

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ FELIPE TANSINI FRANCISCONI

**ESTUDO DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA DE USINA HÍBRIDA EÓLICA
E FOTOVOLTAICA ENTRE UMA CIDADE NA BAHIA E UMA NO RIO GRANDE DO
SUL**

MEDIANEIRA

2022

LUIZ FELIPE TANSINI FRANCISCONI

**ESTUDO DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA DE USINA HÍBRIDA EÓLICA
E FOTOVOLTAICA ENTRE UMA CIDADE NA BAHIA E UMA NO RIO GRANDE DO
SUL**

**Energy complementarity study of a hybrid wind and photovoltaic plant between
a city in Bahia and one in Rio Grande do Sul**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
em Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Thiago Naufal Santelo.

Coorientador: Evandro André Konopatzki.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUIZ FELIPE TANSINI FRANCISCONI

**ESTUDO DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA DE USINA HÍBRIDA EÓLICA
E FOTOVOLTAICA ENTRE UMA CIDADE NA BAHIA E UMA NO RIO GRANDE DO
SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 21/novembro/2022

Thiago Naufal Santelo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Evandro André Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Filipe Marangoni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Amauri Massochin
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

AGRADECIMENTOS

Sem dúvida não é possível chegar neste estágio sozinho, sempre tive a sorte de estar amparado e rodeado por pessoas fantásticas, de coração bom e que sempre conseguiam ensinar algo, por mais que não queiram, e muitas vezes, aprender como não fazer, também é uma opção.

A minha família e aos meus pais, Sergio e Rosangela, e minha irmã, Maria Fernanda, serei eternamente grato pelo que vocês fizeram e vão fazer por mim, espero que um dia eu consiga retribuir tamanho amor e exemplos que vocês me deram. O apoio recebido foi crucial para que esse ciclo, que por sinal foi incrível, se encerre. A minha parceira de vida Amanda, agradeço pela reciprocidade, pelo suporte e por sempre me incentivar a ser uma pessoa melhor.

Aos meus amigos de infância, Gabriel, Gabriel, João, Matheus e Rafael por tornarem sempre as voltas para Cascavel mais leves, pelas risadas e pelas conversas.

A todos com quem já trabalhei a frente da A.A.A.E XVIII de março, tenho certeza que a experiência de passar por uma faculdade não estaria completa sem vocês. Incrível é achar pessoas que compartilham da mesma loucura que você e brigam para que ela fique cada vez melhor. Em especial a Nath e ao Cadu que estiveram ao meu lado em momentos marcantes desta caminhada. Lembrem-se, pra cima!

Ao time de handebol, por terem me acolhido no início da faculdade, pelos momentos juntos, podcasts e pelos inúmeros pagodes feitos. Aquela palavra estampada no peito do uniforme diz muito sobre nós. Agradeço também pela confiança depositada.

Ao meu orientado Thiago pelas orientações e incentivos ao trabalho.

RESUMO

Visto que as fontes alternativas de energia estão se tornando mais viáveis economicamente e demonstrando uma expressiva porcentagem na matriz energética nacional, surge a necessidade de estudos de implementação de sistemas híbridos – junção de duas ou mais fontes trabalhando associadas. Uma pesquisa histórica foi desenvolvida com intuito de caracterizar a melhor adequação de energia renovável empregável por região brasileira dependente do clima, bem como o levantamento de informações que serão de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa, como as restrições da região Norte e as principais atividades das outras regiões, relacionadas a ligação com o SIN e a presença de sistemas isolados. O trabalho a seguir tem como proposta analisar o despacho de geração e a complementaridade energética de uma possível híbrida nas regiões Sul e Nordeste através de dados de estações meteorológicas, debater conceitos de geração e comparações, concretizar a viabilidade técnica e econômica sem a utilização de fontes armazenadoras de energia elétrica. Em relação ao despacho de carga, as duas regiões se mostraram semelhantes com curvas bem definidas em “U” no solar fotovoltaico e uma geração pico eólica no verão. O Coeficiente de correlação de Pearson conseguiu comprovar a um certo grau complementaridade em algumas regiões, como em Irecê que atingiu o valor máximo. Já os de complementaridade foram bem variáveis, mas também atenderam às expectativas. O Fator de Simultaneidade e o Fator de capacidade foram de suma importância para o desfecho da pesquisa devido sua utilização no dimensionamento de usinas e expectativa de geração de uma região, onde a Bahia se mostrou mais eficiente em geração de energia, tendo um parâmetro anual. Por fim, o presente trabalho se manterá sempre atualizado devido a utilização de dados em unidade de disponibilidade energética, como m/s e MJ/m^2 , visto que as tecnologias na área de renováveis estão sendo aprimoradas constantemente.

Palavras-chave: geração de energia fotovoltaica; energia eólica; estudos de viabilidade; recursos energéticos; usinas elétricas.

ABSTRACT

Since alternative sources of energy are becoming more economically viable and represent a significant percentage of the national energy matrix, there is a need for studies on the implementation of hybrid systems – the joining of two or more sources working together. A historical research was carried out with the aim of characterizing the best suitability of employable renewable energy by climate-dependent Brazilian region, as well as the collection of information that will be of great importance for the development of the research, such as the restrictions of the North region and the main activities from other regions, related to the connection with the SIN and the presence of isolated systems. The following work proposes to analyze the generation dispatch and the energy complementarity of a possible hybrid in the South and Northeast regions through data from meteorological stations, discuss generation concepts and comparisons, materialize the technical and economic viability without the use of electrical energy storage. Regarding the load dispatch, the two regions were similar with well-defined "U" curves in solar photovoltaic and peak wind generation in summer. Pearson's correlation coefficient was able to demonstrate a certain degree of complementarity in some regions, such as in Irecê, which reached the maximum value. As for complementarity, they were quite variable, but also met expectations. The Simultaneity Factor and the Capacity Factor were of paramount importance for the outcome of the research due to their use in the sizing of plants and generation expectation in a region, where Bahia proved to be more efficient in energy generation, having an annual parameter. Finally, this work will always be kept up to date due to the use of data in energy availability units, such as m/s and MJ/m², since technologies in the area of renewables are constantly being improved.

Keywords: photovoltaic power generation; wind power; feasibility studies; power resources; electric power plants.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da matriz energética	12
Figura 2 - Usina Híbrida	12
Figura 3 - Placa Solar e seus componentes.....	16
Figura 4 - Exemplo de geração de um sistema fotovoltaico	17
Figura 5 - Irradiação solar no Brasil	18
Figura 6 - Geração com relação a velocidade dos ventos.....	19
Figura 7 - Evolução eólica	21
Figura 8 - Potencial eólico Brasileiro	22
Figura 9 - Complementaridade entre as renováveis.....	24
Figura 10 - Classificação de Usinas Híbridas.....	25
Figura 11 - Potencial solar e eólico da estação de Irecê, BA	28
Figura 12 - Potencial solar e eólico da estação meteorológica de Quaraí, RS.....	28
Figura 13 - Localização das estações meteorológicas com relação as linhas de transmissão próximas.....	29
Figura 14 - Perfil da irradiação solar e velocidade do vento em Irecê em (a) 2017, em (b) 2018, em (c) 2019, em (d) 2020 e em (e) 2021.	31
Figura 15 - Perfil da irradiação solar e velocidade do vento em Quaraí em (a) 2017, em (b) 2018, em (c) 2019, em (d) 2020 e em (e) 2021.	32
Figura 16 - Comparativo entre os índices de Complementaridade no Tempo.....	35
Figura 17 - Comparativo entre os índices de Complementaridade de Energia.....	36
Figura 18 - Comparativo entre os índices Complementaridade de Amplitude.....	37
Figura 19 - Comparativo entre os coeficientes de correlação de Pearson.....	40
Figura 20 - Fator de Capacidade normalizado em Irecê	41
Figura 21 - Fator de Capacidade normalizado do Quaraí	42
Figura 22 - Fator de Simultaneidade de Irecê	43
Figura 23 - Fator de Simultaneidade de Quaraí	43

Figura 24 - Comparativo entre os Fatores de Simultaneidade máximo44

Tabela 1 - Valores dos Índices de Complementaridade de Irecê38

Tabela 2 - Valores dos Índices de Complementaridade de Quaraí39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SIN	Sistema Interligado Nacional
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
CCP	Coefficiente de Correlação de Pearson
Ic	Índice de Complementaridade
It	Índice de Complementaridade de Tempo
Ie	Índice de Complementaridade de Energia
Ia	Índice de Complementaridade de Amplitudes
FS	Fator de Simultaneidade
FC	Fator de Capacidade
BA	Bahia
RS	Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivos específicos.....	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1	Energia solar fotovoltaica.....	15
3.2	Energia Eólica.....	18
3.3	Complementaridade e Usinas Híbridas	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Ferramenta de análise.....	27
4.2	Escolha das estações e disponibilidade de dados	27
4.3	Perfil de geração.....	30
4.4	Índices de Complementaridade.....	35
4.4.1	Índice de complementaridade no Tempo	35
4.4.2	Índice de complementaridade de Energia	36
4.4.3	Índice de complementaridade de Amplitudes	37
4.4.4	Índice de Complementaridade.....	38
4.5	Coeficiente de correlação de Pearson.....	39
4.6	Fator de Capacidade Normalizado	40
4.7	Fator de Simultaneidade	42
4.8	Estudo comparativo entre os Fatores de Simultaneidade.....	43
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Ao analisar a Matriz Energética Brasileira, é nítido que as usinas hidroelétricas marcam uma maior presença quando comparadas com outras fontes de energia, além do que, os extensos rios planálticos favorecem essa geração. Entretanto, algumas situações devem ser levadas em consideração para sua implantação, como impactos sociais e ambientais.

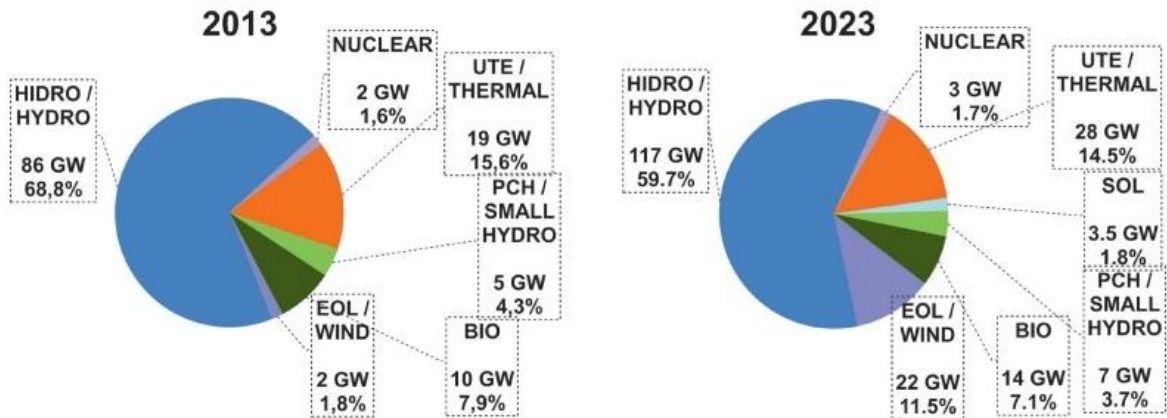
Um outro aspecto que deve ser analisado, e que não é palpável ao ser humano, é a falta de água. Uma vez que falte, pode acarretar em severas crises hídricas que irão afetar diretamente o cotidiano da população, como o aumento do valor dos alimentos e na fatura de energia elétrica. A última crise presenciada foi a de agosto de 2021 que resultou na diminuição dos reservatórios e em um aumento expressivo na fatura de energia pela utilização de outras fontes, como termelétricas, que são menos viáveis economicamente.

Tendo em vista este cenário, segundo a Empresa de Pesquisa Energética a matriz energética do Brasil difere bastante do restante do mundo. No contexto mundial, existe um maior consumo de não renováveis, entretanto, no país utiliza-se mais renováveis. Fontes como hidráulica, carvão vegetal, derivados da cana e outras totalizam quase 50% da nossa matriz energética. De acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL, 82,96% da energia elétrica em operação são de fontes renováveis.

Com intuito de explorar a matriz energética, o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2022, apresentou que a potência instalada em usinas eólicas correspondeu a quase 50% do acréscimo total do período de 2021, usinas termelétricas 32,39%, solar fotovoltaica 17,18% e PCHs apenas 1,51% do total.

Já o PDE de 2023 é mais otimista, a Figura 1 mostra um aumento expressivo na utilização de eólicas e solar, com a instalação de 20 GW de potencial eólico passará a corresponder a 11,5% da matriz; e a solar, que não marcava presença significativa, hoje representa 1,8%. O mesmo espera um aumento progressivo destas fontes chegando a 28% no caso da eólica e 5% do solar fotovoltaica de potência total instalada no Brasil.

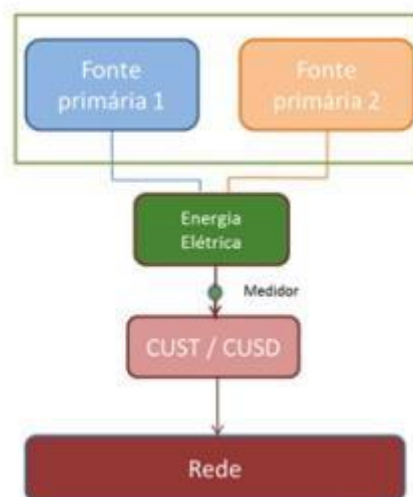
Figura 1 - Evolução da matriz energética



Fonte: PDE (2023)

Por outro lado, deve-se levar em consideração que os recursos são finitos, logo, os sistemas de geração somente se tornarão geradores se as condições climáticas forem favoráveis. Isto posto, e com crescentes incentivos em energias limpas, surge a oportunidade de estudo de complementaridade energética, unindo vários meios de obtenção de energia elétrica, neste caso com energia solar fotovoltaica e energia eólica. A Figura 2 representa uma tipologia de Usina Híbrida dentre suas classificações.

Figura 2 - Usina Híbrida



Fonte: EPE (2018)

De acordo com Beluco (2003), a complementaridade energética nada mais é que a capacidade de uma ou mais fontes de energia ter disponibilidade para complementar a outra, seja no tempo e/ou no espaço.

A Agência Nacional de Energia Elétrica afirma que além da complementaridade das fontes, as Usinas Híbridas possuem vantagens como: eficiência e estabilidade na utilização da rede de transmissão, otimização da área disponível, abrandamento de riscos comerciais e o corte de custos. Pode-se otimizar as linhas de transmissão e a rede para serem utilizadas por mais tempo durante o dia, evitando novos gastos com possíveis expansões de linhas, e com essa mesma linha otimizada conseguimos gerar mais energia a um valor menor para o consumidor final.

Sendo assim, o estudo de uma usina que complemente sua geração torna-se necessária, unindo as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica, avaliando suas características intrínsecas, períodos de complementaridade e comparando com outra região do Brasil de acordo com índices que traduzam estas especificidades.

2 OBJETIVOS

Avaliar a instalação de usina híbrida em uma cidade no Nordeste e comparar com uma cidade promissora no Sul do Brasil.

2.1 Objetivos específicos

- ✓ Analisar o potencial possível de exploração de geração conectada ao Sistema Interligado Nacional da região Nordeste;
- ✓ Analisar a complementaridade entre duas fontes de energia renováveis através do perfil de irradiação solar e velocidade do vento;
- ✓ Determinar o fator de simultaneidade e o perfil de irradiação solar e velocidade do vento mais próximo ao real, fator de capacidade, índices de complementaridade e o coeficiente de correlação de Pearson.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como propósito a abordagem de conceitos importantes para compreensão do trabalho, relacionados à energia solar fotovoltaica, energia eólica, Usina Híbrida e a análise de complementaridade voltada ao sistema eólico-solar.

3.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar é obtida a partir do efeito fotovoltaico, que nada mais é que a conversão de luz diretamente em eletricidade. O primeiro físico a relatar experimentos foi Edmon Becquerel em 1839, que notou uma diferença de potencial entre duas pontas de um semicondutor, e tal diferença se deu pela absorção de luz. Após muitos estudos e desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente eletrônica, em 1956 deu-se início a produção industrial (CRESEB, 2014).

