

Universidade Federal do Maranhão
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Planejamento e Dimensionamento de Usinas Híbridas
Eólico-Solares Conectadas ao SIN**

Emanoel José Sampaio do Nascimento

São Luís – MA, Brasil

2023

Emanoel José Sampaio do Nascimento

Planejamento e Dimensionamento de Usinas Híbridas Eólico-Solares Conectadas ao SIN

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração de Sistemas de Energia.

Área de Sistemas de Energia Elétrica
concentração:

Orientador: Denisson Queiroz Oliveira
Dr.

Universidade Federal do Maranhão

São Luís – MA, Brasil

2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

NASCIMENTO, EMANOEL JOSE SAMPAIO DO.

PLANEJAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE USINAS HÍBRIDAS
EÓLICO-SOLARES CONECTADAS AO SIN / EMANOEL JOSE SAMPAIO DO
NASCIMENTO. - 2023.

62 f.

Orientador(a): DENISSON QUEIROZ OLIVEIRA.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do
Maranhão, SÃO LUÍS DO MARANHÃO, 2023.

1. ALGORITMOS GENÉTICOS. 2. COMPLEMENTARIDADE. 3.
USINA EÓLICA. 4. USINAS HÍBRIDAS. 5. USINA SOLAR. I.
OLIVEIRA, DENISSON QUEIROZ. II. Título.

Dedico este trabalho ao meu pai, Bento Luis do Nascimento, que sempre estará presente na minha memória e em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dá todos os dias saúde e disposição para que eu pudesse apesar de todas as dificuldades concluir este trabalho.

Agradeço toda a minha família. Em especial, minha mãe, Claudia; meu pai, Bento; minha avó, Itamires; meu irmão, Victor; minha namorada, Thais; e minha cunhada, Clarice, por terem me estimulado a seguir meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador e professor Denisson Queiroz Oliveira por ser bastante solícito, pela orientação impecável e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos meus professores Osvaldo Saavedra, Shigeaki Lima e Leonardo Paucar pelos conhecimentos compartilhados e suporte.

Ao meu amigo, Matheus Vieira pelas incontáveis discussões que tanto contribuíram com este trabalho.

Ao meu amigo, João Victor que me incentivou a adentrar neste programa de pós-graduação em engenharia elétrica.

À Equatorial Energia e à GeraMaranhão pelo suporte financeiro e cessão de dados para realizar esta pesquisa por meio do Programa de P&D da ANEEL.

À CAPES, o CNPq e à FAPEMA pelo suporte financeiro.

O mal é uma força que acredita que seu conhecimento está completo.

Jordan B. Peterson

RESUMO

Ao contrário de fontes de energia despacháveis, as fontes de energia renováveis não despacháveis, como a eólica e a solar, apresentam incertezas que demandam a previsão da produção de energia, criando um conjunto de desafios para o planejamento e operação dos sistemas elétricos. Isso se dá principalmente devido aos seus recursos primários, vento e irradiação solar, apresentarem um comportamento intermitente sendo dependentes de condições climáticas. A hibridização desses geradores de energia elétrica usando suas características de complementaridade pode contribuir significativamente para atenuar esse problema fornecendo uma energia mais estável ao longo do tempo. Dessa forma, este trabalho visa avaliar, por meio do coeficiente de Pearson, o potencial de hibridização de usinas híbridas e associadas eólico-solares, fictícias, localizadas na região de Paulino Neves/Barreirinhas no estado do Maranhão, bem como propor uma metodologia utilizando algoritmos genéticos para determinar as suas composições ótimas. Os resultados indicaram que não há um comportamento predominantemente complementar das gerações dessas fontes no local estudado. Além disso, a composição ótima da Usina Híbrida é 95% de potência instalada eólica e 5% solar, e da Usina Associada é de 95,77% de potência instalada eólica e 4,22% de potência instalada solar.

Palavras-chave: Usinas híbridas. Complementaridade. Usina eólica. Usina solar. Algoritmos genéticos.

ABSTRACT

Planning and sizing of Hybrid Wind-Solar Power Plants Connected to the SIN

Unlike dispatchable energy sources, non-dispatchable renewable energy sources, such as wind and solar, present uncertainties that demand the forecast of energy production, creating a set of challenges for the planning and operation of electrical systems. This is mainly due to its primary resources, wind and solar radiation, presenting an intermittent behavior depending on climatic conditions. The hybridization of these electric power generators using their complementarity characteristics can contribute significantly to mitigate this problem by providing a more stable power over time. Thus, this work aims to evaluate, through Pearson's coefficient, the hybridization potential of hybrid and associated wind-solar plants, fictitious, located in the Paulino Neves/Barreirinhas region in the state of Maranhão, as well as to propose a methodology using algorithms genetic tests to determine their optimal compositions. The results indicated that there is not a predominantly complementary behavior of the generations of these sources in the studied place. In addition, the optimal composition of the Hybrid Plant is 95% wind installed power and 5% solar, and the Associated Power Plant is 95.77% wind installed power and 4.22% solar installed power.

Keywords: Hybrid plants. Complementarity. Wind farm. Solar plant. Genetic algorithms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Matriz elétrica brasileira	15
Figura 1.2: Usina Híbrida.....	17
Figura 2.1: Média horária das medições de velocidade do vento nos 208 dias	27
Figura 2.2: Comparação entre a curva fornecida pelo fabricante e a curva gerada pela função modelada.....	28
Figura 2.3: Média horária das medições de irradiação solar nos 208 dias.....	29
Figura 3.1: Coeficientes de Pearson horários	35
Figura 3.2: Interpretação geral dos Coeficientes de Pearson horários.....	36
Figura 3.3: Interpretação detalhada dos Coeficientes de Pearson horários.....	36
Figura 3.4: Coeficientes de Pearson diários.....	37
Figura 3.5: Interpretação geral dos Coeficientes de Pearson diários	37
Figura 3.6: Interpretação detalhada dos Coeficientes de Pearson diários	38
Figura 3.7: Coeficientes de Pearson mensais	39
Figura 3.8: Interpretação geral dos Coeficientes de Pearson mensais	39
Figura 3.9: Interpretação detalhada dos Coeficientes de Pearson mensais	40
Figura 3.10: Fluxograma do Algoritmo Genético	44
Figura 3.11: Valores da função $maxFC(t)$ (2.6) avaliados de cada geração.....	45
Figura 3.12: FC Eólico horário.....	46
Figura 3.13: FC Solar horário	47
Figura 3.14: FC Total (Eólico-Solar) horário.....	47
Figura 3.15: Fator de Capacidade diário eólico, solar e total (eólico-solar).....	48
Figura 3.16: Fator de Capacidade Eólico mensal.....	48
Figura 3.17: Fator de Capacidade Solar mensal	49
Figura 3.18: Fator de Capacidade Eólico-Solar (total) mensal	49
Figura 3.19: Fator de Capacidade médio horário eólico, solar e eólico-solar (total)..	50
Figura 3.20: Média horária de energia eólica, solar e eólica-solar (total)	51
Figura 3.21: Comportamento da potência elétrica injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos.....	52
Figura 3.22: Fluxograma do algoritmo genético	53
Figura 3.23: Valores da função $minValor$ (2.12) avaliados a cada geração.....	54

Figura 3.24: Comparação entre a potência injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos e o limite de potência contratada no ponto de conexão da CGA	55
Figura 3.25: Comparação entre a energia injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos e o limite de energia no ponto de conexão da CGA	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Usinas híbridas de Tacaratu e Catité/Igaporã	19
Tabela 2.1: Interpretação do coeficiente de Pearson	26
Tabela 3.1: Cenários do método analítico	41
Tabela 3.2: Fator de capacidade das cenários.....	42
Tabela 3.3: Dados da CGH	45
Tabela 3.4: Dados do cenário ótimo da CGH para os 208 dias	46
Tabela 3.5: Dados da CGA	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGA	Central Geradora Associada
CGH	Central Geradora Híbrida
CP	Coeficiente de Pearson
FC	Fator de Capacidade
MUST	Montante de Uso do Sistema de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
UH	Usina Híbrida

LISTAS DE SÍMBOLOS

A	Área do módulo, em m^2
cov	Covariância
$F_{C(t)}$	Fator de Capacidade no período de tempo “ t ”
$G_{(t)}$	Irradiação solar recebida no período de tempo “ t ”, em $\frac{W}{m^2}$
N°_{Aeg}	Número de aerogeradores
N°_P	Número de painéis fotovoltaicos
P_{con}	Potência total contratada no ponto de conexão da CGA, em MW
$P_{E(v(t))}$	Potência produzida pelo (s) aerogerador (es) no período de tempo “ t ” em função da velocidade do vento, em MW
$P_{ger(t)}$	Potência efetivamente produzida no período de tempo “ t ” pela CGA, em MW
$P_{Inst(Total)}$	Potência Instalada Total, em MW
$P_{Inst(Eol)}$	Potência Instalada Eólica, em MW
$P_{Inst(Sol)}$	Potência Instalada Solar, em MW
$P_{S(G(t))}$	Potência produzida pelo (s) painel (eis) solar (es) no período de tempo “ t ” em função da irradiação solar, em MW
$\tanh$	Tangente hiperbólica
$v_{(t)}$	velocidade do vento no período de tempo “ t ”, em $\frac{m}{s}$
η	Eficiência do módulo, em %
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos gerais e específicos	20
1.3	Estado da arte	21
1.4	Organização do trabalho	24
2	METODOLOGIA	25
2.1	Disposições gerais	25
2.2	Análise da complementaridade entre a geração solar e eólica	25
2.3	Modelagem Eólica	26
2.4	Modelagem Solar	28
2.5	Modelagem das Usinas Híbridas	30
2.5.1	Central Geradora Híbrida (CGH)	30
2.5.1.1	Método analítico	30
2.5.1.2	Algoritmo genético	31
2.5.2	Modelagem da Central Geradora Associada (CGA)	32
2.5.2.1	Algoritmo genético	33
3	RESULTADOS	35
3.1	Análise da complementaridade entre a geração eólica e a solar	35
3.1.1	Complementaridade horária	35
3.1.2	Complementaridade Diária	37
3.1.3	Complementaridade Mensal	38
3.2	Composição ótima da CGH	40
3.2.1	Metodologia analítica	40
3.2.2	Metodologia utilizando algoritmos genéticos	43
3.2.3	Análise do cenário ótimo	45

3.2.4	Valor ideal do MUST a ser contratado.....	51
3.3	Composição ótima da CGA.....	52
3.3.1	Análise de Ultrapassagem do MUST	55
4	CONCLUSÕES.....	57
4.1	Trabalhos futuros	59
4.2	Publicações	59
	REFERÊNCIAS.....	60

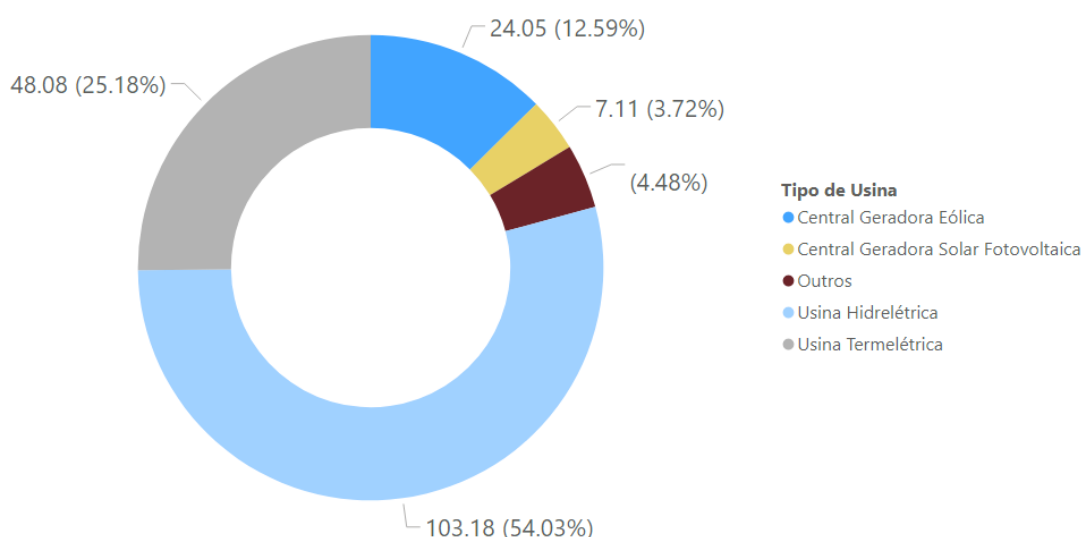
1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido um notável crescimento das fontes renováveis de energia nas matrizes elétricas de muitos países do mundo. Para se ter uma ideia, a energia renovável representou cerca de 28,3% do *mix* global de eletricidade em 2021, impulsionada pela expansão recorde em energia solar fotovoltaica e eólica. Esse crescimento decorre, em parte, de um conjunto de políticas governamentais e um custo de operação baixo (já que o vento e irradiação solar são gratuitos) [1].

