveis, realizando vários trabalhos sobre cenários energéticos de longo prazo.