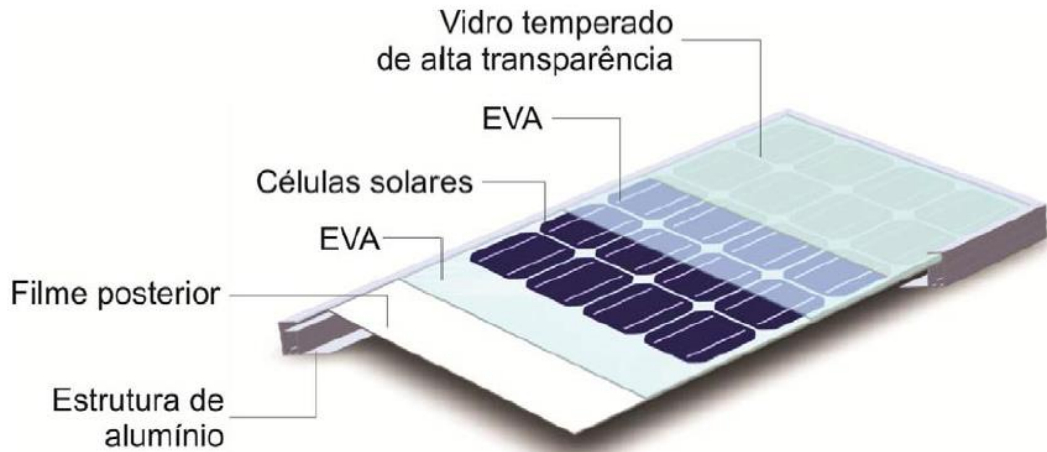
Inúmeros fatores impactavam a utilização naquela época, as empresas ainda enfrentavam altos custos nas células fotovoltaicas, mas com a expansão do mercado e o aparecimento de muitas empresas voltadas a sua produção, o preço de mercado foi reduzindo e se tornando acessível para ser utilizado em várias instalações e projetos. Outro ponto que deve ser considerado é que a célula apresenta muitas vantagens operacionais, como baixo custo de manutenção e vida útil considerável (CRESEB, 2014).

De acordo com Pinho e Galdino (2014), o meio mais barato, mais leve e mais seguro de fornecer energia elétrica necessária para alimentar os dispositivos eletroeletrônicos por um espaço de tempo longo, sempre foi e continua sendo a célula fotovoltaica. Ainda, para se gerar a tensão e a corrente necessária, a célula é produzida com elementos identificados como semicondutores que através de um processo de dopagem (introdução de outros materiais em pequenas quantidades que mudam a propriedade da matéria prima) dá origem a junção pn , uma vez submetido a um campo elétrico, gera a eletricidade.

Somado a isso, a junção de células fotovoltaicas forma um módulo, como mostra a Figura 3, módulo este que pode ser associado em série ou em paralelo,

dependendo dos padrões da instalação. Após soldadas em tiras, as células são encapsuladas por motivos de proteção contra fenômenos naturais e com isso tem-se um aumento de resistência mecânica (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 3 - Placa Solar e seus componentes

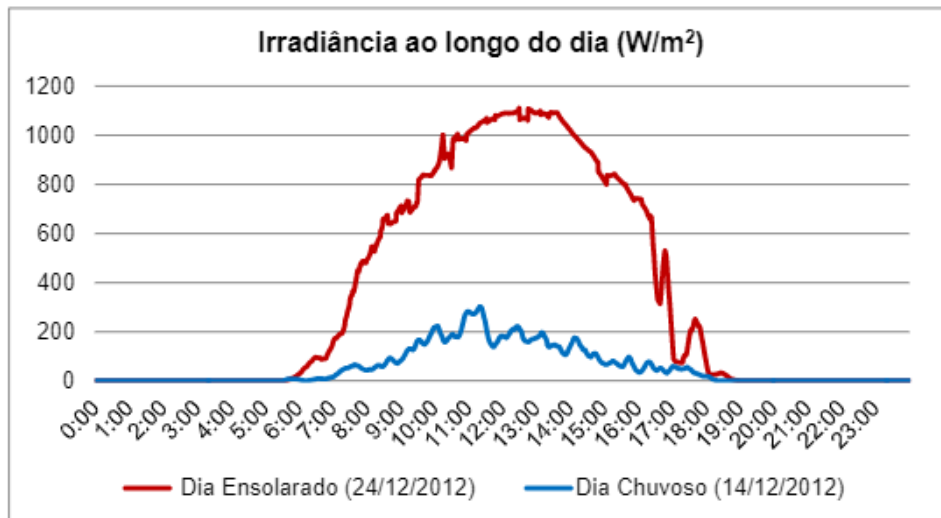


Fonte: PINHO E GALDINO (2014)

Ao contrário das fontes de energia convencionais mais utilizadas, a solar possui uma especificidade: a oscilação de geração, fator que está ligado diretamente com as condições meteorológicas no local instalado. Porém, sabe-se que as informações sobre o potencial disponível não são suficientes, é necessário também dados sobre a instabilidade dos recursos solares para suportar o avanço da área e aumentar a eficiência desse sistema (INPE, 2017).

A Figura 4 representa essa oscilação diária do Escritório Verde da UTFPR Curitiba; nota-se que com o passar das horas a geração das placas chega no seu ápice, sendo por volta de $1,1 \text{ kWp/m}^2$ perto das 14 horas, e ao final da tarde sua geração passa a ser mais branda devido a menor incidência de irradiação solar. Vale ressaltar que essa simulação foi executada com o objetivo de comparar a geração das placas de acordo com o tempo, quando favorecida a geração, e quando não favorecida.

Figura 4 – Exemplo de geração de um sistema fotovoltaico

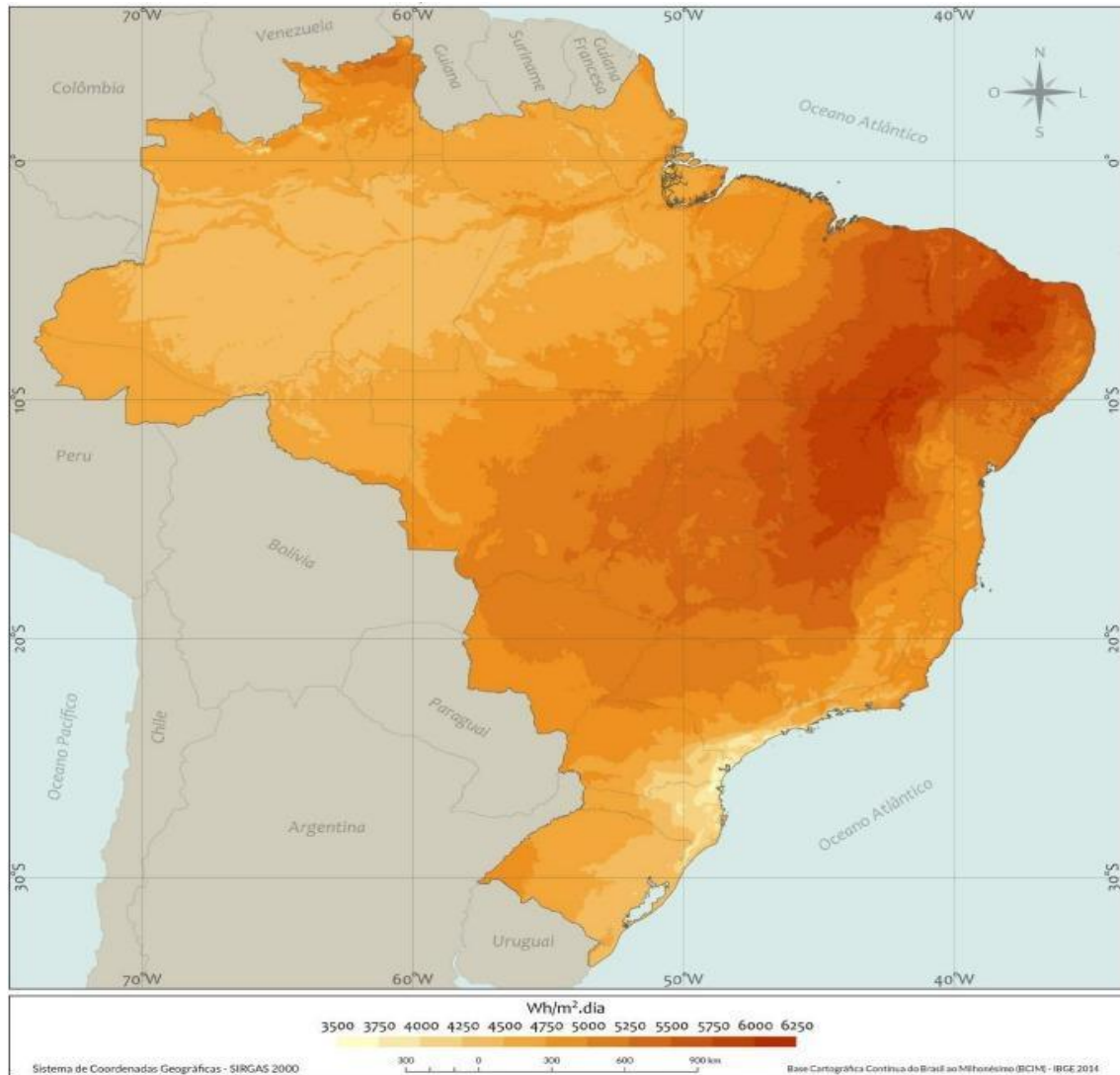


Fonte: URBANETZ (2016)

Apesar das dificuldades que as necessidades intrínsecas da energia solar fotovoltaica apresentam, ao falar-se de potencial solar, a Figura 5, retirada do Atlas Brasileiro de Energia Solar, retrata o potencial solar brasileiro e as regiões onde a incidência de radiação é mais presente. Analisando a Figura, nota-se que existe uma faixa de maior concentração na região Nordeste que se estende pela região Centro-Oeste e Sudeste.

Ao comparar o potencial brasileiro com outros continentes do mundo, como por exemplo a Europa, onde a energia solar fotovoltaica é utilizada amplamente, nota-se que o Brasil além de ser muito maior territorialmente possui um potencial mais elevado por apresentar condições de geração em praticamente todo o país melhor, ou igual, que nos países do sul da Europa, como por exemplo a Alemanha, que possui uma geração solar representativa na sua matriz energética (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 5 - Irradiação solar no Brasil



Fonte: INPE (2017)

3.2 Energia Eólica

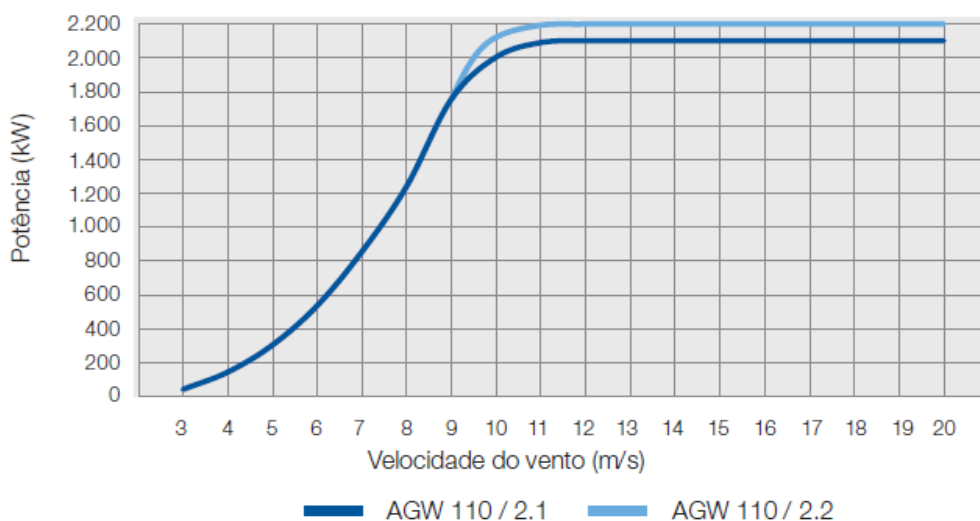
Desde a antiguidade se transforma energia cinética dos ventos em energia mecânica, e juntamente com a energia hidráulica, formam as duas mais antigas da história da humanidade. Muito utilizada na Ásia antes do século X, a energia eólica se espalhou pela Europa entre os séculos XI e XII tendo a primeira turbina, por essência eólica, construída pelos Holandeses em 1493. Um fato curioso é que naquela época já se avaliava o posicionamento correto das pás, as faziam “torcidas” e “afuniladas” da mesma maneira que se encontram os motores modernos, fator que influencia na máxima eficiência aerodinâmica. (SECRETÁRIA DE ENERGIA, 2012).

Entretanto, durante a Revolução Industrial esta fonte perdeu a vez no cenário devido a utilização em massa de combustíveis fósseis, material que era utilizado nas máquinas a vapor, mas correndo em paralelo, novas tecnologias eram aperfeiçoadas. Em 1970, o aprimoramento dos novos materiais e avanços eletroeletrônicos marcaram a época, como a fibra de vidro e o controle por sistemas eletrônicos (SECRETÁRIA DE ENERGIA, 2012).

Atualmente, temos a energia eólica bem difundida no mundo, de acordo com Feng Zhao, chefe de estratégia e marketing inteligente do Conselho Global de Energia Eólica, 2021 foi marcado pelo segundo melhor ano consecutivo pela indústria eólica mundial, quase 94 GW foram adicionados, fato que traduz um sinal claro da resiliência e a trajetória promissora das empresas responsáveis pelo feito (GWEC, 2022).

Assim como a solar, a eólica tem suas especificidades e possui como característica a oscilação de geração também. Dado que a velocidade do vento pode variar significativamente em distâncias curtas, os procedimentos de avaliação dos locais de instalação dos aerogeradores devem levar em consideração todos os parâmetros regionais que afetam as condições do vento (CRESEB, 2014). A Figura 6 mostra essa oscilação e traduz a influência de um vento com velocidade constante e que não muda de direção com frequência com relação a potência gerada, no caso, a turbina tem uma velocidade mínima de geração de 3 m/s e máxima de 20 m/s.

Figura 6 - Geração com relação a velocidade dos ventos



Fonte: WEG (2017)

Sendo assim, responsável por transformar a energia cinética do vento em energia elétrica, a turbina eólica é subordinada à Equação 1 que traduz essa velocidade em potência (Watts) (SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA, 2005):

$$P = \frac{1}{2} \rho A_r V^3 C_p \eta \quad (1)$$

Sendo suas variáveis definidas como: ρ a densidade do ar, definido como sendo 1.225 kg/m^3 no nível do mar e a 15°C ; A_r a área do rotor utilizado, sendo a área de um círculo, dado como: $\pi \frac{D^2}{4}$ onde D é o diâmetro do rotor; V a velocidade do vento (m/s); C_p o coeficiente aerodinâmico do rotor ou Fator de Betz; η a eficiência do conjunto de geração e transmissão, valor que pode variar entre 0,93 e 0,98. O C_p quantifica a potência que pode ser aproveitada pelo aerogerador por relacionar a velocidade do vento antes e depois de passar pela turbina eólica. Sendo o primeiro a demonstrar o coeficiente máximo de potência teórico que uma turbina pode alcançar, Betz comprovou em seu experimento que o coeficiente, em uma situação de potência ideal máxima, é dado pela Equação 2:

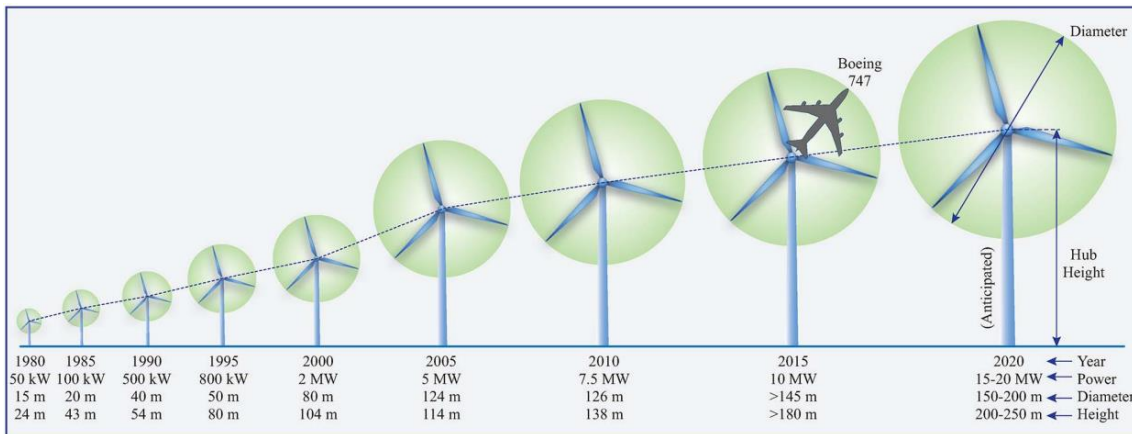
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} = 0.593 \quad (2)$$

Onde V_2 é a velocidade do vento na saída da turbina e V_1 é a velocidade na entrada. Posteriormente, esse coeficiente também foi chamado de coeficiente de Betz, por suas contribuições de estudos (HAU, 2005).