No Brasil, se tem verificado uma grande expansão das fontes renováveis, em especial a eólica. Esta já é a terceira maior fonte no Brasil, responsável por 12,59% da capacidade instalada das usinas em fase de operação, detendo 24,05 GW da matriz elétrica nacional. A geração eólica só fica atrás das fontes hídricas (54,03%) e termelétrica (25,18%). Na quarta posição vem a solar sendo responsável por 3,72%, detendo 7,11 GW da matriz elétrica nacional não considerando a geração distribuída instalada em unidades consumidoras [2]. A Figura 1.1 sumariza esses dados.

Figura 1.1: Matriz elétrica brasileira

Potência Instalada em GW



Fonte: [2]

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2031) [3], nos próximos 10 anos, projeta-se uma maior diversificação da matriz elétrica brasileira,

com a redução na participação hidrelétrica sendo compensada pelo crescimento da capacidade instalada das fontes eólica e solar.

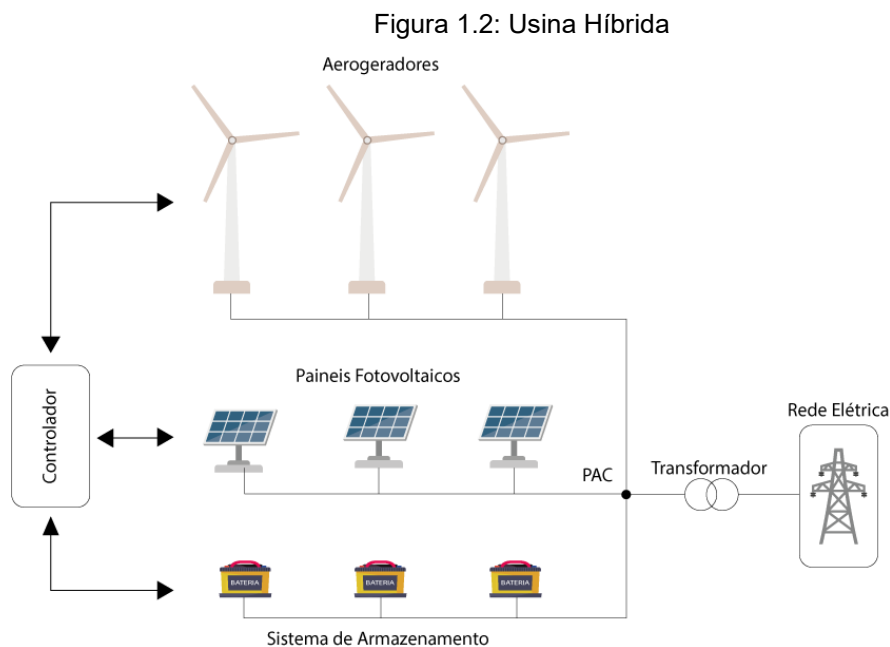
As fontes renováveis não hídricas, como a eólica e solar, dependem diretamente de condições climatológicas, pois seus recursos primários, vento e irradiação solar, apresentam variações sazonais e, adicionalmente, variações em tempos mais curtos. Essa variabilidade na disponibilidade de geração eólica ou solar ao longo do tempo é uma característica chamada intermitência. A inserção desses tipos de geradores à rede elétrica adicionou um fator de incerteza no lado da geração impondo desafios aos planejadores e operadores do sistema elétrico.

Quando há abundância na geração das fontes eólica e solar, desloca-se o despacho das fontes mais caras (geralmente termelétricas) para os momentos de pico de demanda levando à ociosidade dessas plantas. Em contrapartida, quando há escassez na geração dessas fontes, acaba-se por reforçar a necessidade de contar com medidas suplementares para manter a capacidade de regulação primária, tendo que contar com a geração mais cara [4]. Uma vez que essas medidas suplementares aplicadas aumentam o custo operacional do sistema de energia e podem reduzir os benefícios ambientais dessas fontes, explorar novas opções para diminuir a necessidade das mesmas e acomodar o rápido crescimento dessas fontes na rede elétrica é crucial.

Uma opção promissora é a possibilidade de hibridização, ou seja, a conexão conjunta de duas ou mais fontes de energia usando suas características de complementaridade para suavizar a variabilidade da produção de energia. Em [5], complementaridade é definida como a capacidade de dois ou mais recursos apresentarem disponibilidade energética complementar no tempo ou espaço. Se tal complementaridade existir, uma variação positiva para uma tecnologia de geração estará associada a uma variação negativa na outra, ou seja, uma baixa geração de uma fonte poderia ser compensada por uma alta geração da outra. Essa abordagem resultaria em um perfil de geração de energia mais estável que pode suportar uma alta penetração desses geradores.

Em [6], uma Usina Híbrida (UH) é definida como uma usina que gera eletricidade por meio de duas ou mais tecnologias de geração podendo incluir ou não um sistema de armazenamento. Cada tecnologia de geração é conectada a um único Ponto de Acoplamento Comum (PAC), este que é interligado à rede por meio de um

transformador. Um controlador é utilizado para controlar a produção de potência da usina e para fornecer suporte à rede, se necessário, como mostra a Figura 1.2.



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo [7], as UH's apresentam vários benefícios. Os mais importantes incluem:

- Uso otimizado da rede;
- Fator de capacidade anual mais alto;
- Produção de energia mais estável ao longo do tempo em comparação a usinas eólicas e solares puras;
- A possibilidade de despacho de energia mais programável;
- Custos de investimento de infraestrutura reduzidos, uma vez que só há um único ponto de conexão à rede;
- Redução de custos com medidas suplementares para garantir a capacidade de regulação primária dos sistemas elétricos;
- Fornecer controle de potência reativa, Black Start quando o sistema de armazenamento está integrado;
- Serviços de controle de tensão, etc.

Para implementação em larga escala dessas usinas, a regulamentação é fundamental. No Brasil, a resolução normativa n° 954 [8] foi publicada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 30 de novembro de 2021 estabelecendo

tratamento regulatório para a implantação de UH's sendo classificadas em: Central Geradora Híbrida (CGH) e Centrais Geradoras Associadas (CGA).

Segundo essa normativa, uma CGH é uma instalação que produz energia a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração, com medições distintas por tecnologia de geração ou não e outorgadas de forma única; já as CGA são duas ou mais instalações, com a finalidade de produção de energia elétrica com diferentes tecnologias de geração, com outorgas e medições distintas, que compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e o uso do sistema de transmissão.

Um dos principais benefícios dessa nova resolução com o propósito de estimular a implantação de empreendimentos híbridos no Brasil é a possibilidade de contratar um valor de MUST (Montante de Uso do Sistema de Transmissão) entre a potência nominal da fonte de energia de maior participação e a potência instalada total do empreendimento, subtraídas as parcelas correspondentes às cargas próprias de cada tecnologia de geração.

Para o empreendedor proprietário de uma planta híbrida a contratação de um MUST menor que a soma das potências instaladas das duas fontes é muito vantajoso, uma vez que haveria um menor custo associado aos contratos de uso da rede. Vale ressaltar que antes dessa resolução, o MUST declarado pelo usuário deveria ter valor mínimo igual à potência instalada subtraída da mínima carga própria [9]. Ainda, como forma de atenuar os efeitos da sazonalidade, os MUST de contratos de CGH e CGA poderão ser reduzidos em até 5% uma vez ao ano de forma não onerosa.

No Brasil, as condições favoráveis de complementaridade energética incentivaram empresas a implementar dois projetos-piloto antes dessa regulamentação. Esses projetos pilotos estão localizados em Tacaratu (Pernambuco) e em Caetité/Igaporã (Bahia) [10]. No projeto piloto em Tacaratu, a Enel Green Power Brasil implementou três parques eólicos com a capacidade total de 80 MW em 2014, e dois parques solares com capacidade total de 11 MW em 2015, totalizando 91 MW de potência instalada. Juntos são capazes de gerar 340 GWh por ano, volume suficiente para abastecer 250 mil residências [11]. Já em Caetité/Igaporã, a Renova Energia implementou dois parques eólicos com capacidade total de 21,6 MW e um solar com capacidade total de 4,8 MWp, totalizando 26,4 MW de potência instalada, com capacidade para abastecer, por exemplo, as cidades de Caetité e Guanambi juntas [11]. A Tabela 1.1 sumariza esses dados.

Tabela 1.1: Usinas híbridas de Tacaratu e Caetité/Igaporã

Parques			Potência Instalada (MW)	Número de painéis fotovoltaicos ou aerogeradores
Tacaratu	Pedra do Gerônimo	Eólica	30,6	13 aerogeradores
	Pau Ferro	Eólica	30,6	13 aerogeradores
	Tacaicó	Eólica	18,8	8 aerogeradores
	I	Solar	5,5	17.765 painéis fotovoltaicos
	II	Solar	5,5	17.765 painéis fotovoltaicos
Catité/Igaporã	Saboeiro	Eólica	13,5	5 aerogeradores
	Jurema Preta	Eólica	8,1	3 aerogeradores
	Caetité Va	Solar	4,8	19.200 painéis fotovoltaicos

Fonte: [11]

1.1 Justificativa

Este trabalho se justifica pelas modificações recentes no contexto regulatório atual do mercado brasileiro para implantação de usinas híbridas, por meio da aprovação da Resolução Normativa ANEEL nº 954/2021. Considerando que este mercado se encontra em uma fase incipiente, investigações mais detalhadas sobre o tema podem direcionar adequadamente os investimentos em novas plantas, evitando problemas encontrados em países onde este modelo de geração é mais consolidado. Existe ainda a carência de trabalhos sobre o tema no âmbito nacional e a necessidade de novas investigações que contribuam com as discussões dos agentes envolvidos nesse mercado.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Dentro do contexto regulatório da Resolução Normativa ANEEL 954/2021, essa dissertação visa propor metodologias para avaliar a viabilidade de implantação de usinas híbridas e associadas eólico-solares, determinando suas configurações ótimas de acordo com os objetivos considerados, que são a maximização do fator de capacidade da planta e a minimização dos desvios de potência no ponto de conexão ao sistema elétrico, respectivamente. As metodologias propostas consideram também investigações preliminares sobre a complementaridade das fontes eólica-solar na localidade onde a planta deve ser instalada, permitindo decidir a melhor configuração de cada fonte energética.

De forma mais específica, os objetivos deste trabalho são:

- Avaliar a complementaridade entre a geração eólica e solar na região de Paulino Neves/Barreirinhas no estado do Maranhão;
- Determinar a composição ótima de uma CGH eólica-solar que maximize seu fator de capacidade por meio de técnicas de inteligência artificial;
- Determinar a potência instalada ideal de uma usina solar a ser associada a uma usina eólica existente, de forma que o MUST contratado atualmente não seja modificado e que as restrições de ultrapassagem sejam atendidas apropriadamente por meio de técnicas de inteligência artificial.

1.3 Estado da arte

A possibilidade da produção de energia por meio da conexão conjunta das fontes eólica e solar tem sido discutida por vários estudos. A avaliação da complementaridade eólica e solar fotovoltaica para hibridização dos parques eólicos em Portugal foi apresentada em [12]. A análise realizada neste trabalho utiliza dados temporais e de alta resolução espacial de 224 parques eólicos existentes. Foram obtidos dados horários para cada local durante dois anos, de 2015 a 2016. A complementaridade temporal foi avaliada usando coeficientes de correlação e fatores de capacidade em diferentes escalas de tempo para cada local. A análise pressupõe que a tecnologia solar fotovoltaica pode ser instalada nas proximidades dos parques eólicos para criar usinas híbridas.

Os resultados da pesquisa mostram que há um alto potencial para implementação das usinas híbridas em Portugal, uma vez que os níveis de complementaridade entre os recursos solares e eólicos são globalmente altos. Os níveis de complementaridade mais elevados e consistentes encontram-se nas regiões do interior do centro e norte de Portugal. A pesquisa mostra que Portugal tem condições climáticas privilegiadas que permitem que o conceito de centrais híbridas seja apropriadamente explorado com eficiência em maior escala.

O trabalho desenvolvido em [13] apresenta uma análise da complementaridade energética solar e eólica no México. A pesquisa se baseia no coeficiente de correlação de Pearson para avaliar a correlação entre os recursos solares e eólicos, permitindo gerar novos mapas que mostram a complementaridade energética mensal e anual no país. Para tornar os mapas mais úteis para o uso prático, o estudo inclui informações adicionais, como áreas naturais protegidas, a orografia e a localização do sistema de transmissão.

Além disso, são apresentadas comparações entre os resultados obtidos e os locais onde já foram instalados sistemas de geração baseados em energia solar e eólica, fornecendo informações valiosas para orientar a tomada de decisões sobre onde instalar novos sistemas de geração de energia renovável. Os resultados mostram que o México possui muitos locais com grande complementaridade energética, alguns dos quais estão sendo explorados, mas existem ainda outros locais no centro e norte do país que não foram explorados e onde sistemas de geração de

energia renovável podem ser desenvolvidos. Esse estudo pode ser útil para incentivar a expansão da geração de energia renovável no México.

Em [14] foi feita uma revisão crítica das abordagens do estado da arte para entender e avaliar a complementaridade entre sistemas de energia solar e eólica conectados à rede por meio da análise de diferentes metodologias e locais. Os métodos estatísticos tradicionais, como o coeficiente de correlação, variância, desvio padrão, classificação percentil e erro médio absoluto, foram os mais aplicados para avaliar a complementaridade dos recursos. A revisão dos 41 artigos mostrou que o coeficiente de correlação foi utilizado em 17 artigos, enquanto o desvio padrão foi usado em 6. Os demais trabalhos utilizaram diferentes técnicas para avaliar a complementaridade entre a energia eólica e solar.

Os autores concluíram que o uso combinado de energia eólica e solar em muitos lugares resulta em um fornecimento de energia mais suave, o que é crucial para a operacionalidade e segurança das redes elétricas em todo o mundo. Além disso, recomendaram a utilização de mais de um método para avaliar a complementaridade, a fim de obter resultados mais confiáveis.

A contribuição das fontes eólica e solar para aumentar a segurança energética na região da América Latina por meio da complementaridade foi abordada em [15]. Duas abordagens principais são usadas. A primeira avalia a sazonalidade e variabilidade dos recursos de energia renovável, bem como suas possíveis complementaridades, enquanto a segunda determina possíveis impactos nas complementaridades de recursos eólicos e solares de longo prazo devido às mudanças climáticas para aquelas regiões onde a complementaridade foi identificada anteriormente.

Os resultados mostram que há uma maior variabilidade na geração de energia eólica quando comparada à energia solar, tanto em escalas horárias quanto mensais. Além disso, o Brasil é apontado como um país importante para a integração de energia renovável na América Latina, pois tem a maior capacidade de complementar e ser complementado por outros países da região.

Em [16], é apresentado um método que permite avaliar o impacto da complementaridade no desempenho e confiabilidade de sistemas híbridos de energia renovável. Esse método tem como objetivo permitir o estudo do efeito da complementaridade no desempenho de sistemas híbridos, filtrando a variabilidade

típica dos recursos renováveis e estimando um limite de desempenho dos sistemas com algum grau de complementaridade.

O método descrito pode ajudar a identificar oportunidades para otimizar o desempenho de sistemas híbridos, bem como para entender melhor como diferentes fatores afetam a complementaridade entre as fontes de energia renovável.

Em [17] é proposto um método para determinar qual é a melhor relação de capacidade de energia eólica e solar fotovoltaica em uma região de controle (neste caso, o país inteiro), considerando as necessidades de demanda de eletricidade e diferentes perspectivas de otimização. O objetivo é identificar estrategicamente as regiões mais adequadas para a instalação de cada fonte de energia, de forma a maximizar a complementaridade entre as duas fontes e alcançar uma maior participação de renováveis variáveis no sistema de energia.

O estudo de caso é realizado em Portugal, e os resultados mostram que a participação conjunta de geração eólica e solar pode fornecer uma maneira mais sustentável de aumentar a participação de renováveis variáveis no sistema de energia. Isso ocorre porque a complementaridade entre as fontes permite reduzir a variabilidade da geração de energia e melhorar a previsibilidade do fornecimento de eletricidade.

Em [18] é feita uma avaliação da complementaridade espacial e temporal entre a energia solar e eólica na Argélia para diferentes escalas de tempo por meio do coeficiente de Spearman. A análise realizada neste artigo fornece orientações informativas para futuros investimentos na Argélia, identificando locais com maior complementaridade entre recursos solares e eólicos.

Em [19] é feita uma avaliação da complementaridade entre a geração eólica e a solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro e como essa complementaridade, aliada ao armazenamento de energia, pode reduzir as deficiências que a correspondente intermitência dos recursos naturais impõe a essas fontes. A análise da complementaridade é feita por meio do coeficiente de Pearson. Os resultados mostram que existe uma relevante complementaridade temporal entre os recursos eólicos e solares indicando que este local é altamente adequado para implantação de usinas híbridas eólico-solares.

O estudo realizado em [20] mediu a complementaridade dos recursos solares e eólicos localizados em várias regiões do Texas por meio do coeficiente de Pearson.

Os resultados indicam que a produção de energia renovável no Texas pode ser mais confiável combinando recursos de diferentes tipos.

A partir da análise desses trabalhos, observa-se que apesar de utilizarem abordagens diferentes, a maioria revela a existência de complementaridade em diferentes localizações e escalas temporais deixando em evidência os benefícios que as denominadas usinas híbridas e associadas podem proporcionar.

Devido à natureza intermitente das fontes eólica e solar, o processo de definir a melhor configuração de cada fonte energética a ser instalada e o valor do MUST a ser contratado pelo empreendimento híbrido torna-se uma tarefa nada trivial. Uma contratação igual à potência instalada resultaria em ociosidade na rede de transmissão. Um contrato abaixo da potência instalada poderia causar geração em níveis de potência acima do contrato, levando ao corte ou até mesmo ultrapassagens, podendo ocasionar problemas de segurança à rede e multas ao proprietário da usina.

Nesse contexto, a contribuição deste trabalho está na proposição de modelos de otimização utilizando técnicas de inteligência artificial para determinar a composição ótima de usinas híbridas e associadas, considerando o arcabouço regulatório mais recente. Por meio destas metodologias propostas é possível estabelecer o valor ideal do MUST a ser contratado por cada planta, bem como a configuração mais apropriada das mesmas. Ademais, a complementaridade em cada localidade também é avaliada.

1.4 Organização do trabalho

Esta dissertação é organizada da seguinte maneira. O capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao tema, destacando o estado da arte, objetivos e contribuições deste trabalho. O capítulo 2 apresenta a metodologia adotada para este trabalho, descrevendo as etapas executadas para a obtenção dos resultados. O capítulo 3 trata sobre os resultados obtidos e discussões sobre os experimentos realizados. O capítulo 4 apresenta as considerações finais sobre os resultados desta dissertação.

2 METODOLOGIA

2.1 Disposições gerais

Este trabalho adotou como referência dados anemométricos e solarimétricos medidos simultaneamente em intervalos de 10 minutos no período de 11/11/2021 a 04/11/2022. No total foram 208 (duzentos e oito) dias completos de medições na região dos municípios de Barreirinhas e Paulino Neves no estado do Maranhão.

Para garantir a qualidade das medições de velocidade do vento e irradiação solar, é realizado um processo de consistência em que todas as medições são avaliadas e qualquer inconsistência é identificada. Para tratamento das medições inconsistentes, é executado o processo descrito abaixo.

No processo de medição de velocidade do vento e irradiação solar em um dia, são realizadas 144 medições para cada uma dessas variáveis. Caso ocorra algum valor de medição fora do padrão dos demais, esse valor é substituído utilizando a média aritmética das medições próximas. Além disso, se houver lacunas de dados inferiores a 20%, essas lacunas são preenchidas utilizando a média aritmética das medições adjacentes. Entretanto, se as lacunas forem superiores a 20%, o dia é considerado inválido para análise e é descartado do processo.

2.2 Análise da complementaridade entre a geração solar e eólica

A avaliação da complementaridade entre as gerações dessas fontes pode ser feita em diferentes escalas temporais: em intervalos de 10 minutos ou até em intervalos maiores, como de hora em hora, mês em mês, etc. Uma das formas mais utilizadas na literatura para estimar a complementaridade energética é o Coeficiente de Pearson (CP). O valor do coeficiente é obtido por meio da divisão da covariância entre as duas variáveis pela multiplicação dos seus desvios padrões, como é visto na equação 2.1.

$$CP(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad 2.1$$

Este coeficiente exprime o grau de correlação de duas variáveis que estão linearmente associadas através de valores situados entre -1 e 1. Um valor de 0 indica

que não há associação entre as duas variáveis. Um valor maior que 0 indica similaridade. Isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta, o mesmo acontece com o valor da outra variável e vice-versa. Um valor menor que 0 indica complementaridade. Isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui e vice-versa. Uma abordagem para a interpretação do CP é mostrada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Interpretação do coeficiente de Pearson

Coeficiente de Pearson (CP)	Interpretação
$0,89 < CP \leq 1$	Similaridade muito forte
$0,69 < CP \leq 0,89$	Similaridade forte
$0,39 < CP \leq 0,69$	Similaridade moderada
$0,10 < CP \leq 0,39$	Similaridade fraca
$0,00 < CP \leq 0,10$	Similaridade insignificante
$CP = 0$	Sem correlação
$-0,10 \leq CP < 0$	Complementaridade insignificante
$-0,39 \leq CP < -0,10$	Complementaridade fraca
$-0,69 \leq CP < -0,39$	Complementaridade moderada
$-0,89 \leq CP < -0,69$	Complementaridade forte
$-1 \leq CP < -0,89$	Complementaridade muito forte

Fonte: [21]

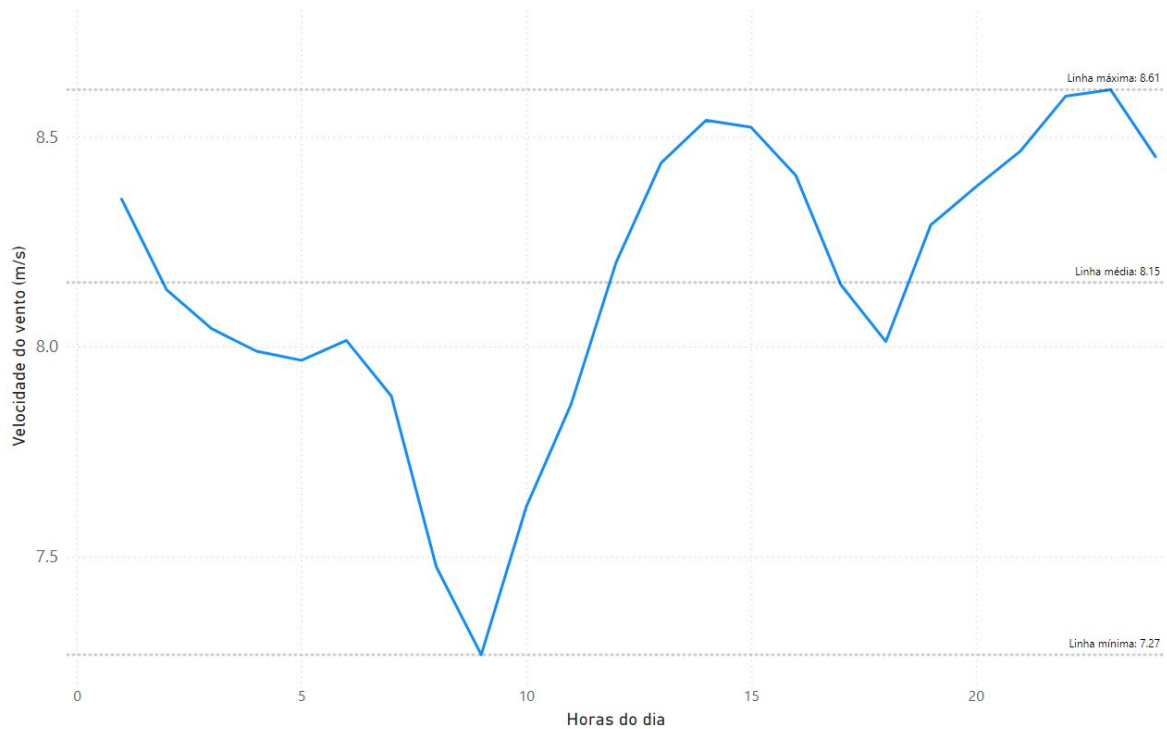
Para fins de analisar se há complementariedade entre as gerações eólica e solar fotovoltaica na região supracitada é necessário que haja uma correlação negativa e idealmente mais próxima de -1.