Sabemos que além de renovável, as instalações de parques eólicos também geram benefícios para a região, como o aumento do PIB e do IDHM. Uma pesquisa realizada pela GO Associados (2020) comparou municípios que receberam os parques e que não receberam; os que receberam resultaram em um aumento significativo nos dois índices citados: o primeiro um aumento de 21,15% no período de 1999 até 2017 e o segundo 20% no período de 2000 até 2010. O estudo também registra que nos municípios em que os parques foram instalados notou-se uma redução de desigualdade social em comparação aos municípios que não receberam.

A Figura 7 mostra a evolução dos aerogeradores ao longo do tempo em comparação com altura, diâmetro e potência. Elbia Gannoum esclarece que o potencial eólico brasileiro leva em consideração somente a geração *onshore* (continental), que predominantemente utiliza geradores padrões de 2 a 3 MW e que em média possuem 150 metros de altura. Apesar de ser um potencial inexplorado, a ABEEólica não vê uma expansão *offshore* (fora do continente) momentânea devido ao alto custo quando comparado com o investimento em terra (PESQUISA FAPESP, 2019).

Figura 7- Evolução eólica

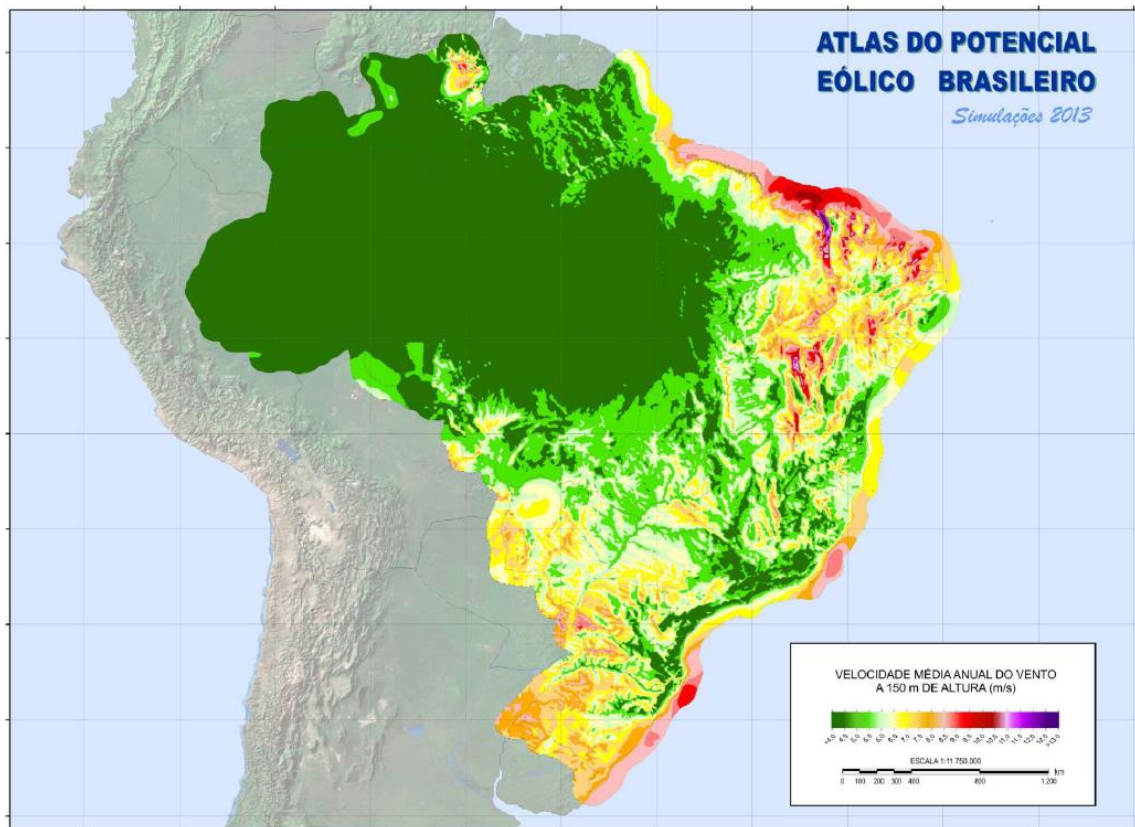


Fonte: YARAMASU et al. (2015)

O país enfrenta uma grande expansão da fonte renovável, o relatório publicado pela GWEC (2022), coloca o Brasil em sexto lugar no Ranking Global de países com mais eólicas. Hoje tem-se 21,5 GW de potência instalada, e a previsão é que até 2026 alcançará 36 GW de acordo com o Infovento de março de 2022 (ABEEÓLICA, 2022).

Se tratando de potencial eólico brasileiro, a Figura 8 retrata as regiões onde os ventos são mais fortes a uma altura de 150 metros. Nota-se um potencial mais elevado em regiões litorâneas principalmente no norte da região Nordeste e na região Sul, outra região que deve-se considerar é a divisa entre a Bahia e Minas Gerais.

Figura 8 - Potencial eólico Brasileiro



Fonte: CEPEL (2013)

3.3 Complementaridade e Usinas Híbridas

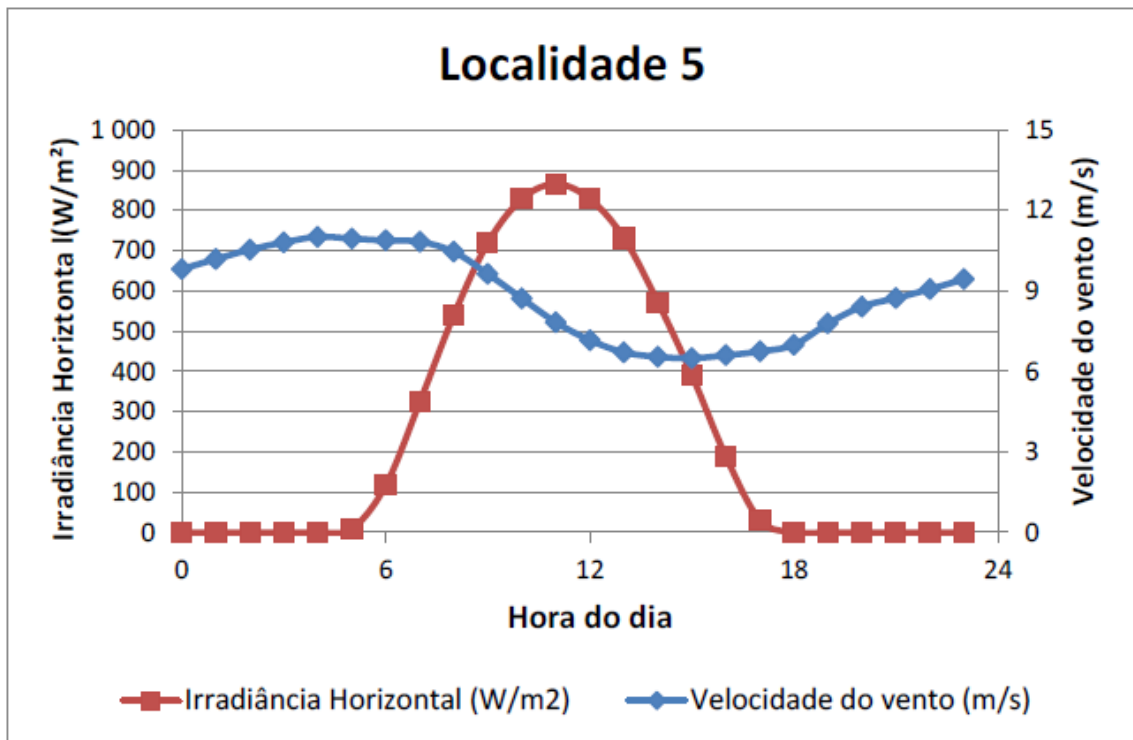
De acordo com Beluco (2003), complementaridade energética nada mais é que a aptidão que uma ou mais fontes apresentam em se complementar energeticamente no tempo e/ou espaço. Sendo assim, possuindo uma capacidade energética entre duas fontes e que ainda são capazes de se complementar, pode-se suavizar as falhas perante aos consumidores e diminuir os custos de operação. Vale ressaltar que quando há um eficiente aproveitamento dessas diferentes fontes se complementando significa que houve um excelente gerenciamento de energia disponível e acumulada.

Dado os devidos conceitos, o cenário de hoje é favorável para discussões de implantação de sistemas geradores que utilizam duas ou mais fontes de energia, chamadas de Usinas Híbridas. No Brasil este sistema é muito bem visto por possibilitar um aproveitamento maior nas linhas de transmissão, apesar de não apresentar

restrições ainda na capacidade de escoamento de potência, as empresas já se preocupam com a intensificação do sistema de transmissão devido ao reconhecimento de complementaridade entre a fonte solar e eólica (EPE, 2018). Sabe-se que a geração de energia solar fotovoltaica apresenta uma intermitência de geração devido sua dependência total meteorológica e caso ela venha a ser conectada no SIN alguns cuidados devem considerados, principalmente com o controle de pico de geração. Estudos são propostos com finalidade de diminuir esses efeitos perante à rede, um destes é a integração com outra fonte de energia, como por exemplo a eólica e a hídrica; essa junção resultaria em um maior aproveitamento em geração de energia no parque devido ao aumento no seu fator de capacidade. Somado a isso, os parques híbridos geram um conforto por ter uma previsibilidade maior e prolongar a geração através da economia das águas dos reservatórios, no caso da solar-hídrica, ou pela complementaridade de acordo com o perfil de geração, como a solar-eólica (Alencar *et al.*, 2018).

Além da preservação das linhas de transmissão, o sistema híbrido também é capaz de facilitar logísticas futuras de operação e manutenção dos parques, e otimizar a área disponível e os equipamentos de geração, pois este modo de produção de energia compartilha a região instalada e aparatos elétricos necessários se tornando um projeto mais atrativo devido à redução de custos com terrenos e equipamentos, todo esse rearranjo gera um aumento no fator de capacidade em determinados horários (EPE, 2018). A Figura 9 mostra a complementaridade citada entre a energia solar e a eólica na localidade estipulada como 5 que representa a região oeste da cidade de Juazeiro do Norte na Paraíba.

Figura 9 - Complementaridade entre as renováveis



Com a modernização dos aparatos eletrônicos e das possíveis combinações de fontes de energia surge a necessidade de classificação de Usinas Híbridas, que organiza os conceitos e as barreiras físicas e burocráticas que as regem. Além disso, busca-se representar as inúmeras possibilidades que são rastreadas pelas empresas empreiteiras e a diferenciação dos arranjos entre usinas facilita na discussão dos pontos positivos e negativos para apresentar a real diferença entre usinas que apenas compartilham os equipamentos de geração ou somente o espaço físico (EPE, 2018). A Figura 10 faz referência aos tipos de Usinas Híbridas classificadas pela EPE (2018), que serão especificadas abaixo:

Figura 10 - Classificação de Usinas Híbridas



Fonte: EPE (2018)

- **Tipo 1 – Usinas Adjacentes:** Geralmente são construídas com uma certa proximidade podendo até compartilhar o mesmo terreno para as instalações, mas tratam-se de duas usinas distintas já que não há a partição de equipamentos de geração. Tratando-se de conexão, cada usina deve contratar sua capacidade de uso de rede de acordo com o seu potencial instalado nominal de acordo com as regras que regem este tipo de empreendimento. Por definição não são propriamente híbridas;
- **Tipo 2 – Usinas Associadas:** Já este arranjo além de compartilhar ou não o mesmo terreno, compartilham também a infraestrutura de conexão à rede,

seja a básica ou a de distribuição, este formato permite uma contratação menor do uso da rede. Perante o operador do sistema elétrico, essa formação permite visualizar somente uma única injeção de potência pois as usinas produzem independentemente uma da outra, podendo até mesmo compartilhar o medidor. Entretanto, essa disposição favorece o efeito chamado *curtailment*;

- **Tipo 3 – Usinas Híbridas:** As fontes geradoras se combinam já no processo de produção de energia elétrica; nessa formação não é possível identificar uma fonte primária ou secundária de geração;
- **Tipo 4 – Portfolios Comerciais:** Neste arranjo as usinas não compartilham o terreno e muito menos são próximas uma da outra, assim como os equipamentos. Sua existência é apenas para redução de custos.

Entretanto, um problema recorrente e que é fortemente estudado é o *curtailment* (ou corte), termo que é utilizado para a energia gerada não aproveitada por limitação do sistema de transmissão para distribuição da carga (EPE, 2018) e como a redução de geração na saída do gerador mesmo que os recursos estejam disponíveis para geração, fenômeno que pode acontecer involuntariamente (BIRD *et al.*, 2014). Esse efeito é próprio das Usinas Híbridas, com energias renováveis, devido sua geração intermitente.

Após os conceitos, além da limitação descrita, esse efeito pode acontecer por outros inúmeros motivos como por exemplo um excesso de geração em períodos curtos e a sobrecarga de equipamentos ligados à conversão de energia. Como limitação, as operações de rede referenciadas nos mercados de despacho de geração com base na economia podem diminuir o fator de capacidade do parque híbrido, gerando menos do que poderiam (BIRD *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o presente trabalho busca um mapeamento das regiões de acordo com a complementaridade energética existente propondo uma metodologia de estudo que mostrará quão benéfica será essa combinação de geração. Este estudo busca oferecer uma base para possíveis implantações de usinas desse caráter.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão abordadas discussões sobre os resultados obtidos após o tratamento dos dados.

4.1 Ferramenta de análise

A ferramenta para análise de dados foi o Excel dada a proximidade com o programa e a facilidade de visualização nos resultados com a construção de *dashboards* e gráficos.

4.2 Escolha das estações e disponibilidade de dados

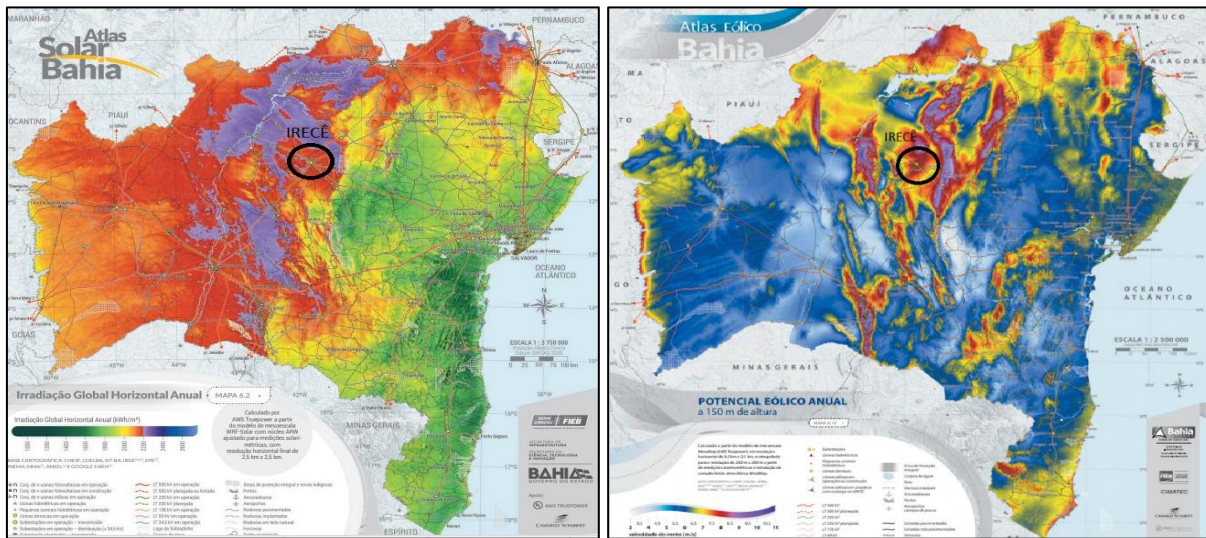
Para que a pesquisa consiga expressar uma relevância em trabalhos futuros e garantir a maior precisão possível na análise, foram escolhidas duas estações que possuíam a maior disponibilidade de dados disponíveis e com a menor quantidade de erros, estes causados por falta de leitura dos sensores. Além desta importância em trabalhos futuros, a delimitação do tema se deu devido a que os outros estados já possuem atividades principais sendo desenvolvidas diferente da geração de energia, ao contrário do estado do Rio Grande do Sul que vem sendo explorado devido a presença de ventos compatíveis com a geração eólica e o Nordeste, um celeiro de energia renovável

Para a escolha das estações foram analisadas diversas situações em que o mutualismo de geração pudesse ser benéfico, e como base, foram utilizados atlas eólico e solar brasileiro para identificação de zonas alvo de estudo, posteriormente dos dois estados em questão. Os mapas apresentados nestes índices auxiliaram na visualização das médias, assim como a extração e filtragem dos dados do INMET. Nota-se, ao observar a Figura 11 e 12, que a localidade escolhida talvez não seja a melhor solar ou a melhor eólica, se tratando de fontes, mas sim em que as médias das duas fontes geradoras pudessem se complementar.