2.3 Modelagem Eólica

O aerogerador escolhido para a conversão energética tem potência nominal de 3 MW. Os dados deste modelo estão disponíveis em [22].

As medições de velocidade do vento foram realizadas do mês de novembro de 2021 a novembro de 2022, a uma altura de 160 metros. A Figura 2.1 apresenta a média horária dos dados de velocidade do vento utilizados neste trabalho.

Figura 2.1: Média horária das medições de velocidade do vento nos 208 dias



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base na Figura 2.1 pode-se observar que as medições de velocidade do vento apresentam valores mínimo, médio e máximo de 7,27, 8,15 e 8,61 m/s, respectivamente. Esses valores demonstram um comportamento quase constante, em média. Além disso, a ocorrência de ventos mais fortes é mais frequente durante a noite.

Para o cálculo da saída de potência em função da velocidade do vento foi desenvolvida uma equação empírica mostrada em 2.2 tomando como base a curva de potência em função da velocidade do vento fornecida pelo fabricante, disponível em [22].

$$P_{E(v(t))} = \left(1,51 * (\tanh(a * v(t) + b) + 1) \right) * N_{Aeg} \quad 2.2$$

$P_{E(v(t))}$ = Potência produzida pelo (s) aerogerador (es) no período de tempo “t” em função da velocidade do vento, em MW;

$\tanh$ = tangente hiperbólica;

a = número real que representa a taxa de crescimento da função;

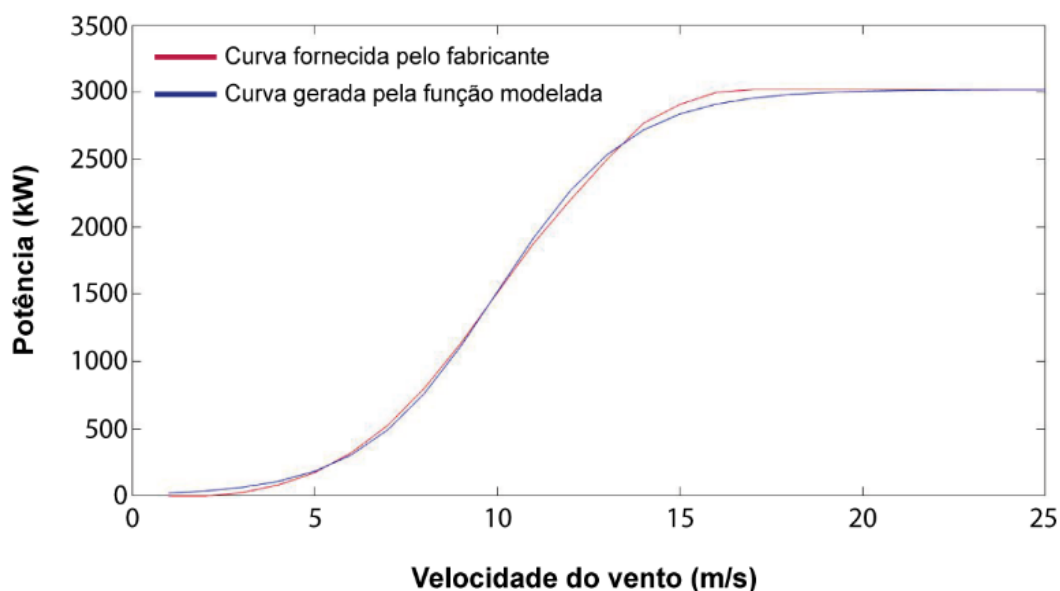
$v_{(t)}$ = velocidade do vento no período de tempo “ t ”, em metros/segundo;

b = número real que representa o deslocamento da tangente hiperbólica;

N°_{Aeg} = Número de aerogeradores.

Os valores de a e b foram estabelecidos por meio de um algoritmo utilizando o método de Gauss-Newton. Após a simulação, o valor encontrado para a foi de 0,274442864265874; o valor de b foi de -2,739742381093198.

Figura 2.2: Comparação entre a curva fornecida pelo fabricante e a curva gerada pela função modelada



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 2.2 compara a curva disponibilizada pelo fabricante e a curva produzida pela função modelada. É possível perceber que o grau de fidelidade entre as duas curvas é alto.

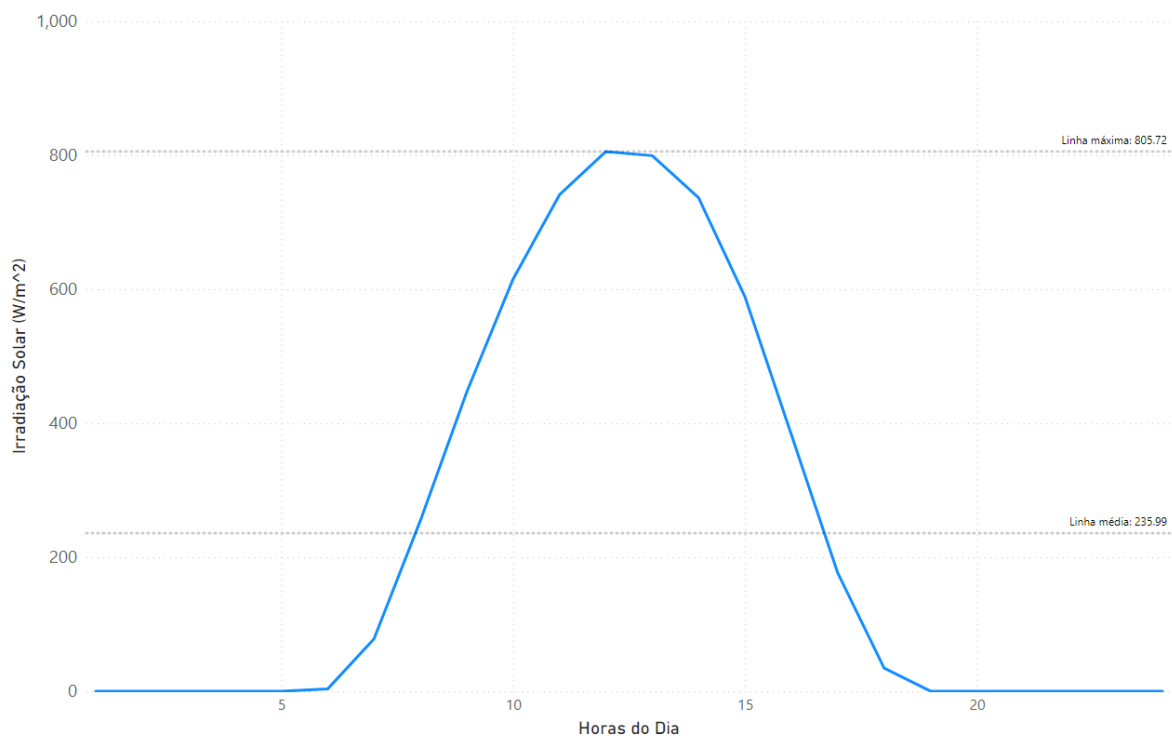
2.4 Modelagem Solar

O modelo de painel fotovoltaico escolhido para a conversão energética tem potência máxima de 300 Wp, eficiência de 18,1% e área de 1,66 m². Os dados deste

modelo estão disponíveis em [23]. Para este trabalho foi aplicada a topologia de painéis fotovoltaicos fixos, sem rastreamento solar e de face única.

As medições de irradiação solar foram realizadas do mês de novembro de 2021 a novembro de 2022. A Figura 2.3 apresenta a média horária dos dados de irradiação solar utilizados neste trabalho.

Figura 2.3: Média horária das medições de irradiação solar nos 208 dias



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível notar que a média horária dos dados colhidos se assemelha bastante a um gráfico típico da irradiação solar ao longo de um dia. Percebe-se que durante a madrugada e noite não há nenhuma geração solar. Por volta das 05:00, o nível de irradiação aumenta gradativamente até chegar ao seu pico por volta das 12:00, atingindo níveis de 805,72 W/m². Após esse horário, o nível de irradiação vai caindo até chegar a zero por volta das 18:00.

Para o cálculo da saída de potência em função da irradiação solar, utilizou-se a equação 2.3 [24].

$$P_{S(G(t))} = \eta * A * G(t) * N^{\circ}_P * (1 * 10^{-6}) \quad 2.3$$

$P_{S(G(t))}$ = Potência produzida pelo (s) painel (eis) solar (es) no período de tempo “ t ” em função da irradiação solar, em MW;

η = Eficiência do módulo, em %;

A = Área do módulo, em m^2 ;

$G_{(t)}$ = Irradiação solar recebida no período de tempo “ t ”, em W/m^2 ;

N°_p = Número de painéis fotovoltaicos.

2.5 Modelagem das Usinas Híbridas

2.5.1 Central Geradora Híbrida (CGH)

Neste trabalho foi modelada uma CGH eólica-solar sem tecnologia de armazenamento cuja potência nominal total instalada é descrita na equação 2.4.

$$P_{Inst(Total)} = P_{Inst(Eol)} + P_{Inst(Sol)} \quad 2.4$$

$P_{Inst(Total)}$ = Potência Instalada Total, em MW;

$P_{Inst(Eol)}$ = Potência Instalada Eólica, em MW;

$P_{Inst(Sol)}$ = Potência Instalada Solar, em MW.

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

2.5.1.1 Método analítico

Inicialmente, um método analítico é proposto com o objetivo de determinar a composição da CGH que maximize o seu fator de capacidade. O fator de capacidade (FC) é um parâmetro básico definido como a razão entre a produção de energia efetiva em um período de tempo e a capacidade total máxima de geração neste mesmo período. É uma medida adimensional que traduz a eficiência de uma planta de geração de energia em relação ao seu valor nominal e serve como parâmetro para

comparar projetos de potência nominal diferentes. O fator de capacidade é dado pela equação 2.5.

$$F_{C(t)} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{E(v(t))} + P_{S(G(t))}) * t}{P_{Inst(Total)} * t} \quad 2.5$$

$F_{C(t)}$ = Fator de Capacidade no período de tempo “ t ”;

$P_{E(v(t))}$ = Potência produzida pelo (s) aerogerador (es) no período de tempo “ t ” em função da velocidade do vento, em MW. Calculada por meio da equação 2.2;

$P_{S(G(t))}$ = Potência produzida pelo (s) painel (eis) solar (es) no período de tempo “ t ” em função da irradiação solar, em MW. Calculada por meio da equação 2.3;

$P_{Inst(Total)}$ = Potência Instalada Total da CGH, em MW. Calculada por meio da equação 2.4;

t = Período de tempo considerado, em horas.

O método analítico calcula de forma sequencial a geração eólica e fotovoltaica de uma CGH com a capacidade nominal pré-determinada pelo usuário, calculando a potência despachada de forma cronológica calculada usando os dados de velocidade de vento e irradiação solar medidos em campo e os modelos dos dispositivos de conversão (turbinas e painéis fotovoltaicos) considerados. Ao final do processo, determina-se o fator de capacidade do cenário simulado para todo o período de disponibilidade dos dados. Para o caso a ser investigado na próxima seção foram considerados passos de 5% de acréscimo/decrécimo na potência instalada de cada fonte. Este passo pode ser configurado de acordo com o usuário.

2.5.1.2 Algoritmo genético

Em seguida, também é proposta uma metodologia que aplica uma técnica de inteligência artificial, neste caso foi usado o algoritmo genético (AG), para buscar uma solução otimizada para o problema da determinação da configuração ótima da CGH que maximize o fator de capacidade da planta de geração, considerando restrições para o projeto da usina.

A função objetivo para este problema é a maximização do fator de capacidade, mostrada na equação 2.6.

$$maxF_{C(t)} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{E(v(t))} + P_{S(G(t))}) * t}{P_{Inst(Total)} * t} \quad 2.6$$

Para maximização deste fator foram utilizadas duas variáveis de entrada: a potência instalada eólica e a potência instalada solar. O percentual mínimo de potência instalada solar foi definido como 5% da potência instalada da CGH. O problema é sujeito às seguintes restrições.

$$P_{Inst(Total)} = P_{Inst(Eol)} + P_{Inst(Sol)} \quad 2.7$$

$$0 \leq P_{Inst(Eol)} \leq 0,95 \cdot P_{Inst(Total)} \quad 2.8$$

$$0,05 \cdot P_{Inst(Total)} \leq P_{Inst(Sol)} \leq P_{Inst(Total)} \quad 2.9$$

$$0 \leq P_{E(v(t))} \leq P_{Inst(Eol)} \quad 2.10$$

$$0 \leq P_{S(G(t))} \leq P_{Inst(Sol)} \quad 2.11$$

2.5.2 Modelagem da Central Geradora Associada (CGA)

Como dito, um dos principais benefícios da resolução da ANEEL n° 954 é a possibilidade da contratação de um MUST entre a potência nominal da fonte de energia de maior participação e a potência instalada total do empreendimento havendo um menor custo associado aos contratos de uso da rede para os geradores.

Considerando a nova regulação aprovada, este método proposto nesta seção busca determinar a capacidade nominal de uma planta de energia solar a ser associada a uma planta de energia eólica já existente, sem que haja necessidade de revisão do valor do MUST contratado previamente e garantindo que não haja ultrapassagem do MUST de forma a gerar multas para o proprietário da CGA. A solução encontrada é capaz de aumentar a eficiência da utilização da rede de transmissão, diminuindo a ociosidade da infraestrutura existente.

Neste caso, a usina eólica existente possui uma potência instalada igual ao MUST contratado, não considerando o desconto da carga própria.

2.5.2.1 Algoritmo genético

Para a solução deste problema foi utilizado um algoritmo genético para determinar a potência instalada ideal da usina solar a ser associada a usina eólica existente, de forma que o MUST contratado atualmente não seja modificado e que as restrições de ultrapassagem sejam atendidas apropriadamente.

A função objetivo deste problema é mostrada na equação 2.12. A variável de entrada dessa função é o número de painéis fotovoltaicos (N^o_p), descrita na equação 2.3, essa é manipulada pelo algoritmo genético de forma que a função $\min Valor$ seja o mais próximo de zero possível.

$$\min Valor = \sum_{i=1}^T Valor_{[i]} \quad 2.12$$

A variável $Valor$ contabiliza a ocorrência de multas devido a ultrapassagem no valor contratado do MUST. Ela é dependente da potência solar adicional instalada na CGA, sendo calculada de acordo com a equação 2.13.

$$Valor_{[i]} = \begin{cases} k1 * (P_{con} - P_{ger(t)}), \text{ quando } P_{ger(t)} < P_{con} \\ 0, \text{ quando } P_{con} \leq P_{ger(t)} \leq P_{con} * 1,01 \\ k2 * (P_{ger(t)} - P_{con} * 1,01), \text{ quando } P_{ger(t)} > P_{con} * 1,01 \end{cases} \quad 2.13$$

Em que:

$$P_{ger(t)} = P_{E(v(t))} + P_{S(G(t))} \quad 2.14$$

P_{con} = Potência total contratada no ponto de conexão da CGA, em MW;

$P_{ger(t)}$ = Potência efetivamente produzida no período “t” pela CGA, em MW;

$P_{E(v(t))}$ = Potência produzida pelo (s) aerogerador (es) no período “t” em função da velocidade do vento, em MW. Calculada por meio da equação 2.2;

$P_{S(G(t))}$ = Potência produzida pelo (s) painel (eis) solar (es) no período “t” em função da irradiação solar, em MW. Calculada por meio da equação 2.3;

k_1 e k_2 = Constantes definidas pelo especialista para estabelecer a relação de otimização;

t = Período considerado, em horas.

Foi aplicada uma penalidade por meio da constante k_1 para quando o valor da potência efetivamente produzida pela CGA estiver abaixo da potência contratada no ponto de conexão; e uma penalidade por meio da constante k_2 para quando o valor da potência efetivamente produzida pela CGA exceder 1% da potência contratada no ponto de conexão. Esse valor de 1% vem do item 6.3.4.a de um documento publicado pela ONS (Operador Nacional do Sistema) que diz respeito ao pagamento de uma parcela de ineficiência por ultrapassagem quando a potência elétrica injetada no sistema for maior que 101% do MUST [25].

Vale ressaltar também que o valor de k_2 é muito superior ao de k_1 , uma vez que se pretende haver uma penalidade maior quando há ultrapassagem de 1% da potência contratada no ponto de conexão. Ademais, não há penalidade quando o valor da potência efetivamente produzida pela CGA estiver entre a potência contratada no ponto de conexão e 101% desse valor, uma vez que essa é considerada a faixa de potência ideal.

3 RESULTADOS

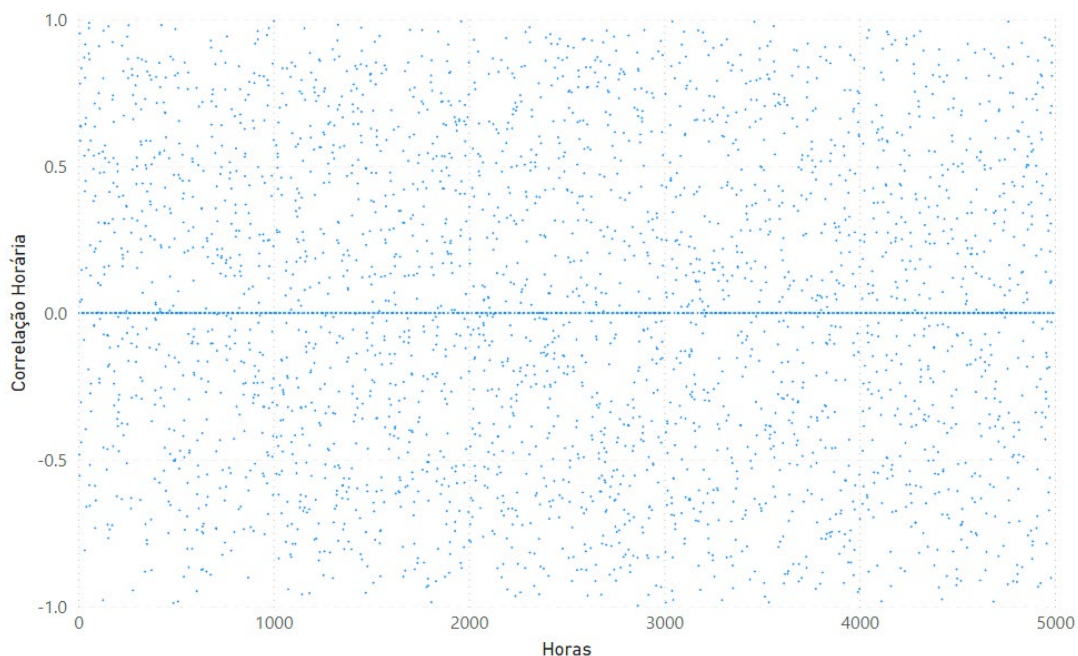
3.1 Análise da complementaridade entre a geração eólica e a solar

A análise da complementaridade entre a geração eólica e solar com os dados medidos na região de Barreirinhas e Paulino Neves foi feita em três escalas temporais: horária, diária e mensal. Para cada uma das avaliações considerou-se que o parque eólico é representado por um único aerogerador e o parque solar por um único painel fotovoltaico. Nas seções subsequentes os resultados destas análises serão apresentados.

3.1.1 Complementaridade horária

A Figura 3.1 mostra o coeficiente de Pearson nas 4992 horas analisadas. Já a Figura 3.2 e a Figura 3.3 classificam esses coeficientes de acordo com a Tabela 2.1.

Figura 3.1: Coeficientes de Pearson horários



Fonte: Elaborado pelo autor

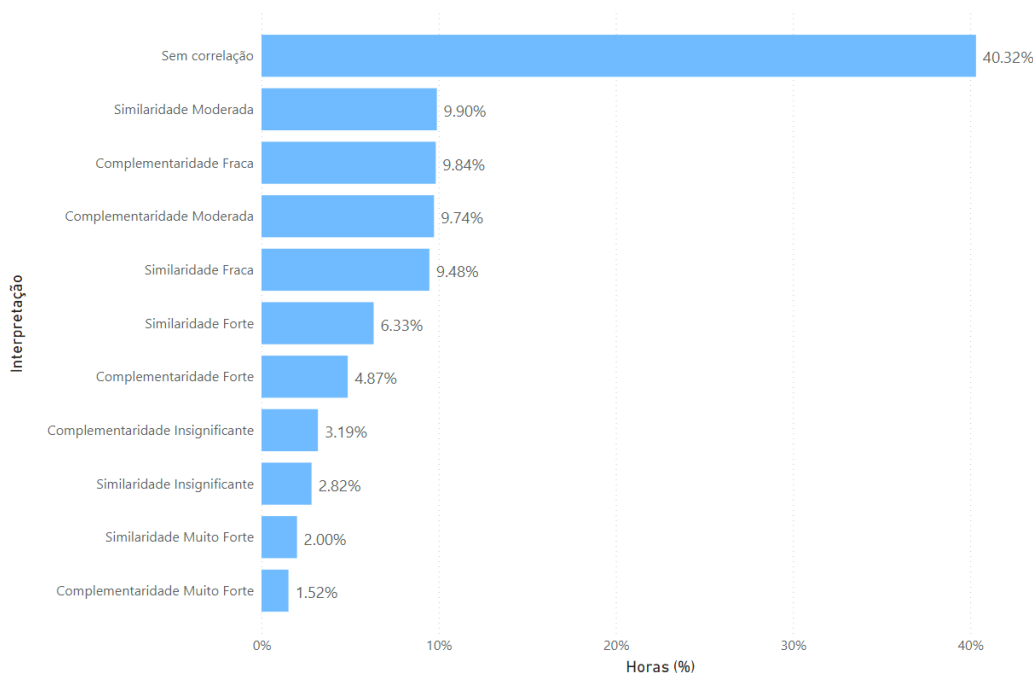
Figura 3.2: Interpretação geral dos Coeficientes de Pearson horários

Horas (%)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.3: Interpretação detalhada dos Coeficientes de Pearson horários



Fonte: Elaborado pelo autor

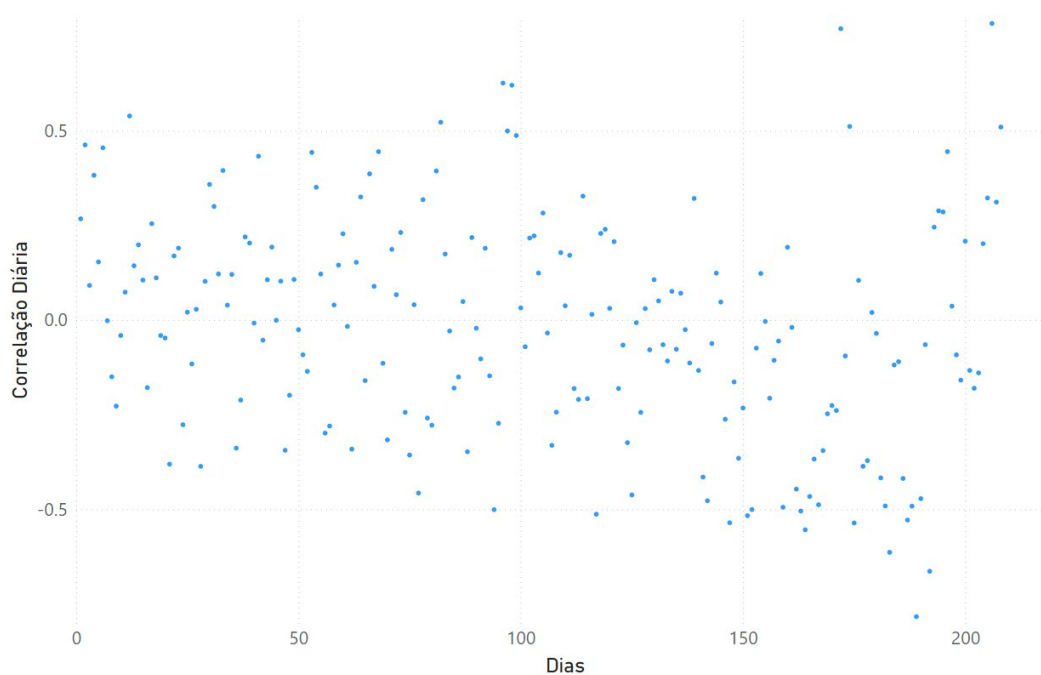
Os resultados indicam que para o local investigado, não há um comportamento predominantemente complementar entre as gerações eólica e solar. Do total de horas que foi identificada complementaridade (29,15%), apenas 6,39% apresentaram um grau forte ou muito forte. Os horários mais recorrentes em que a complementaridade foi forte foram as 7:00 e 8:00 da manhã e 17:00 horas da tarde.