Na Bahia, figura 11, Irecê fica na faixa vermelha de radiação global horizontal anual, indicando uma faixa de valores que oscilam entre 2000 e 2500 kWh/m². Se tratando de velocidade dos ventos a 150 metros de altura, é atingido por 8 m/s.

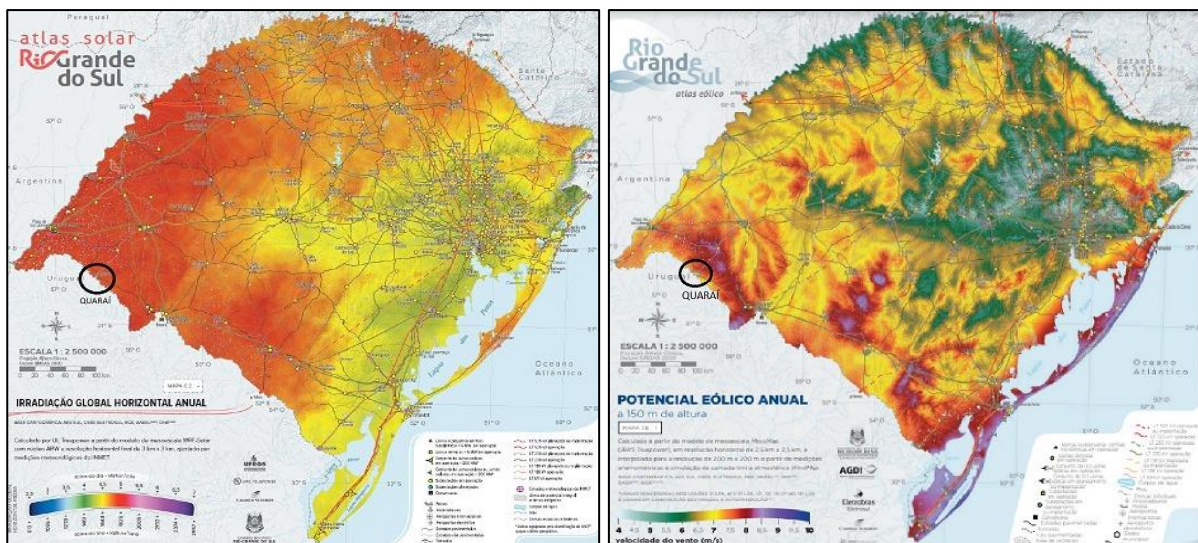
No Rio Grande do Sul, figura 12, Quaraí fica na faixa vermelha de radiação global horizontal anual, indicando uma faixa de valores que oscilam entre 1826 kWh/m². Se tratando de velocidade dos ventos a 150 metros de altura, atua entre 7,5 e 8 m/s.

Figura 11- Potencial solar e eólico da estação de Irecê, BA



Fonte: Governo do Estado da Bahia, adaptado (2018 e 2013)

Figura 12 - Potencial solar e eólico da estação meteorológica de Quaraí, RS

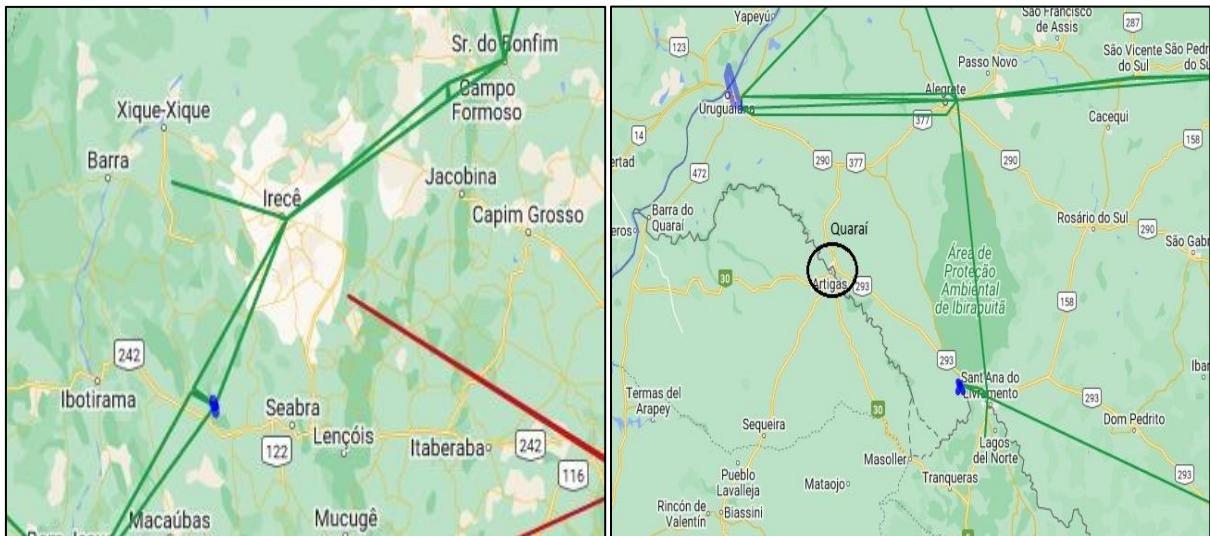


Fonte: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, adaptado (2018 e 2014)

Em síntese, foi escolhido um cenário que possua praticamente as mesmas características de incidência de radiação solar e velocidade dos ventos para que a pesquisa conseguisse trazer resultados mais realistas. Mas, sabe-se que os extremos do país possuem condições climáticas completamente distintas.

Também foi levado em consideração a proximidade com Linhas de Transmissão que pudessem atender o possível sistema, sendo assim Irecê possui várias linhas de 230 kV e Quaraí é cercada, pelo lado brasileiro, de linhas de 230 kV também. Estas linhas citadas são representadas pela cor verde na Figura 13, a de cor vermelha é de 500 kV.

Figura 13 - Localização das estações meteorológicas com relação as linhas de transmissão próximas



Fonte: ONS, adaptado (2022)

Ainda é válido ressaltar que entre as duas escolhidas, a estação que representa a região Sul do país apresentava uma quantidade de erros maior quando comparada com a do Nordeste, apesar disso, tais erros não foram contornados pois não iriam interferir na decisão de uma possível instalação híbrida nem nos índices calculados, devido a quantidade de erros em relação ao montante de dados.

Por último, é importante estabelecer o conceito de disponibilidade energética, fator que foi de suma importância para o desenvolvimento do presente trabalho. Entende-se esse conceito por energia disponível no momento ou disponibilizadas por

dois geradores, no caso, essa disponibilidade será dada em MJ/m² no caso da radiação solar e m/s a velocidade do vento, ambos dados horários.

4.3 Perfil de geração

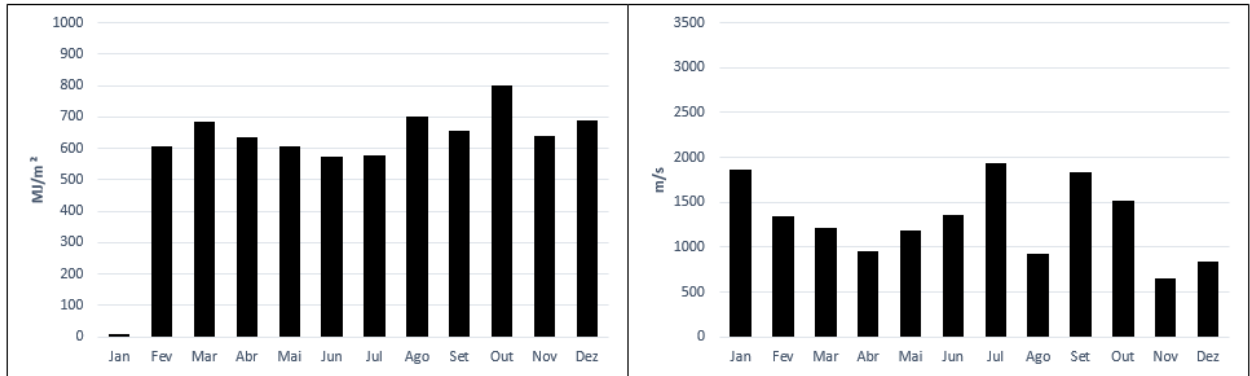
Para que as informações da disponibilidade energética e o perfil de geração ficassem palpáveis foram reproduzidos gráficos anuais de um possível despacho de carga.

A começar por Irecê na Bahia, nota-se um perfil de radiação solar constante durante os anos de análises, tendo sempre sua mínima nos meses que representam o inverno e o restante do ano se mantém crescente. Quando comparado com o restante do Brasil, mesmo com o período de inverno sendo a mínimas, essa irradiação recebida ainda é maior do que muitas outras regiões. Os valores variam entre 7,90 MJ/m² em janeiro de 2017 e 823,19 MJ/m² em dezembro de 2019.

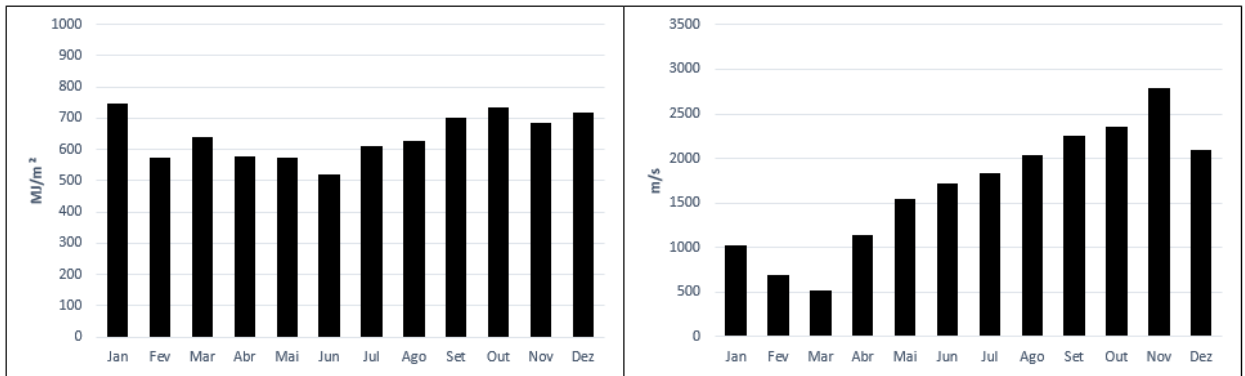
Entretanto, o regime de ventos desta região se apresenta bem variável durante o ano, mas tem como tendência aumentar e atingir sua máxima nos meses que representam a primavera, logo em seguida dos períodos mínimos da irradiação. O ano de 2017 pode ser considerado um ano atípico dado seu perfil de geração ter ficado muito baixo quando comparado aos demais anos, mas mesmo assim, possui suas máximas no mesmo período.

O mês de janeiro também deve ser levado em consideração, pois apresenta valor expressivos no ano de 2017, 2019 e 2020. Os valores de velocidade do vento atingem seu máximo em outubro de 2019 e mínima em março de 2018, sendo respectivamente 2946,7 m/s e 525,4 m/s.

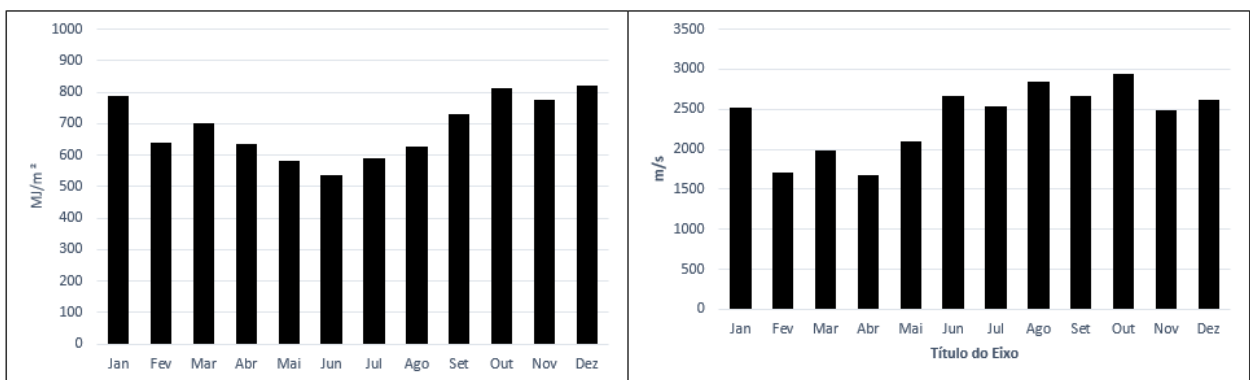
Figura 14 – Perfil da irradiação solar e velocidade do vento em Irecê em (a) 2017, em (b) 2018, em (c) 2019, em (d) 2020 e em (e) 2021.