É importante citar que os horários que não possuem correlação entre as gerações são aqueles que não possuem geração solar.

3.1.2 Complementaridade Diária

A Figura 3.4 mostra o coeficiente de Pearson nos 208 dias analisados. Já a Figura 3.5 e a Figura 3.6 classificam esses coeficientes de acordo com a Tabela 2.1.

Figura 3.4: Coeficientes de Pearson diários



Fonte: Elaborado pelo autor

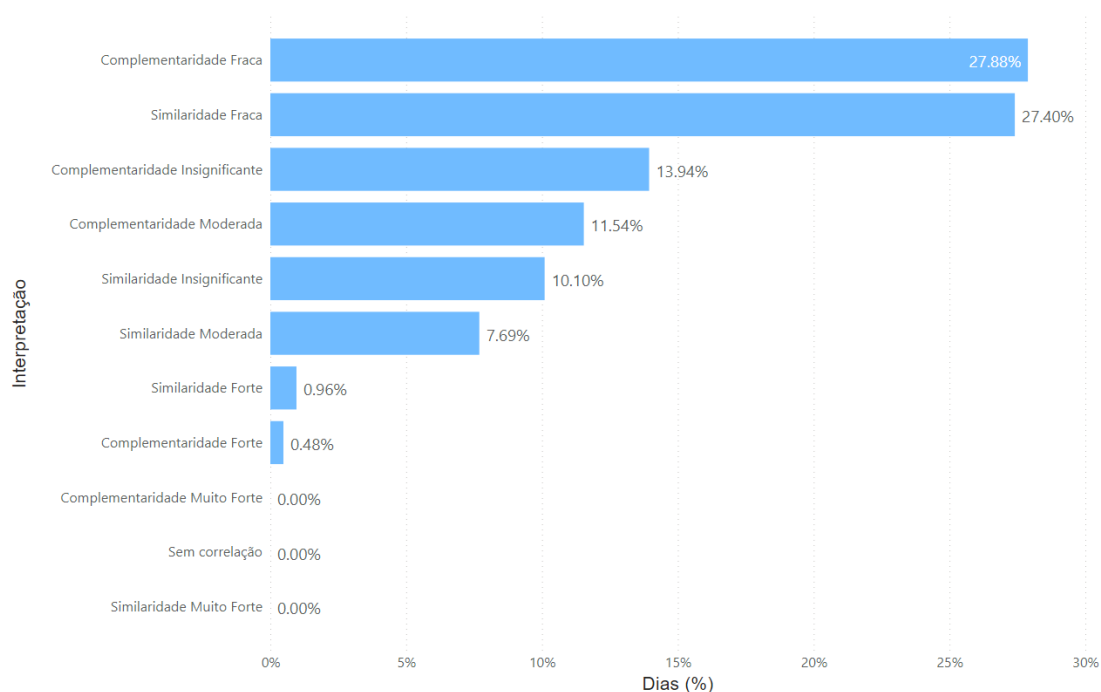
Figura 3.5: Interpretação geral dos Coeficientes de Pearson diários

Dias (%)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.6: Interpretação detalhada dos Coeficientes de Pearson diários



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicam que para o local investigado, as gerações eólica e solar apresentaram um comportamento predominantemente complementar. No entanto, do total de dias que foi identificada complementaridade (53,85%), 41,82% apresentaram um grau insignificante ou fraco. Nos dias restantes o grau de complementaridade foi majoritariamente moderado.

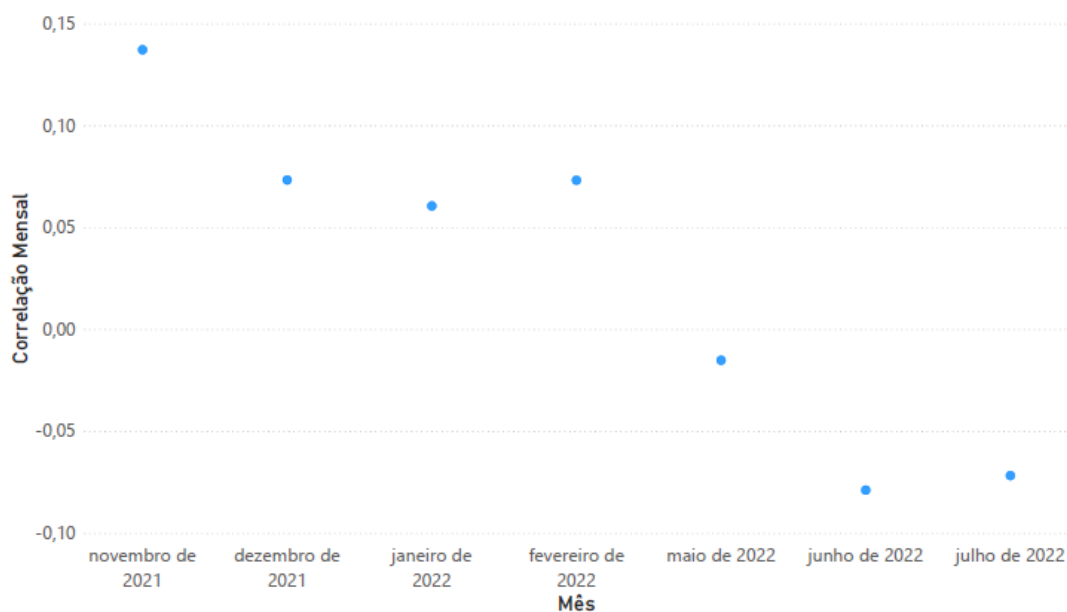
Estes resultados de complementaridade temporal em períodos mais curtos (horários e diários) são interessantes do ponto de vista da operação do sistema elétrico. A partir destes resultados é possível ao Operador do Sistema prever a necessidade de contratação de serviços de regulação e em quais horários eles serão provavelmente solicitados para permitir a operação segura do sistema.

3.1.3 Complementaridade Mensal

A Figura 3.7 mostra o coeficiente de Pearson nos 7 meses analisados. É importante ressaltar que só foram analisados os meses em que há presença de medições em pelo menos 19 dias. Já a Figura 3.8 e a Figura 3.9 classificam esses coeficientes de acordo com a Tabela 2.1.

Os resultados indicam que para o local investigado, as gerações eólica e solar não apresentam um comportamento predominantemente complementar. Em 42,86% dos meses analisados foi identificado um grau de complementaridade insignificante e o mês cuja complementaridade foi maior foi junho de 2022.

Figura 3.7: Coeficientes de Pearson mensais



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.8: Interpretação geral dos Coeficientes de Pearson mensais

Meses (%)

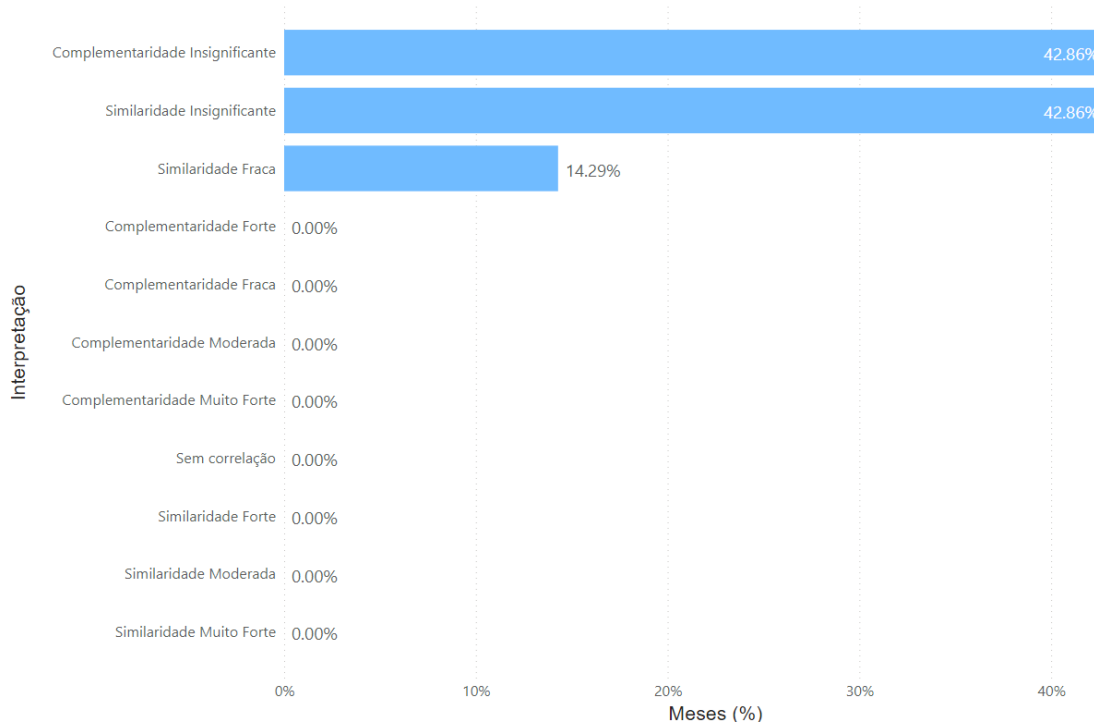


Fonte: Elaborado pelo autor

Ao contrário do que se imaginava inicialmente, a análise da correlação de Pearson entre a geração de fonte eólica e a geração de fonte fotovoltaica indicou cenários de complementaridade insignificante e similaridade insignificante durante

intervalos de tempo maiores. Estes resultados podem influenciar no planejamento energético do sistema, visto que se sabe de antemão que os recursos renováveis eólico e solar nesta região não apresentam complementaridade, demandando o planejamento de fontes adicionais a serem contratadas durante o ano.

Figura 3.9: Interpretação detalhada dos Coeficientes de Pearson mensais



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Composição ótima da CGH

3.2.1 Metodologia analítica

Para o teste da metodologia analítica foi considerada uma CGH de 300 MW. A variação da penetração de cada fonte ocorre em faixas de 5%, conforme descrito anteriormente. Esta condição cria os 21 cenários mostrados na Tabela 3.1, com potência instalada de cada fonte variando de 0 a 100% da potência nominal instalada. Como a análise anterior demonstrou que os recursos eólico e solar não apresentam complementaridade forte, também foram consideradas usinas com uma única fonte para efeito de comparação (100% eólica e 100% solar). Os resultados são comparados de modo a escolher a configuração híbrida que apresenta maior FC.

A Tabela 3.2 mostra o fator de capacidade da CGH considerando todo o período (208 dias) dos 21 cenários mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Cenários do método analítico

Cenários	% Eólica	%Solar	$P_{Inst(Eol)}$	$P_{Inst(Sol)}$
1	100	0	300	0
2	95	5	285	15
3	90	10	270	30
4	85	15	255	45
5	80	20	240	60
6	75	25	225	75
7	70	30	210	90
8	65	35	195	105
9	60	40	180	120
10	55	45	165	135
11	50	50	150	150
12	45	55	135	165
13	40	60	120	180
14	35	65	105	195
15	30	70	90	210
16	25	75	75	225
17	20	80	60	240
18	15	85	45	255
19	10	90	30	270
20	5	95	15	285
21	0	100	0	300

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que quanto maior a participação eólica, maior é o fator de capacidade da CGH. Por essa razão, o melhor cenário foi o primeiro em que foi simulado uma planta 100% eólica. No entanto, quando é levada em consideração a questão do hibridismo, é necessário escolher um cenário onde há participação das duas tecnologias de geração que possua o melhor fator de capacidade. Nesse

contexto, o cenário número 2 apresenta o melhor resultado. Esse que será analisado com detalhe nas seções seguintes.

Tabela 3.2: Fator de capacidade dos cenários

Cenários	FC (%)
1	32.51%
2	32.06%
3	31.62%
4	31.17%
5	30.73%
6	30.28%
7	29.84%
8	29.39%
9	28.95%
10	28.51%
11	28.06%
12	27.62%
13	27.17%
14	26.73%
15	26.28%
16	25.84%
17	25.39%
18	24.95%
19	24.50%
20	24.06%
21	23.61%

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Metodologia utilizando algoritmos genéticos

Para otimização da CGH, utilizou-se a *toolbox* de algoritmos genéticos do *software* MATLAB. Utilizou-se o AG com a população inicial de 50 indivíduos. Esse algoritmo é elitista, selecionando ao fim de cada geração 5% (2 indivíduos) da população com melhor resultado na função fator de capacidade avaliada (Equação 2.6), sendo mantidos para a próxima geração. Em seguida, selecionando os indivíduos de forma aleatória é feito o cruzamento utilizando a função de cruzamento de Laplace descrita na equação 3.1.

$$xOverKid = p1 + bl * abs(p1 - p2)$$

3.1

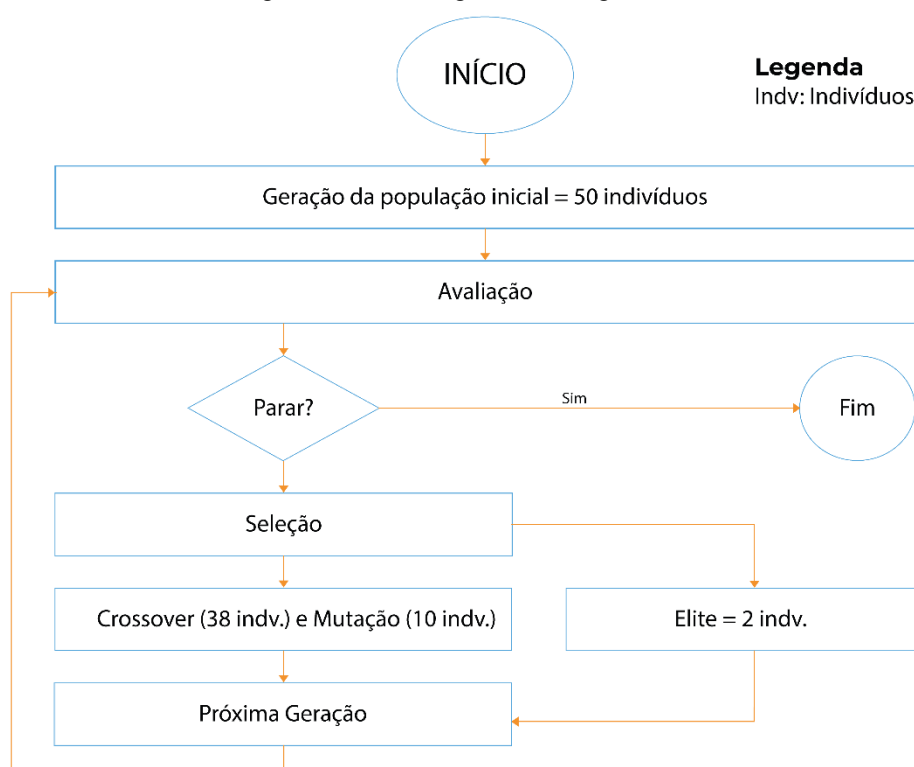
$$xOverKid = p2 + bl * abs(p1 - p2)$$

Em que $p1$ e $p2$ são os pais de $xOverKid$ e bl é um número aleatório gerado a partir de uma distribuição de Laplace.

Os indivíduos com melhor aptidão na função de cruzamento têm mais chances de produzir novos indivíduos para novas gerações e este cruzamento é responsável por produzir 80% da nova população (38 indivíduos), o restante (10 indivíduos) é produzido através de mutação e a mesma deve respeitar as restrições especificadas.

Neste caso, o indivíduo se caracteriza como um conjunto de potência instalada eólica e potência instalada solar e o cruzamento se refere a um ponto entre os dois indivíduos, nesta situação, pais, que participaram da geração deste terceiro. A Figura 3.10 mostra o fluxograma do algoritmo genético.

Figura 3.10: Fluxograma do Algoritmo Genético



Fonte: Elaborado pelo autor

Como método de avaliação para interrupção do algoritmo, estabeleceram-se dois critérios, o primeiro foi a parada após um número total de 100 gerações e o segundo foi a avaliação das mudanças relativas entre gerações, ou seja, a medida em que toda a população converge para um único ponto, este método causará o término da execução do algoritmo. Para este caso em específico, o segundo método foi disparado antes do número máximo de gerações, alcançando cerca de 50 ciclos antes de convergir para um valor ótimo.

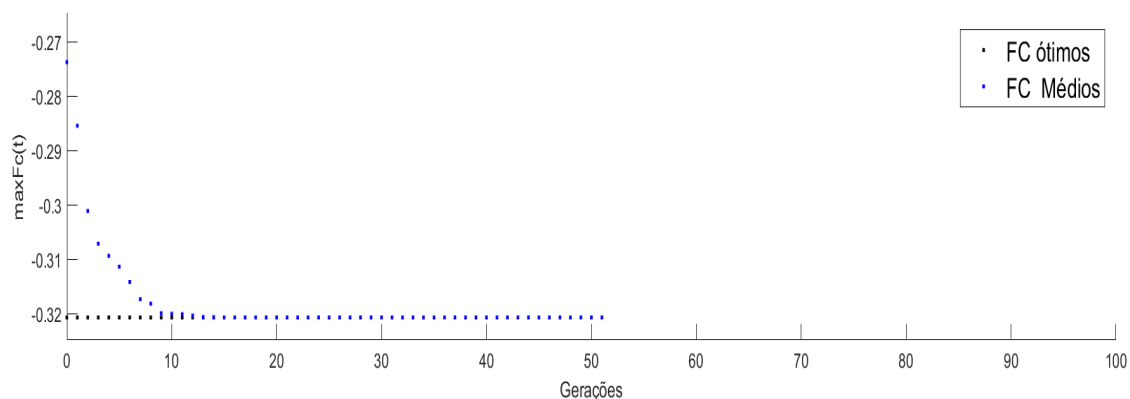
Os resultados indicam que a composição ótima da CGH é 95% eólica, detendo de 285 MW de potência instalada, e 5% solar com 15 MW de potência instalada. A planta eólica é composta por 95 aerogeradores e a solar por 50000 painéis fotovoltaicos. A potência total instalada da CGH é de 300 MW. A Tabela 3.3 sumariza esses dados.

Tabela 3.3: Dados da CGH

Potência Instalada Eólica (MW)	Potência Instalada Solar (MW)	Potência Instalada Total (MW)	Número de Aerogeradores	Número de Painéis
285	15	300	95	50000

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.11 representa os valores do FC avaliados de cada geração. Em azul, temos o valor de médio do fator de capacidade de cada uma das gerações levando em consideração todos os indivíduos, independentemente de sua posição na escala de elite. Já em preto temos o melhor indivíduo de cada geração (32%). É possível observar no gráfico, então, uma convergência dos valores azuis na direção dos valores em preto indicando que estes indivíduos atingiram pontos ótimos de tal forma que a sua aptidão não foi superada ao longo das gerações, mas sim, forçou a população a convergir em sua direção.

Figura 3.11: Valores da função $\max F_{C(t)}$ (2.6) avaliados de cada geração

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Análise do cenário ótimo

O fator de capacidade encontrado para o cenário ótimo para os 208 dias é de 32,06%, como mostra a Figura 3.11. A energia total atingiu aproximadamente 480 GWh ao longo desse período, sendo a geração eólica responsável por 96,25% desse

valor, detendo 462 GWh. Já a solar foi responsável por 3,75%, detendo de 18 GWh. A Tabela 3.4 sumariza esses dados.

Vale ressaltar que não foram consideradas perdas elétricas. Também não foram consideradas possíveis indisponibilidades da usina e, portanto, para todos os fins, os dados a seguir apresentados, como fator de capacidade e geração, devem ser entendidos como geração teórica da usina. Tal premissa se justifica por fins de simplificação das simulações, uma vez que a modelagem de perdas em pouco deve alterar os perfis de geração.

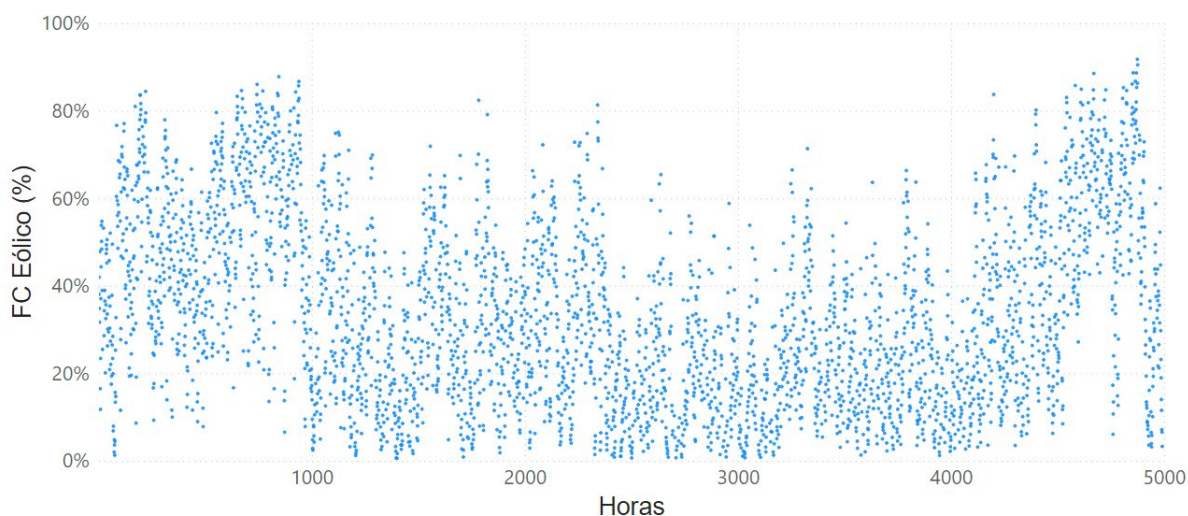
As figuras 3.12, 3.13 e 3.14 mostram o fator de capacidade eólico, solar e o total (eólico-solar), respectivamente, ao longo das 4992 horas. É possível notar a grande variabilidade desse fator no decorrer desse período em virtude da intermitência dos recursos primários dessas fontes. Em média o FC eólico horário ficou em torno dos 32%, o solar ficou por volta de 23% e o total em 32%.