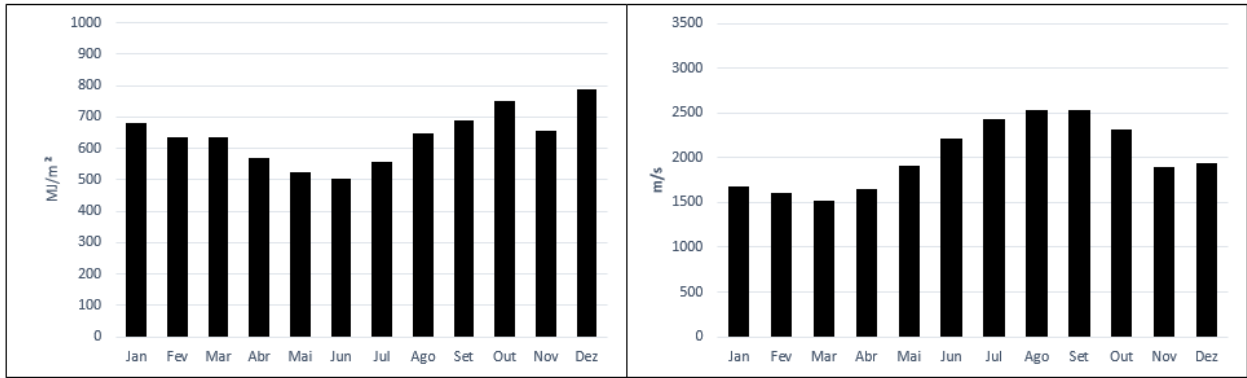
(a)



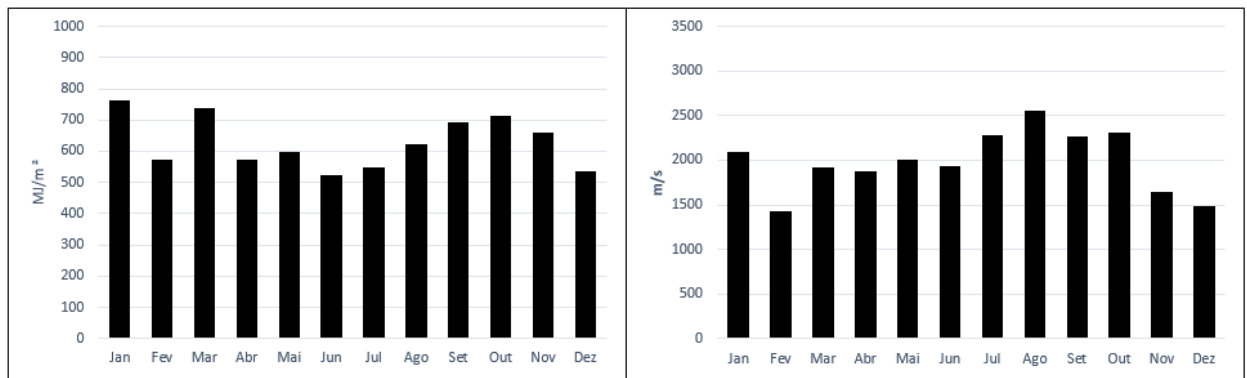
(b)



(c)



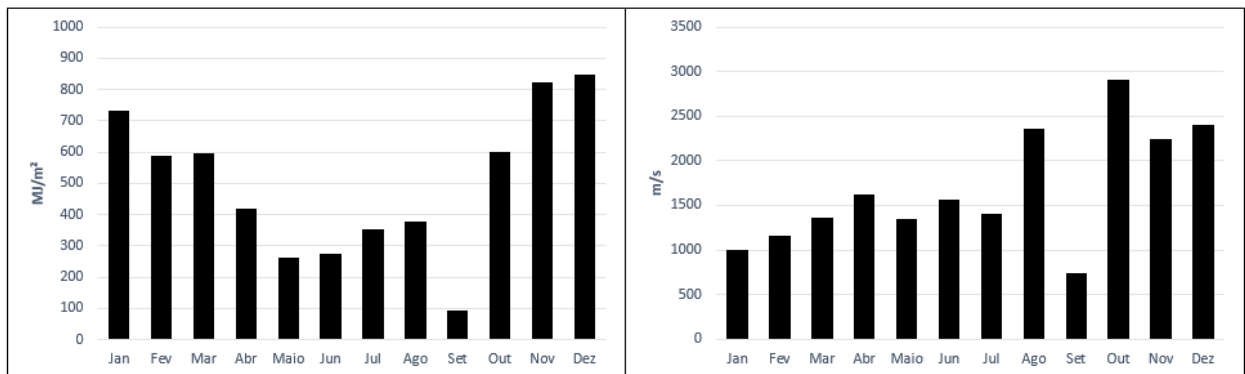
(d)



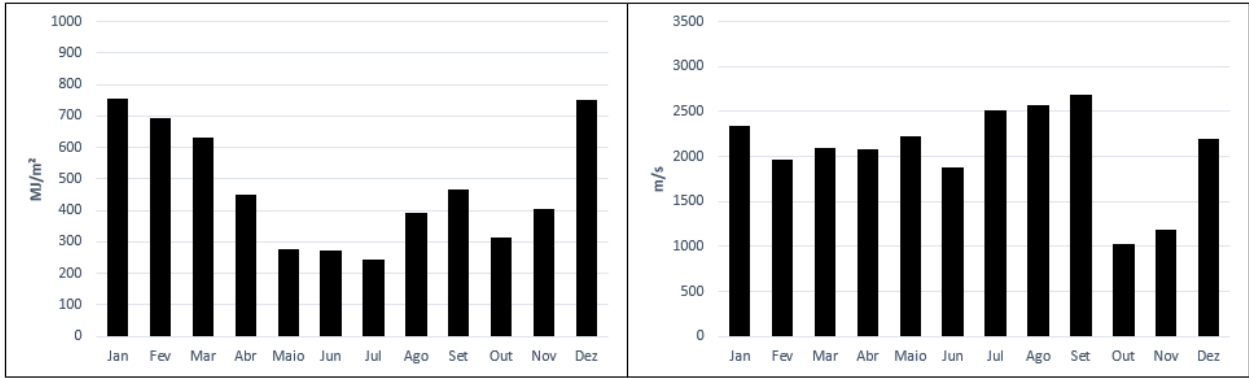
(e)

A Figura 14 representa Irecê e a Figura 15 a cidade de Quaraí.

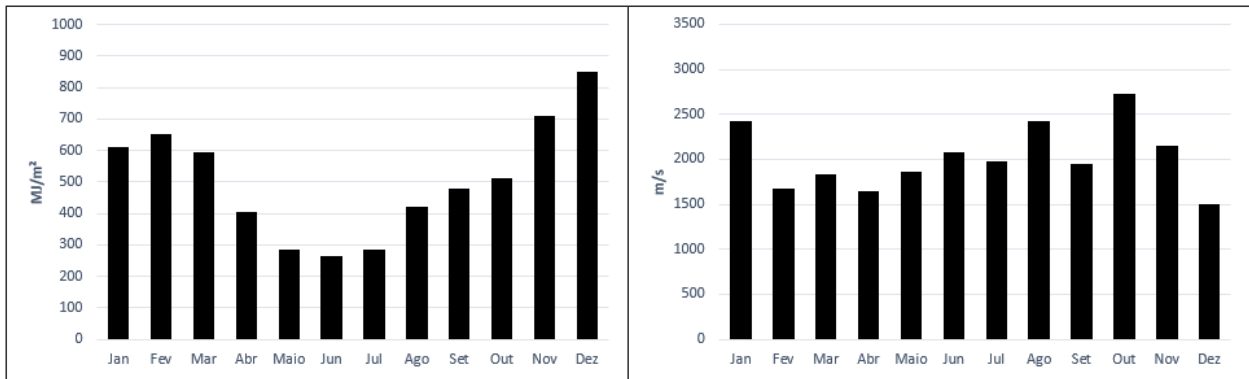
Figura 15 – Perfil da irradiação solar e velocidade do vento em Quaraí em (a) 2017, em (b) 2018, em (c) 2019, em (d) 2020 e em (e) 2021.



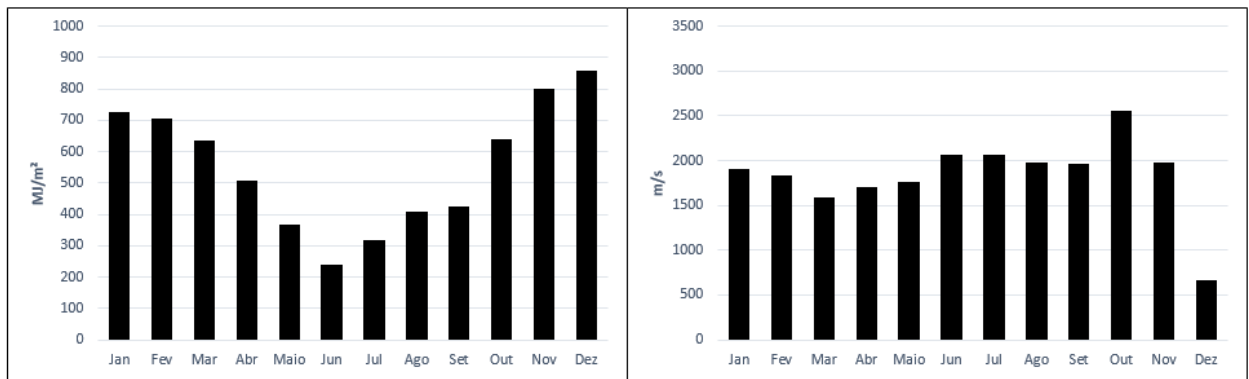
(a)



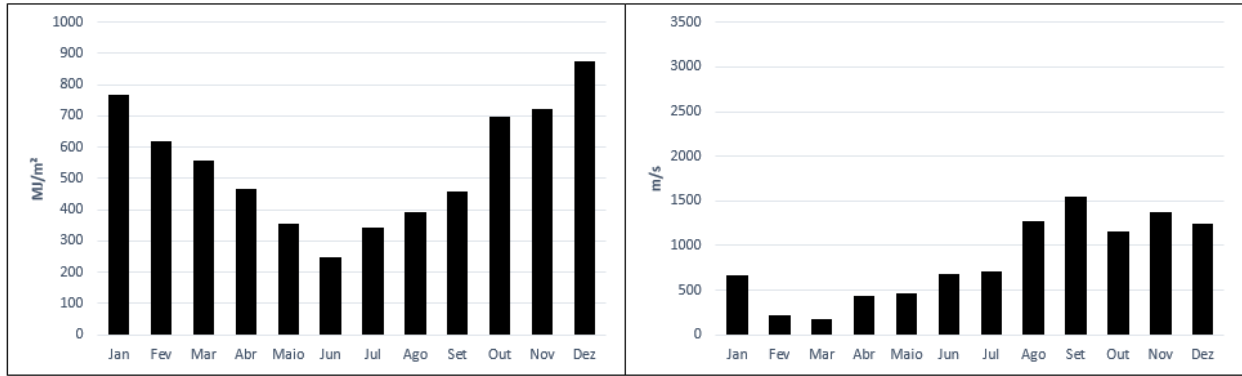
(b)



(c)



(d)



(e)

Quaraí apresenta um perfil de geração muito bem definido e assim como Irecê, sua mínima no inverno seguido de uma crescente de radiação solar. Entretanto, o inverno na região Sul é muito diferente quando comparado a região Nordeste, a tendência no Rio Grande do Sul é apresentar dias mais nublados e chuvosos além das baixíssimas temperaturas por fazer divisa com o Uruguai.

Outro ponto a ser analisado é o início do ano, que tem como tendência apresentar valores mais altos, assim como os meses que antecedem o final do ano. Enquanto em Irecê os valores se apresentam altos durante o ano todo em todos os anos analisados, em Quaraí esses valores só são atingidos em épocas de máximas da irradiação solar.

Os valores de irradiação solar variaram entre 876,48 MJ/m² em dezembro de 2021 e 94,26 MJ/m² em setembro de 2017.

O perfil de ventos da região é muito oscilatório, mas continua mantendo seu valor mais alto no período seguinte da mínima solar. O ano de 2021 pode ser considerado um ano atípico dado os valores atingidos que se deram pela maior presença de erros na leitura dos sensores. Além disso, durante os anos de 2019, 2020 e 2021 os valores se mantiveram tão altos quanto a Bahia.

Os valores de velocidade dos ventos variaram entre 2913,8 m/s em outubro de 2017 e 180,2 m/s em março de 2021.

4.4 Índices de Complementaridade

A seguir serão mostrados e analisados os índices de complementaridade propostos. Vale ainda ressaltar que estes índices foram analisados de maneira anual para que o período apresentasse resultados mais vantajosos em um menor período de tempo e, variam de zero a um.

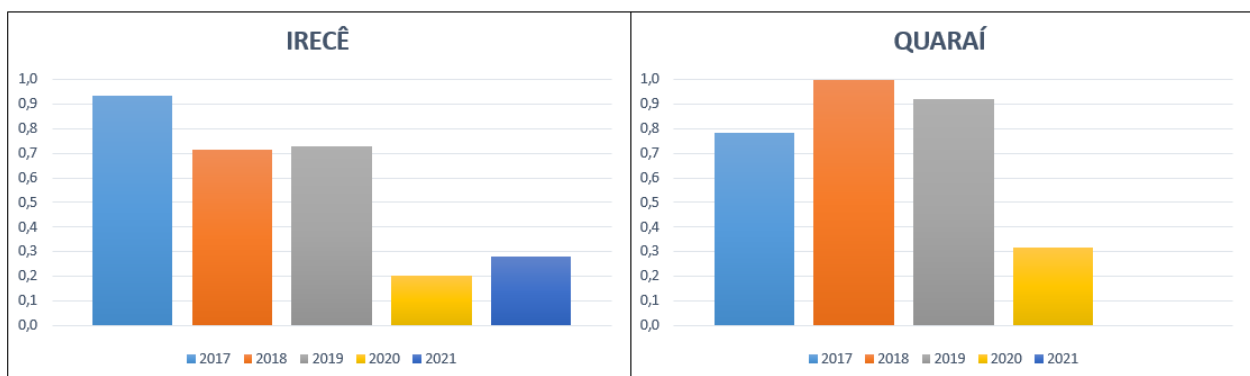
4.4.1 Índice de complementaridade no Tempo

Sendo definido como a equação que avalia o intervalo de tempo entre os valores mínimos e máximos da disponibilidade energética (JURASZ *et al.*, 2021), os valores encontrados seguem a Figura 16.

$$i_t = \frac{|d_e - d_s|}{\sqrt{|D_e - d_e| |D_s - d_s|}} \quad (3)$$

Apesar de atingir bons resultados de 2017 até 2019, a complementaridade no tempo precisou ser analisada graficamente de acordo com o ajuste de curva para utilização de valores mensais que apresentavam um bom ajuste e não somente os valores de máximas e mínimas diárias.

Figura 16 - Comparativo entre os índices de Complementaridade no Tempo



Fonte: Autoria própria (2022)

Apesar dos anos de 2020 e 2021 nas duas regiões não apresentarem valores significativos e benéficos desta relação, deve-se destacar os altos índices atingidos

pelos demais anos, dando destaque para o ano de 2018 em Quaraí, onde esse valor atingiu o valor unitário 1.

Destaca-se também o menor valor desta relação, atingido pelo ano de 2021 em Quaraí o valor de zero, conforme o gráfico.

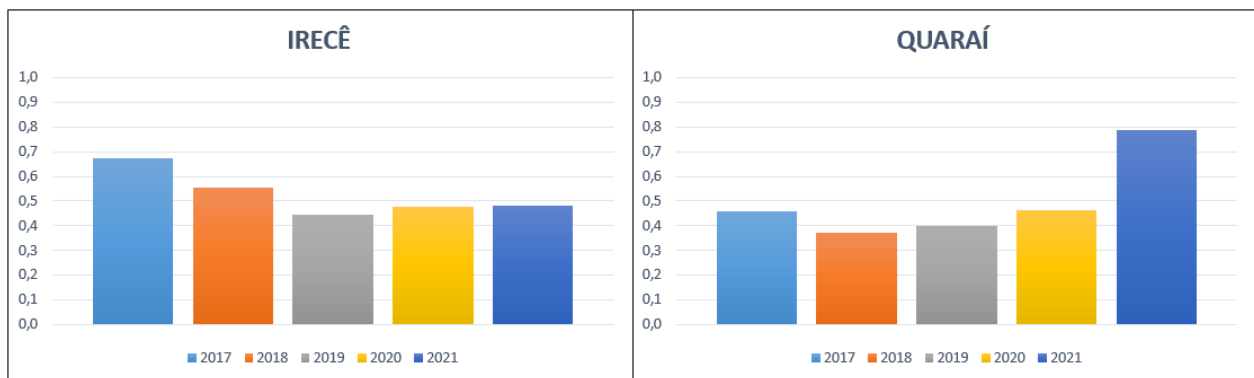
4.4.2 Índice de complementaridade de Energia

Avalia as proporções entre os valores médios das funções da disponibilidade energética e faz uma relação da soma anual de geração das cargas. Além disso, traz um coeficiente que compara essa soma annual. Os valores de i_e são representados pela Figura 17. O índice é representado pela Equação 4 e o coeficiente comparativo pela Equação 5 (BELUCO, 2001).

$$i_e = 1 - \sqrt{(1 - c_e)^2} \quad (4)$$

$$c_e = \frac{2}{1 + \frac{E_g}{E_s}} \quad (5)$$

Figura 17 – Comparativo entre os índices de Complementaridade de Energia



Fonte: Autoria própria (2022)

O índice apresenta os maiores valores em Quaraí em 2021 onde o marcador atingiu o valor de 0,8. Já em Irecê o valor máximo foi próximo a 0,7 em 2017.

Porém, os valores encontrados não demonstram uma boa complementaridade de energia, apresentando valores a baixo da média e indicando que uma das fontes se sobressai em relação a outra.

4.4.3 Índice de complementaridade de Amplitudes

Constrói a relação entre os valores máximos e mínimos das duas funções de disponibilidade energética e relaciona com a média de geração anual (JURASZ, 2021), representado pela Equação 6. A Figura 18 mostra um comparativo anual entre os valores encontrados nessa relação.

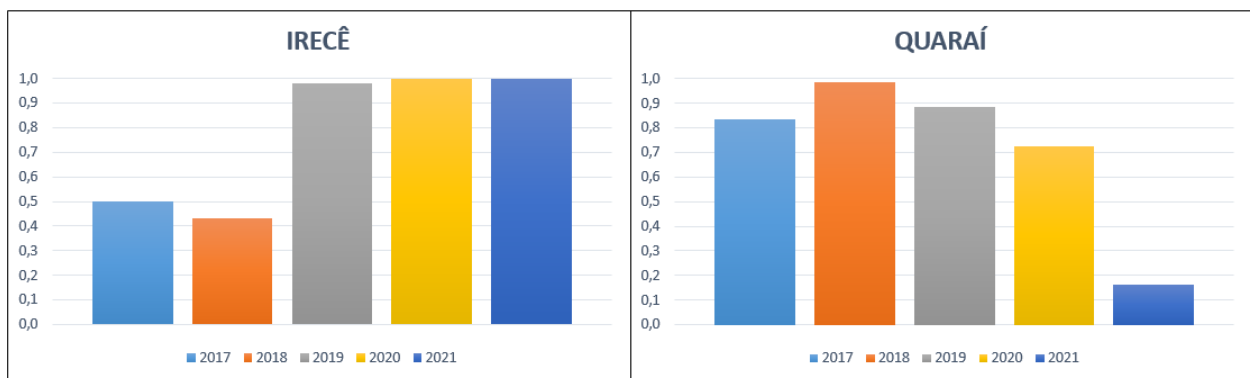
$$i_a = \begin{cases} \left[1 - \frac{(\delta_e - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2} \right] & \text{para } \delta_e \leq \delta_s \\ \left[\frac{(\delta_e - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2 + (\delta_e - \delta_s)^2} \right] & \text{para } \delta_e > \delta_s \end{cases} \quad (6)$$

As variáveis δ_e e δ_s , apresentadas nas Equações 7 e 18, dependem da diferença entre o máximo e o mínimo das disponibilidades energéticas ($E_{d e máx}$, $E_{d e mín}$, $E_{d s máx}$, $E_{d s mín}$), e a energia média diária consumida pelas cargas pode ser considerada constante ao longo do dia e do ano ($E_{d c}$).

$$\delta_e = 1 + \frac{E_{d e máx} - E_{d e mín}}{E_{d c}} \quad (7)$$

$$\delta_s = 1 + \frac{E_{d s máx} - E_{d s mín}}{E_{d c}} \quad (8)$$

Figura 18 - Comparativo entre os índices Complementaridade de Amplitude



Fonte: Autoria própria (2022)

Os índices se mantiveram com valores bem próximos a uma unidade nos anos de 2019, 2020 e 2021 em Irecê. A estação que representa o Rio Grande do Sul, de maneira geral, apresentou resultados que nos mostra uma boa relação entre os picos de geração, destacando os anos de 2017 a 2021 se mantendo a cima de 0,7. Este

fator, foi o unico que Quaraí se mostrou mais apta a receber uma associação de geração, mas, trata-se de um motive isolado.

O restante não conseguiu mostrar uma boa relação entre os picos, 2017 e 2018 em Irecê se mantiveram a baixo da média. Em Quaraí os valores se aproximaram ao menor valor possível, demonstrando uma relação praticamente inexistente no ano de 2021.

4.4.4 Índice de Complementaridade

O índice de complementaridade (i_c) é um indicador que simboliza o grau de complementação entre a disponibilidade de geração entre as duas fontes de energia. O índice é definido abaixo pela Equação 9 (BELUCO, 2001):

$$i_c = i_t i_e i_a \quad (9)$$

Uma vez definidos os valores parciais do índice de complementaridade, podemos analisar o valor integro de i_c , representado na Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Valores dos Índices de Complementaridade de Irecê

Ano	i_t	i_e	i_a	i_c
2017	0,933	0,675	0,500	0,315
2018	0,712	0,555	0,434	0,172
2019	0,729	0,445	0,979	0,318
2020	0,201	0,479	0,999	0,096
2021	0,278	0,480	0,998	0,133

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 2 - Valores dos Índices de Complementaridade de Quaraí

Ano	lt	le	la	lc
2017	0,782	0,457	0,835	0,298
2018	1,000	0,371	0,986	0,366
2019	0,919	0,399	0,885	0,324
2020	0,316	0,462	0,727	0,106
2021	0,000	0,790	0,161	0,000

Fonte: Autoria própria (2022)

Apesar dos valores encontrados não serem tão favoráveis a complementaridade desejada, a média geral (levando em consideração os valores das duas estações) é aproximadamente 0,61, e quando analisamos separadamente os índices é visto que essa mutualidade pode ser benéfica em certas ocasiões.

Além disso, dada sua proporcionalidade, quando um dos índices atingir um valor muito baixo e outros dois muito altos, lc tenderá ao menor valor, fator que ocorre em 2018 e 2019 em Irecê.

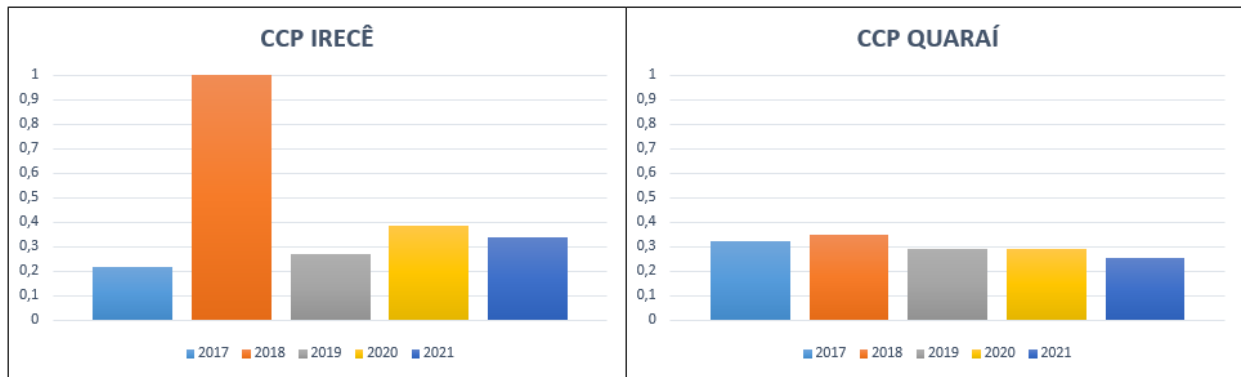
4.5 Coeficiente de correlação de Pearson

Mede o grau de correlação linear entre os dados, em síntese, quanto as duas variáveis estudadas se associam, e de acordo com o grau dessa relação podemos classificar o sistema de equações (Malawi Medical Journal, 2012). O coeficiente é demonstrado na equação 10.

$$CCP = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

No CCP, x_i e y_i são os valores de x , disponibilidade solar, e y , disponibilidade eólica, na i -ésima posição \bar{x} e \bar{y} são as médias aritméticas das variáveis.

Figura 19 – Comparativo entre os coeficientes de correlação de Pearson



Fonte: Autoria própria (2022)

Nota-se que na Figura 19, a Bahia se manteve na faixa de 0,20 a 0,39 o que indica um grau de correlação fraca, porém em 2018 atingiu o valor de 0,99, mostrando um grau muito forte entre as duas variáveis. Já no Rio Grande do Sul, todos os valores apresentaram um grau fraco de correlação também.

4.6 Fator de Capacidade Normalizado

Por conceito, este fator permite comparar as estações e observar os períodos de maior e menor geração. Além disso, como apresentou números muito pequenos devido a utilização de valores de acordo com a disponibilidade energética da estação, foi necessária uma normalização para adequar e facilitar a visualização dos resultados. Esta normalização faz o Fc normalizado variar de zero a um.

$$F_c = \frac{P_{instalada}}{E * t} \quad (11)$$

Com base na Equação 11, por se tratar de uma usina de geração mutua, foi utilizado o maior valor entre as somas de radiação solar e velocidade do vento mensal como potência instalada (sendo a maior disponibilidade energética no tempo analisado, no caso, mensal e separada por ano) e a energia gerada no mês como E , o tempo seguiu a quantidade de horas mensais.

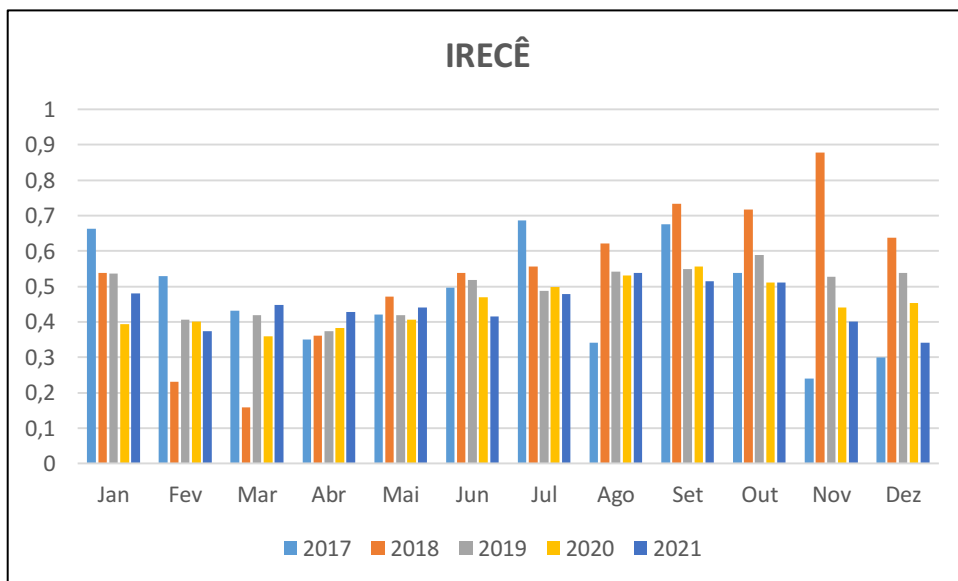
Analisando a figura 20, Irecê mostra que a geração é benéfica durante todo o ano se mantendo com índices a cima da média, nota-se uma leve diminuição em

fevereiro, março e abril, seguida de uma ascensão a valores máximos, como em novembro de 2018 que atingiu a marca de 0,87. O valor mínimo foi no mês março do mesmo ano, 0,15.

Já a estação de Quaraí, Figura 21, os valores encontrados foram muito menores com relação a disponibilidade energética da região Nordeste, atingindo sua máxima em outubro de 2017 e 2019, setembro de 2018 e dezembro de 2021 com 0,53 e mínima em setembro de 2017 com 0,13.

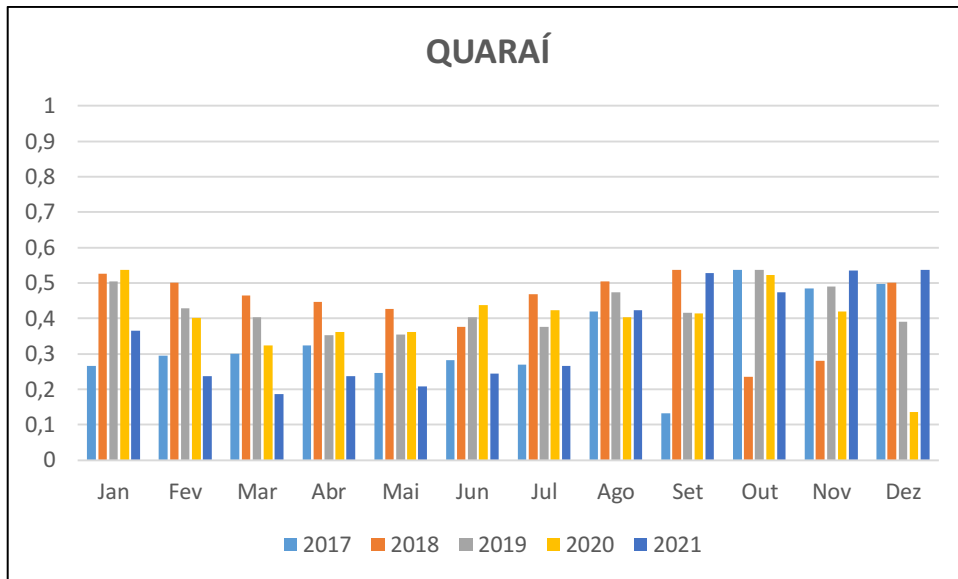
Apesar disso, as duas regiões apresentaram a mesma tendência gráfica, leve diminuição nos meses de fevereiro, março e abril e um aumento de valores até o final do ano. Ainda, Quaraí se mantém constante após o mês de setembro até o final do ano, e Irecê tende a diminuir. Mas claro, cada um com a sua especificidade, o Nordeste com valores bem mais alto que o Sul.

Figura 20 - Fator de Capacidade normalizado em Irecê



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 21 - Fator de Capacidade normalizado do Quaraí



Fonte: Autoria própria (2022)

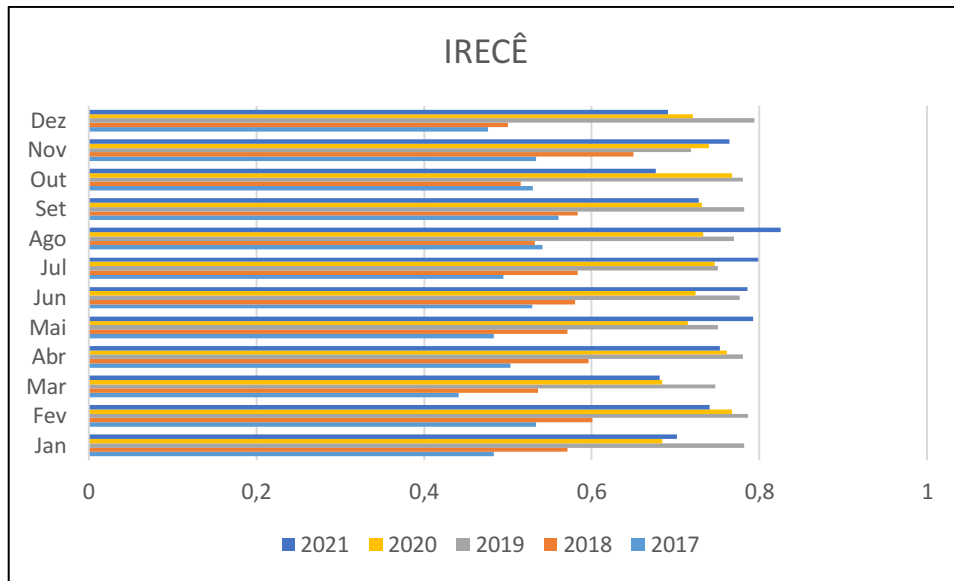
4.7 Fator de Simultaneidade

Buscava-se um índice que pudesse traduzir a relação entre as duas gerações de energia, que são intermitentes, e que pudesse trazer uma idéia palpável da possibilidade de implantação de uma usina híbrida nas regiões escolhidas. O Fator de Simultaneidade trata as duas fontes e as relaciona como uma só geração, utilizando valores percentuais com relação aos picos de geração.

Através da Figura 22, Irecê se demonstrou com fatores em sua grande parte perto de 0,7 e em alguns casos chegando em 0,82, como em agosto de 2021 com a mínima e 0,44 em março de 2017.

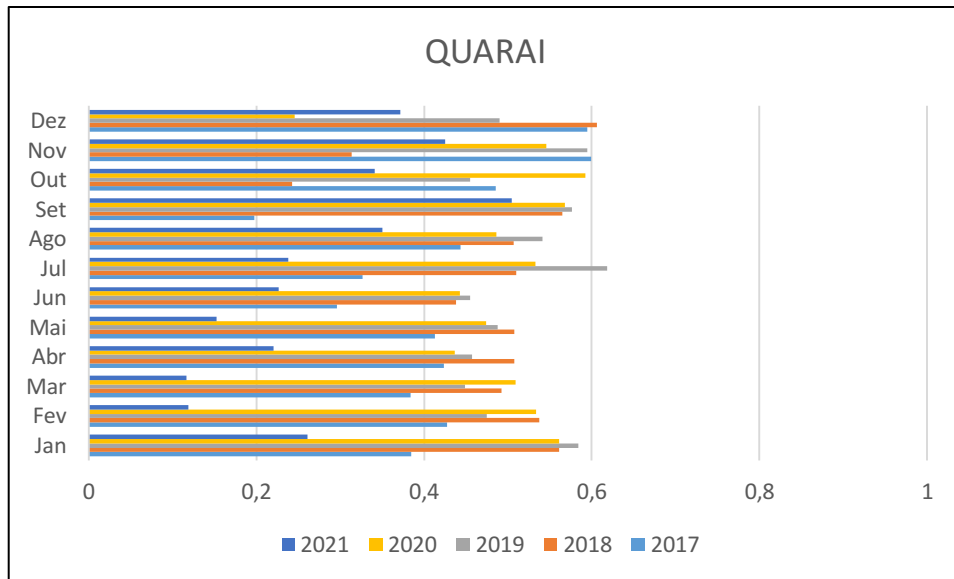
Já a Figura 23, Quaraí não apresentou valores muito maiores que 0,5, sua máxima atingiu 0,61 em julho de 2019 e a mínima 0,16 março de 2021 que por coincidência, foi o mesmo mês e ano que a primeira estação apresentou seu menor valor.

Figura 22 - Fator de Simultaneidade de Irecê



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 23 - Fator de Simultaneidade de Quaraí



Fonte: Autoria própria (2022)

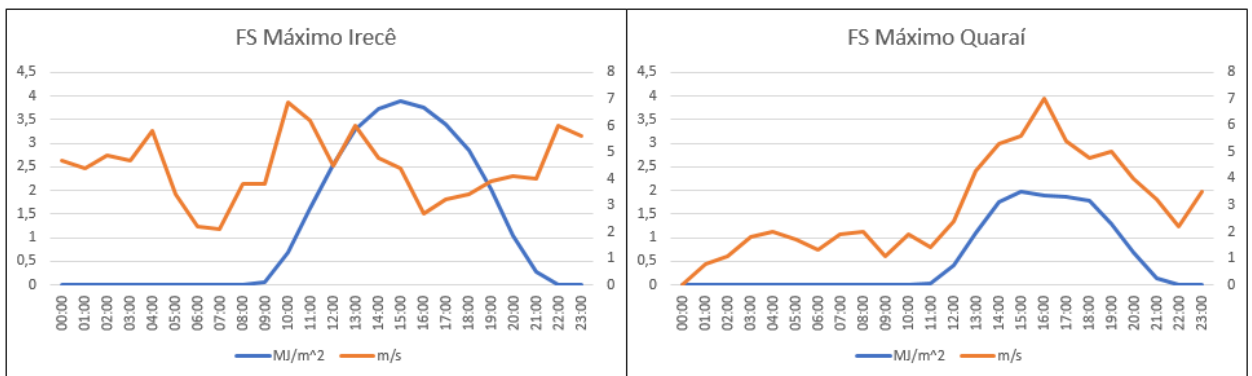
4.8 Estudo comparativo entre os Fatores de Simultaneidade

Além dos valores apresentados de FS, é necessário fazer uma comparação entre os maiores valores de cada região para traçar um perfil de geração mais próximo

ao real, e com intuito de dimensionamento, descobrir o maior valor possível de despacho da carga instalada.

Porém, por ser um índice que tem como valor máximo 1, não significa necessariamente que teremos uma geração máxima quando este fator atingir seu pico, mas sim uma razão entre as duas fontes mostrando uma geração equivalente.

Figura 24 - Comparativo entre os Fatores de Simultaneidade máximo



Fonte: Autoria própria (2022)

Para isso, é necessária uma análise diferenciada em cima da série de dados que representa o FS diário, seguindo alguns critérios:

- ✓ Maior FS diário entre os anos;
- ✓ Porcentagem de geração mais próxima de 1;
- ✓ Menor diferença entre as porcentagens de geração.

Após as análises, Figura 29, para Irecê o maior FS encontrado foi de 0,992 no dia 01 de janeiro de 2017, com as porcentagens solar e eólica sendo respectivamente 96,5% e 95,7%. Para Quaraí, FS teve o valor de 0,942 no dia 07 de novembro de 2018, e 84,23% para solar e 89,43% para eólica.

A Figura 24 simboliza o despacho de carga de uma dia em que ambas as fontes geradoras estão a pico.

Nota-se que no Rio Grande do sul a disponibilidade eólica supera a solar, não representando uma complementaridade adequada. Por outro lado, na Bahia essa disponibilidade energética é recíproca em ambas as fontes, se complementando em horários do dia em que uma das gerações diminui.

5 CONCLUSÃO

Com objetivo de explorar o potencial híbrido brasileiro, busca-se relações benéficas da geração mútua, como a maior confiabilidade da operação do sistema interligado, dada a presença de fontes intermitentes para suprir a demanda em períodos não favoráveis ao despacho de usinas hidroelétricas, representando a maior parte da matriz energética, evitando um possível aumento nas taxas para utilização do sistema elétrico.

Traçando o perfil de despacho, a energia solar fotovoltaica se mostrou muito uniforme nas duas estações, com curvas bem definidas e suas máximas e mínimas se coincidindo, respectivamente no verão e inverno. A principal diferença é a incidência de radiação solar nas regiões, Irecê apresenta uma grande vantagem dada suas características climáticas da região nas estações do ano citadas. Enquanto a Bahia se mantém ensolarada o ano todo, o Rio Grande do Sul tem um clima com temperaturas mais baixas e um inverno que compromete a incidência de raios solares.

Por outro lado, o perfil de despacho eólico nas duas regiões se apresentou bastante variável, porém, as médias tenderam a ficar sempre altas e se manterem, começando a partir de julho, aproximadamente. Outra coincidência, é que a máxima de geração sempre ocorre na mesma época, meses que acontecem depois do inverno, onde é a mínima da geração solar.

Em relação aos índices de complementaridade propostos, Irecê e Quaraí apresentaram valores que condizem com a realidade de geração de energia híbrida, sendo alguns destes próximos a uma unidade que demonstram um alto grau de complementaridade energética entre as duas fontes. Se tratando de anos isolados, alguns não conseguiram atingir valores expressivos que demonstrassem essa mutualidade.

Entretanto, na Bahia, o CCP não comprovou a proporcionalidade desejada entre os dados, com predominância de valores de baixo grau de correlação, assim como o Rio Grande do Sul. Mas destaca-se o maior valor encontrado nessa relação em 2018 em Irecê, indicando uma correlação muito forte entre as duas analisadas. Apesar de não ser costumeiramente aplicado em conjunto de dados que não são constantes, este conjunto apresenta uma constância no tempo, dada sua intermitência de geração.

Além disso, vale ressaltar que ao assumir valores positivos, mesmo que próximos a zero, nos possibilita afirmar que existe uma correlação entre os dados, ou seja, existe uma complementaridade energética entre as disponibilidades energéticas nas duas regiões, mesmo que fraca.

O fator de simultaneidade e o fator de capacidade se mostraram bem relevantes para a pesquisa. Pelo FC foram apresentados valores máximos de geração que uma usina pode apresentar a quesito de dimensionamento, apesar de não subdimensionar usinas que possuem geração oscilatória. Nota-se também um perfil de despacho solar muito parecido com as duas regiões, o que demonstra que no período que representa o inverno, a geração de energia da possível usina híbrida tende a diminuir sua produção já que a ólica também não estará a pico nesta época. A relação de complementaridade se segue saudável o ano todo, com uma leve queda nos meses de fevereiro, março e abril. Cada estação dentro da sua realidade de disponibilidade.

Já o fator de simultaneidade pode demonstrar o potencial da região, e, em valor percentual, a relação de geração entre as duas fontes e o quanto essa relação conseguiria se manter de maneira positiva. Porém, nem sempre seu maior valor demonstra uma maior geração, para essa análise é necessária uma inspeção mais minuciosa.

Deve-se analisar cada situação separadamente, devido as condições climáticas de FS máximo e a possível geração máxima de cada região. Irecê apresentou um perfil de complementaridade mais definido, coincidindo os períodos em que uma fonte está na máxima e a outra na mínima, com intervalos de oscilação. Em Quaraí esse perfil já não é tão expressivo assim por apresentar uma disponibilidade energética eólica maior que a solar. Se tratando de valores de FS, como já esperado, Irecê se destacou mantendo seus valores na casa de 0,7, mostrando uma geração anual constante e um grande potencial da região.

Em complementação aos dois fatores, as duas regiões se localizam nos extremos do país com características climáticas completamente diferentes, de acordo com os gráficos de despacho, nota-se uma semelhança de geração com uma curva em formato de "U", com mudança apenas na incidência de radiação. Já a eólica, com um perfil mais variável em Quaraí, as duas regiões têm como tendência apresentar uma geração crescente ao longo do ano, atingindo sua máxima na primavera.

Sem dúvida, os índices demonstrados e os gráficos de despacho podem ser considerados uma ferramenta para análise de implantação de um sistema híbrido em uma certa região, porém, outros fatores devem ser levados em consideração, principalmente os econômicos e a disposição do espaço físico utilizado pelas duas fontes.

Se tratando de espaço físico, como contribuição, este tipo de associação se torna eficiente em escala reduzida também, conseguindo atender locais com difícil acesso da rede de transmissão (sistemas isolados).

Por fim, visto a crescente nas pesquisas e na utilização de fontes renováveis, principalmente a eólica e a solar fotovoltaica, é de se esperar que o foco em aprimoramento dos materiais e geradores elétricos aumente drasticamente, sendo assim, este trabalho não perderá sua validade devido a utilização de dados de disponibilidade energética, como MJ/m^2 e m/s . Simulações poderão ser feitas independentemente do modelo de gerador escolhido, seja uma placa solar mais atual do mercado ou um aerogerador recém desenvolvido.

REFERÊNCIAS

MONTEIRO, Andressa Lorayne. **ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA RENOVÁVEL (EÓLICO-SOLAR) NA ILHA DO MEL**. 2018. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

Disponível em: https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2017_2_20/2017_2_20_final.pdf. Acesso em: 15 de mar. 2022.

GOMES, Mateus Straub. **ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA DE USINAS HÍBRIDAS EÓLICA-FOTOVOLTAICAS NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**. 2021. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia,

Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/228475>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

MAIA, Diego Nascimento. **AVALIAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA DE USINAS HÍBRIDAS DO BRASIL**. 2021. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica - Rio, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://www.ind.puc-rio.br/informes/defesa-mestrado-avaliacao-economico-financeira-de-usinas-hibridas-no-brasil/>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

ALVES, Arileide Cristina; YANG, Renata Lautert. **ESTUDO DA COMPLEMENTARIDADE DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA PELO ESTADO DO PARANÁ ATRAVÉS DA FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA NO HORIZONTE 2050**. 2017. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/8229>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

EIFLER NETO, Evandro Enio. **ESTUDO DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE AS DISPONIBILIDADES DE ENERGIA HÍDRICA E EÓLICA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**. 2012. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/114593>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

RICARDO, Guilherme *et al.* **ESTUDO DA COMPLEMENTARIDADE ENTRE AS FONTES EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA DO ESTADO DO PARANÁ.** 2015. 138 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8186/3/CT_COEAU_2015_1_08.pdf. Acesso em: 15 de mar. 2022.

FISCH, Leandro Benhur Klinger. **MODELAGEM, CONTROLE E OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DIRECT-DRIVE DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA DE 10MW.** 2021. 236 f. PÓS-GRADUAÇÃO - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/222037>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

MAROZINSKI, Paulo Raffael. **AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE UMA USINA HÍBRIDA EÓLICO-FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.** 2018. 61 f. Monografia (Especialização) - Curso de Energias Renováveis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18575/1/CT_CEER_IV_2018_12.pdf. Acesso em: 15 de mar. 2022.

GOVEIA, Paulo Ricardo Selhorst *et al.* **INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA E FOTOVOLTAICA: ANÁLISE SOB ASPECTOS DE FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITO.** 2018. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2017_1_30/2017_1_30_final.pdf. Acesso em: 15 de mar. 2022.

VIANA, Susana Filipa Almeida Castro. **MODELAÇÃO DE MIRCO-SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICOS/EÓLICOS PARA PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA.** 2010. 340 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências de Engenharia, Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010. Disponível em: <https://repositorio.Ineg.pt/handle/10400.9/1115>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

WENZEL, Guilherme München. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**. 2007. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/viewFile/3490/2738>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

ROCHA, Iago D'Andrade Ribeiro da. **PROJETO AERODINÂMICO DE AEROGERADORES DO TIPO HAWT ACOPLANDO A TEORIA CLÁSSICA COM A TEORIA DE ASAS 3D**. 2018. 215 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023055.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

SOUZA, Ramon Tanoeiro de Oliveira. **ANÁLISE ANALÍTICA, EXPERIMENTAL E NÚMERICA DE PERFIS AERODINÂMICOS PARA SELEÇÃO EM AEROGERADOR DE BAIXA VELOCIDADES**. 2019. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/43021/2/TCC.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

BIRD, Lori *et al.* **Wind and Solar Energy Curtailment: Experience and Practices in the United States**. Springfield: National Renewable Energy Laboratory, 2014. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60983.pdf>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

CAMPOS, Rafael Antunes. **Análise da complementaridade de geração de usinas solar e eólica e o papel do armazenamento de energia para Usinas Híbridas**. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216398>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

JURASZ, J. *et al.* **A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. Solar**

Energy, v. 195, n. April 2019, p. 703–724, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

MALAWI-LIVERPOOL WELLCOME TRUST CLINICAL RESEARCH PROGRAM (United States). **A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research**. **Malawi Medical Journal**. Malawi, p. 69-71. Set. 2012. Disponível em:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3576830/>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

BELUCO, Alexandre *et al.* A COMPLEMENTARIDADE NO TEMPO ENTRE AS ENERGIAS HIDRELÉTRICA E FOTOVOLTAICA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 99-109, Jan. 2003. Disponível em:
<http://www.beluco.net/papers/2003-beluco-souza-krenzinger-rbrh.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

BALUCO, Alexandre. **BASES PARA UMA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE APROVEITAMENTOS HÍBRIDOS BASEADO EM ENERGIAS HIDRELÉTRICAS E FOTOVOLTAICAS**. 2001. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13834>. Acesso em: 15 de mar. 2022.

HAU, Erich. **WIND TURBINES: fundamentals, technologies, application, economics**. 2. ed. Krailling: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 791 p. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/288447594_Wind_Turbines_Fundamentals_Technologies_Application_Economics. Acesso em: 20 de abr. 2022.

ALENCAR, Cristiano Andrade de *et al.* ESTUDO DA COMPLEMENTARIDADE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE AS FONTES SOLAR E HIDRÁULICA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: Cbens, 2018. p. 1-10. . Disponível em:
<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/503/503>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

IKHSAN, M. *et al.* STUDY OF RENEWABLE ENERGY SOURCES CAPACITY AND LOADING USING DATA LOGGER FOR SIZING OF SOLAR-WIND HYBRID POWER SYSTEM. In: international Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2013), 4., 2013, Kebangsaan. **Anais [...]**. Kebangsaan: Procedia Technology, 2013. p. 1048-1053. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313004477>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

YARAMASU, Venkata *et al.* HIGH-POWER WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS: STATE-OF-THE-ART AND EMERGING TECHNOLOGIES. **Ieee**, [s. l.], v. 103, n. 5, p. 740-788, maio 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7109820>. Acesso em: 04 de mai. 2022.

CORKE, Thomas *et al.* **WIND ENERGY DESIGN**. Boca Raton: Crc Press, 2018. 54 p. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/b22301-6/wind-turbine-control-thomas-corke-robert-nelson>. Acesso em: 19 abr. 2022.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **INTRODUÇÃO A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E O SFVCR DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR**. Curitiba: Autoria Própria Para A Semana da Engenharia - lep, 2014. 56 slides, color. Disponível em: <https://docplayer.com.br/5986948-Introducao-a-energia-solar-fotovoltaica-e-o-sfvcr-do-escritorio-verde-da-utfpr.html>. Acesso em: 31 abr. 2022.

BEZERRA, Francisco Diniz *et al.* ENERGIA SOLAR NO NORDESTE. **Caderno Setorial Etene**, Ceará, v. 1, n. 1, p. 26-40, set. 2016. Disponível em: s1dsp01.dmz.bnb:8443/s482-dspace/handle/123456789/1138. Acesso em: 18 mar. 2022.

FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)*. **Revista Política Hoje**, [S. L.], v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3852/3156>. Acesso em: 05 mai. 2021.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do *et al.* **ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO**. Brasília: Ministério Minas Energia, 2001. 44 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>. Acesso em: 20 mar. 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA, DA INDÚSTRIA NAVAL E DO PETRÓLEO (Rio de Janeiro). Governo do Estado do Rio de Janeiro. **ATLAS EÓLICO**. 1 ed. Camargo e Schubert, 2002. 64 p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf. Acesso em: 20 mar. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (São Paulo). Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**. 2. ed. São José dos Campos: Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (Labren), 2017. 80 p. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>. Acesso em: 20 abr. 2022.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Atlas Eólico do Estado de São Paulo**. 1 ed. Governo do Estado de São Paulo. 2012. 135 p. Disponível em: https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/BiblioVirtual/renovaveis/atlas_eolico.pdf. Acesso em: 20 abr. 2022.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA (Rio de Janeiro). **ALTAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO**. 1 ed. Cepel. 2017. 52 p. Disponível em: https://www.observatoriodocarvao.org.br/wp-content/uploads/2020/01/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM_2013.pdf. 15 de mar. 2022.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (Brussels, Bélgica). **GLOBAL WIND REPORT 2022**. 1 ed. GWEC. 2022. 158 p. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>. 15 de mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistema Interligado Nacional: referência pde 2024**. 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes->

dados-abertos/publicacoes/mapa-do-sistema-interligado-nacional. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **PLANO CEDENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA: 2023** Sumário. 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **PLANO CEDENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA: 2023**. 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **PLANO CEDENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA: 2022** Sumário. 2013. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2022>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **PLANO CEDENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA: 2022**. 2013. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2022>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **PLANEJAMENTO DO ATENDIMENTO AOS SISTEMAS ISOLADOS HORIZONTE 2025 – CICLO 2020**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/relatorio-de-planejamento-para-atendimento-aos-sistemas-isolados-horizonte-2025-ciclo-2020>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **ESTUDO DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE GERAÇÃO: Usinas Híbridas, uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao**

planejamento. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/NT%20EPE-DEE-NT-011-2018-r0%20%28Usinas%20h%C3%ADbridas%29.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE GERAÇÃO: AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE USINAS HÍBRIDAS EÓLICO-FOTOVOLTAICAS:** Proposta metodológica e estudos de caso. 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-214/Metodologia%20para%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20usinas%20h%C3%ADbridas%20e%C3%B3lico-fotovoltaicas.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE GERAÇÃO:** Usinas Híbridas no contexto do planejamento energético. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-386/EPE_DEE_NT_029_2019_r0_%20Usinas%20h%C3%ADbridas.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **USINAS HÍBRIDAS:** Conceitos, barreias à sua viabilização e propostas. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/Informe%20Usinas%20H%C3%ADbridas.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **EXPANSÃO DA GERAÇÃO, USINAS ASSOCIAS EÓLICO-FOTOVOLTAICAS:** Considerações para cálculo de garantia física de energia. 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-540/NT-EPE-DEE-084-2020_GF_usinas_associadas_r1.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**: de acordo com a norma brasileira nbr 5419:2015. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. Acesso em: 30 abr. 2022.

JURASZ, Jakub *et al.* The impact of complementarity on power supply reliability of small scale hybrid energy systems. **Energy**, [S. l.], v. 161, p. 737-743, 27 jul. 2018.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218314798>. Acesso em: 3 maio 2022.

DOS ANJOS, Priscilla Sales *et al.* Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from Fernando de Noronha Island, Brazil. **Physica A:: Statistical Mechanics and its Applications**, [S. l.], v. 424, p. 737-743, 8 jan. 2015. Disponível em:

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437115000059>. Acesso em: 3 maio 2022.

NASCIMENTO, Lucas Rafael do *et al.* AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS E COMPLEMENTARIEDADE SOLAR E EÓLICA NO NORDESTE BRASILEIRO, 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: Cbens, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/341>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

EMPRESÁRIOS SE PREOCUPAM COM EFEITOS DA CRISE HÍDRICA SOBRE O MERCADO DE ENERGIA. São Paulo: Cni, 2021. Disponível em:

<https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/ce-crise-hidrica/>. Acesso em: 05 maio 2022.

OLIVEIRA, Gesner *et al.* **Impacos socioeconômicos e ambientais de geração de energia eólica no Brasil.** 2020. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de -, Go

Associados, São Paulo, 2020. Disponível em: [https://epbr.com.br/wp-](https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf)

[content/uploads/2021/02/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf](https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf). Acesso em: 05 maio 2022.

PINHO, João Tavares. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.

RÜNCOS, Fredemar ; CARLSON, Renato ; KUO-PENG, Patrick ; VOLTOLINI, Hélio ; BATISTELA, Nelson Jhoe . Geração de Energia Eólica - Tecnologias Atuais e Futuras. Revista Eletricidade Moderna, Brasil, 01 mar. 2005. Disponível em: <https://sinueloagropecuaria.com.br/wp-content/uploads/2016/09/energia-eolica.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2022

WEG. **Aerogeradores**: agw 110/ 2.1, agw 110 / 2.2. Jaraguá do Sul: Weg, 2007. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hee/hf1/WEG-aerogenerador-agw-110-2.1-50030583-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ABEEÓLICA. **Infovento**: energia eólica 0 os bons ventos do brasil. São Paulo: Abeeólica, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 05 abr. 2022.

ENERGIA, Canal. **Aneel aprova regras para usinas híbridas e associadas**. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53195307/aneel-aprova-regras-para-usinas-hibridas-e-associadas>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ECONÔMICO, Valor. **Brasil sobe no ranking global e agora é sexto país com mais eólicas no mundo**. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/04/04/brasil-sobe-no-ranking-global-e-agora-e-sexto-pais-com-mais-eolicas-no-mundo.ghtml>. Acesso em: 20 mar. 2022

GOV.BR. **Governo Federal autoriza 10 usinas eólicas na Bahia**: Os empreendimentos terão capacidade instalada de produzir 53 MW de energia. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/01/governo-federal-autoriza-10-usinas-eolicas-na-bahia>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ABEEÓLICA. **Dados ABEEólica**. Boletim Anual. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BNDES. **Mais sete usinas eólicas serão construídas no interior da Bahia com o apoio do BNDES**. Disponível em:

https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/mais-sete-usinas-eolicas-serao-construidas-no-interior-da-bahia-com-o-apoio-do-bndes!/ut/p/z0/tY_NTsnADISfhcMeLVslpXCMoBLqj7iAFPZSOdmIMTTrdHfDz9uzzQNw4-jxzOcxWmzQBv6UI2fRwKcyv9qbw-5uu36snmhHy-eK6ofrVfWyWtP2doEbtH8bCmER9_f7I9qRcw8S3hSbgSVB8tnDICRwAq8n6fiiRVboNKQcJ3FFCVoy2UfRCI6h5V64GAZQ4FFFwSm0wfl0OSXv57Ot0RZA9t8Zm3IzkIKT PHXzU4Z6HbwhGcboQ2JDQbN0wsnQnJucGvqXhuOHbX--6qtfQl4pNg!!/. Acesso em: 20 abr. 2022.

ECONOMIA, Uol. **Os bons ventos do Nordeste**. Disponível em:

<https://economia.uol.com.br/reportagens-especiais/estados-producao-energia-solar-eolica/#page3>. Acesso em: 20 abr. 2022.

FAPESP, Pesquisa. **Ventos promissores a caminho**. Disponível em:

<https://revistapesquisa.fapesp.br/ventos-promissores-a-caminho/#:~:text=O%20potencial%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de,atual%20de%20energia%20do%20Brasil>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ONS. **Energia agora: Reservatórios**. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/reservatorios>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ENGENHARIA, Instituto. **Usinas híbridas são regulamentadas pela ANEEL**.

Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2021/12/03/usinas-hibridas-sao-regulamentadas-pela-aneel/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

GOV.BR. **ANEEL libera 513,2 MW para operação comercial em fevereiro:**

fevereiro obteve acréscimo de 346,57 mw de usinas eólicas e 100 mw de solares fotovoltaicas, as quais representam juntas 87% da ampliação de potência no mês. Fevereiro obteve acréscimo de 346,57 MW de usinas eólicas e 100 MW de solares fotovoltaicas, as quais representam juntas 87% da ampliação de potência no mês. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-libera-513-2-mw-para-operacao-comercial-em-fevereiro>. Acesso em: 20 abr. 2022.

POWER, Enel Green. **Parque Solar São Gonçalo**: a planta solar de São Gonçalo no estado do piauí, é um parque recordista constituído por mais de 2.2 milhões de

painéis solares, que está inclusive desempenhando um papel chave na recuperação verde no Brasil.. A planta solar de São Gonçalo no estado do Piauí, é um parque recordista constituído por mais de 2.2 milhões de painéis solares, que está inclusive desempenhando um papel chave na recuperação verde no Brasil.. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/nossos-projetos/highlights/parque-solar-sao-goncalo>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ABEEÓLICA. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**: todos os meses, a ABSOLAR analisa e consolida dados do setor e produz um infográfico com o cenário da energia solar fv no país. confira a versão mais recente abaixo:. Todos os meses, a ABSOLAR analisa e consolida dados do setor e produz um infográfico com o cenário da energia solar FV no País. Confira a versão mais recente abaixo:. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

SOLAR, Portal. **Brasil termina 2021 com maior acréscimo em potência instalada desde 2016**: país registrou 7.5 gw em novos projetos de geração elétrica; 17,18% correspondem a usinas fotovoltaicas. País registrou 7.5 GW em novos projetos de geração elétrica; 17,18% correspondem a usinas fotovoltaicas. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/brasil-termina-2021-com-maior-acrescimo-em-potencia-instalada-desde-2016>. Acesso em: 20 abr. 2022

REGULAÇÃO, Associação Brasileira de Agências de. **Aneel bate meta de expansão da matriz elétrica antes do previsto**. Disponível em: <https://abar.org.br/aneel-bate-meta-de-expansao-da-matriz-eletrica-antes-do-previsto/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

GOV.BR. **Brasil bate recorde de expansão de usinas eólicas em um ano; marca anterior era de 2014**: a expansão da capacidade instalada de energia elétrica a partir de fonte eólica no Brasil chegou a 3.051,29 megawatts (mw) em 2021. A expansão da capacidade instalada de energia elétrica a partir de fonte eólica no Brasil chegou a 3.051,29 megawatts (MW) em 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-bate-recorde-de->

expansao-de-usinas-eolicas-em-um-ano-marca-anterior-era-de-2014. Acesso em: 20 abr. 2022.

GOV.BR. **Expansão de usinas eólicas no país bate recorde em 2021, segundo Aneel:** a energia eólica tem baixo impacto ambiental e baixos teores de emissões de gases de efeito estufa. A energia eólica tem baixo impacto ambiental e baixos teores de emissões de gases de efeito estufa. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/12/expansao-de-usinas-eolicas-no-pais-bate-recorde-em-2021-segundo-aneel>. Acesso em: 20 abr. 2022.

PERON, Alexandre Mattos. **ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE DAS GERAÇÕES INTERMITENTES NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ELETRO-ENERGÉTICA DA REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA.** 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=464909>. Acesso em: 12 out. 2022.

Pianezzola, G., Krenzinger, A. and Canales, F.A. (2017) Complementarity Maps of Wind and Solar Energy Resources for Rio Grande do Sul, Brazil. *Energy and Power Engineering*, 9, 489-504. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/epe.2017.99034> Acesso em 12 out. 2022.

Melo, Natalia Rodrigues de; Nobrega, Rafael Vinicius Tayett de. **Dimensionamento e simulação de uma microrrede utilizando geração conjunta eólica/solar aplicada em um condomínio residencial na cidade de Janaúba/MG.** ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 5, n. 3, e00283, jul./dez. 2017.

Mattuella, Jussara Maria Leite. **Fontes Energéticas Sustentáveis: Um estudo sobre a viabilidade do aproveitamento da energia eólica em três localidades no RS,** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5822>. Acesso em 12 out. 2022.

VIQUETTI-LÖWENBERG, V. ; REGINATTO, R. . **Limites de Integração de Geração Eólica em Redes de Distribuição Determinados pela Variação da Tensão de Regime Permanente**. In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2014, 2014, Foz do Iguaçu. Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2014. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1067>. Acesso em 12 out. 2022.

ROSAS, Pedro André Carvalho; ESTANQUEIRO, Ana Isabel. **GUIA DE PROJETO ELÉTRICO DE CENTRAIS EÓLICAS**: projeto elétrico e impacto de centrais eólicas na rede elétrica. Recife: Everaldo Alencar Feitosa e Alexandre de Lemos Pereira, 2003. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/waltersanchez/INTRO%20E%20EOLICA/Guia%20de%20Projeto%20Eletrico%20de%20Centrais%20Eolicas.pdf/view>. Acesso em: 12 out. 2022.

CORRÊA, Kleber Costa. **INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA NA REDE ELÉTRICA: DESAFIOS DO BRASIL**. 2013. 214 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Unisul, Palhoça, 2013. Disponível em: https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/11247/1/108901_Kleber.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

ESTANQUEIRO, Ana Isabel Lopes. **Modelação Dinâmica de Parques Eólicos**. 1997. 302 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259580883_Modelacao_Dinamica_de_Parques_Eolicos. Acesso em: 12 out. 2022.

Lukuyu, J.M. and Cardell, J.B. (2014) Hybrid Power System Options for Off-Grid Rural Electrification in Northern Kenya. *Smart Grid and Renewable Energy*, 5, 89-106. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2014.55009>. Acesso em: 12 out. 2022

AL-DOUSARI, Ali *et al.* Spatial Management for Solar and Wind Energy in Kuwait. **Turkish Journal Of Computer And Mathematics Education**. Kuwait, p.

4019-4025. abr. 2021. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/350808128_Spatial_Management_for_Solar_and_Wind_Energy_in_Kuwait. Acesso em: 12 out. 2022.

SILVA, Jones Souza da. **Viabilidade de geração de energia elétrica através de ondas oceânicas no litoral norte do Rio Grande do Sul**: estudo de um sistema híbrido de energias renováveis. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Ufrgs, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/78865>. Acesso em: 12 out. 2022.

SILVEIRA, Eberson. **Energia Eólica no Rio Grande do Sul**. Rio Grande do Sul: ., 2016. Disponível em: http://www.al.rs.gov.br/FileRepository/repdcp_m505/CFPFC/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20Secretaria%20de%20Minas%20e%20Energia.PDF. Acesso em: 12 out. 2022.

PPGAS, Uergs e. **Atlas Solar do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Uergs, 2018. Disponível em: <https://atlassolarrs.com/>. Acesso em: 12 out. 2022.

Secretaria de Minas e Energia. **Atlas Solar do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2018. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/atlas-solar-do-rs>. Acesso em: 12 out. 2022.

Secretária do Desenvolvimento e promoção do Investimento. **Atlas Solar do Rio Grande do Sul**. Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Secretária do Desenvolvimento e promoção do Investimento, 2018. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/atlas-eolico-do-rs>. Acesso em: 12 out. 2022.

COELBA - ANEEL. **Estado da Bahia**: atlas do potencial eólico. Salvador: Camargo Schubert, . Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_BA.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

Atlas solar : Bahia / elaborado por AWS Truepower, Camargo Schubert Engenheiros Associados, FIEB/SENAI CIMATEC, Curitiba : Camargo Schubert ; Salvador : SECTI : SEINFRA : CIMATEC/SENAI, 2018. Disponível em: <http://www.secti.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=20>. Acesso em: 12 out. 2022

Atlas eólico: Bahia / elaborado por Camargo-Schubert Engenheiros Associados... [et al.]; dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS Truepower.— Curitiba : Camargo Schubert ; Salvador : SECTI : SEINFRA : CIMATEC/ SENAI, 2013. Disponível em: <http://www.infraestrutura.ba.gov.br/arquivos/File/publicacoes/atlaseolicobahia2013.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

Trindade, Vinicius Machado. **Otimização de projetos híbridos de geração de energia elétrica compostos pelas fontes eólica e solar fotovoltaica.** 2020. Tese de doutorado. Universidade federal do rio de janeiro. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%c3%a7%c3%b5es/doutorado/disserta%c3%a7%c3%a3o_vinicius_trindade_pend.pdf. Acesso em: 10 out. 2022

Braga, Nina Bordini. **Análise do Potencial de Híbridização e Capacidade de Escoamento no SIN de Usina Eólica-Solar no Estado Brasileiro da Bahia.** 2021. Disponível em: <http://www.ppgeet.uff.br/site/wp-content/uploads/2021/08/Nina-Bordini.pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.