Tabela 3.4: Dados do cenário ótimo da CGH para os 208 dias

Geração Eólica (GWh)	Geração Solar (GWh)	Geração Total (GWh)	Período (Dias)	FC (%)
462	18	480	208	32,06

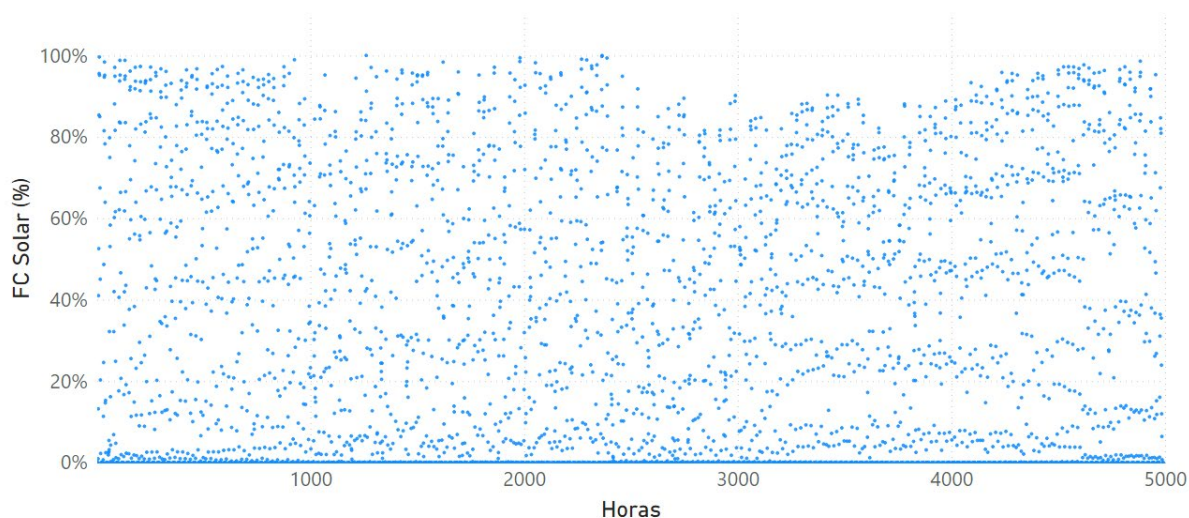
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.12: FC Eólico horário



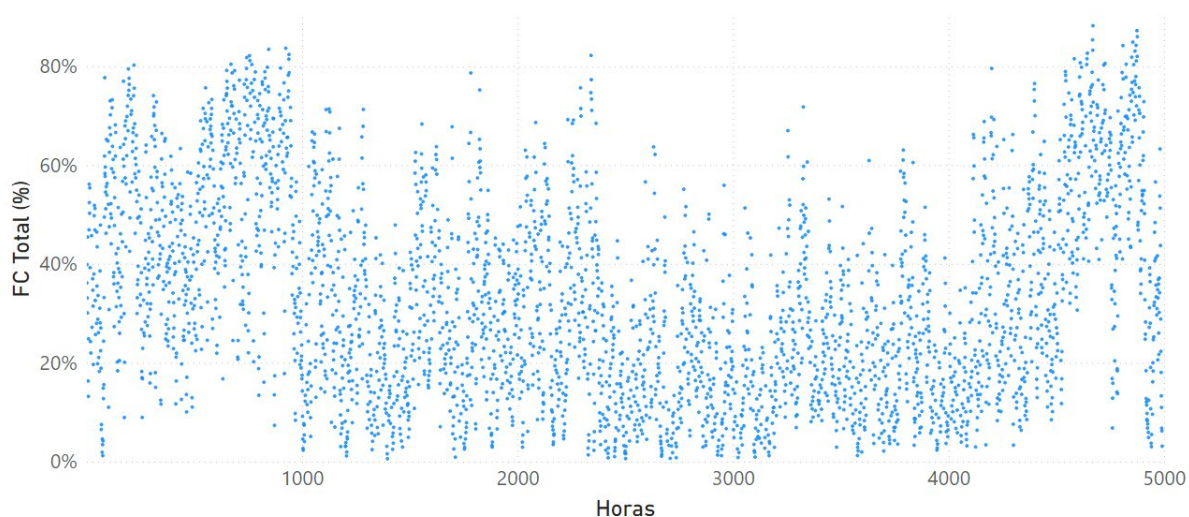
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.13: FC Solar horário



Fonte: Elaborado pelo autor

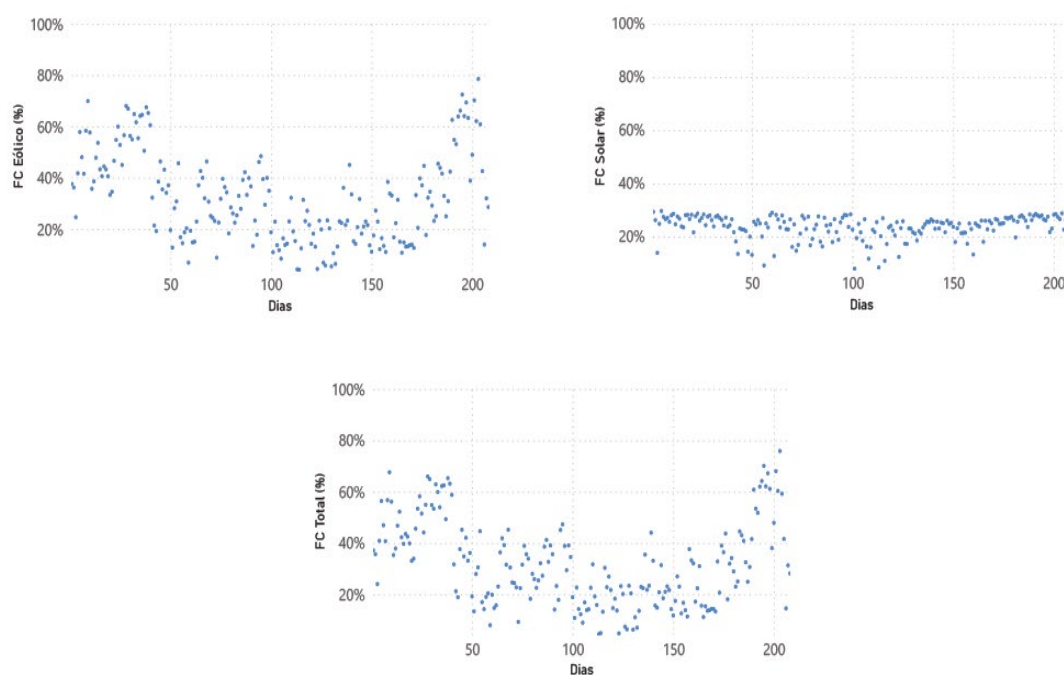
Figura 3.14: FC Total (Eólico-Solar) horário



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.15 mostra o fator de capacidade eólico, solar e o total (eólico-solar) durante os 208 dias analisados. É possível perceber que há um grande grau de dispersão nos valores do fator de capacidade eólico. Esse mesmo comportamento é observado nos FC eólicos-solares por conta da participação eólica ser majoritária na CGH. Em contrapartida, é notável que a maioria dos valores do FC solar ficaram entre 20 e 40%. Esse comportamento acontece porque as curvas de geração solar durante os dias estudados são bastante similares. Em média o FC diário eólico, solar e o total ficaram, respectivamente, em 32%, 23% e 32%.

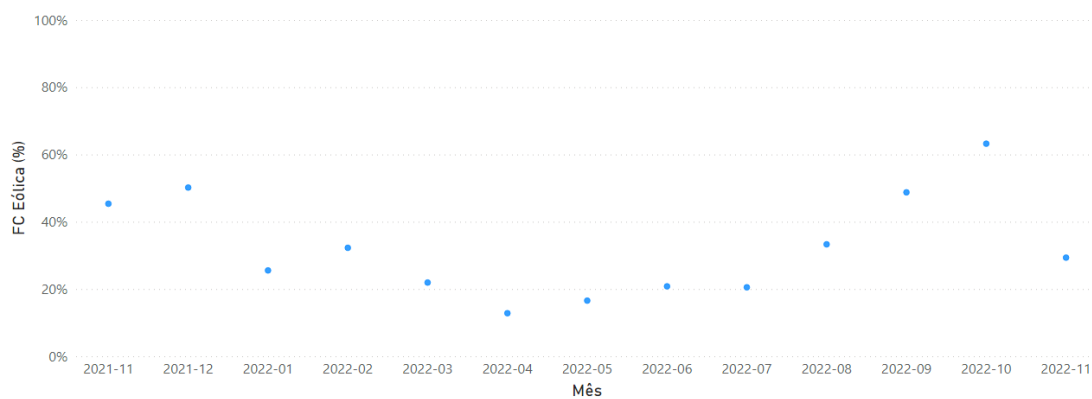
Figura 3.15: Fator de Capacidade diário eólico, solar e total (eólico-solar)



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.16 apresenta o FC eólico mensal. Percebe-se que há uma grande variação do FC ao longo dos meses, a começar de 12% (menor FC verificado – abril de 2022) até 63% (maior FC verificado – outubro de 2022). Em média o FC ficou por volta dos 32% ao longo desses 13 meses analisados.

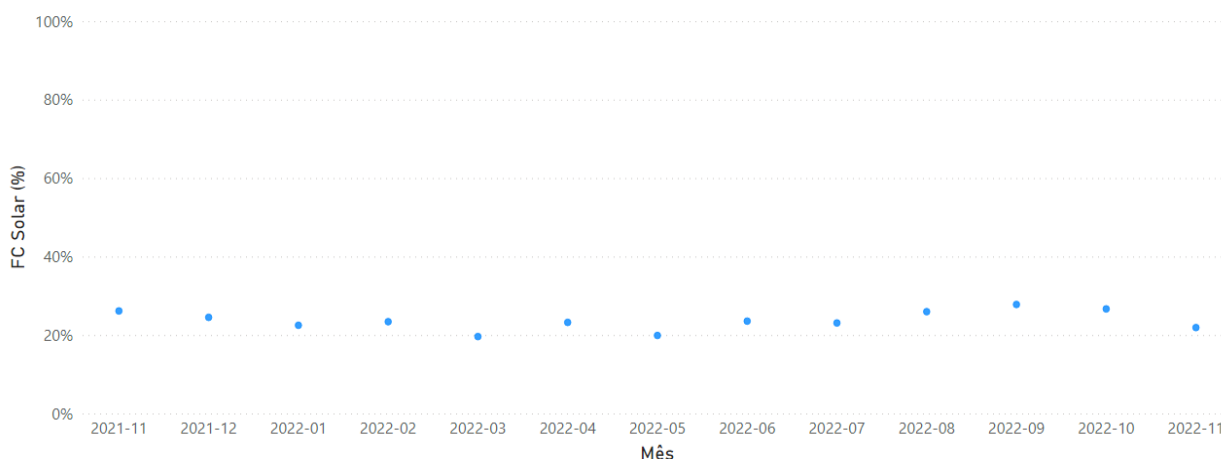
Figura 3.16: Fator de Capacidade Eólico mensal



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.17 apresenta o FC solar mensal. Percebe-se que há pequena variação do FC, a começar de 19% (menor FC verificado – março de 2022) até 27% (maior FC verificado – setembro de 2022). Esse comportamento é devido às curvas de geração solar durante os meses estudados serem bastante similares. Em média o FC ao longo dos 13 meses avaliados ficou em torno dos 23%.

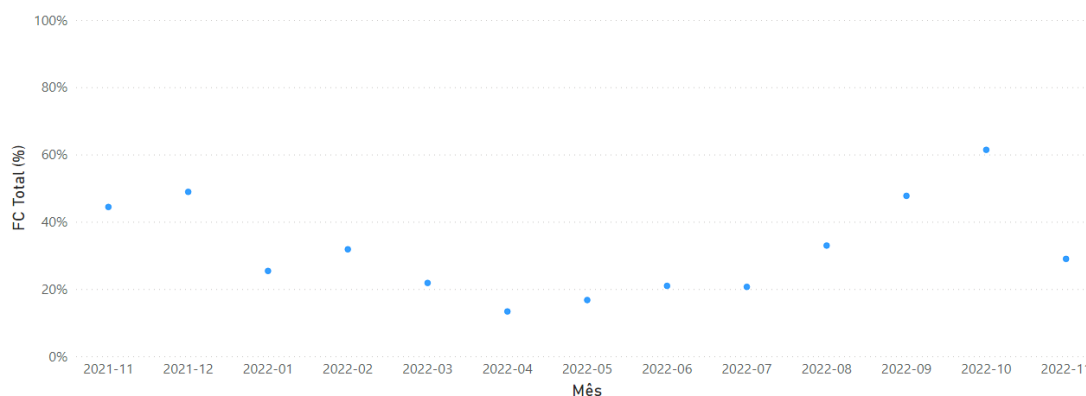
Figura 3.17: Fator de Capacidade Solar mensal



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.18 apresenta o FC eólico-solar mensal. Percebe-se que há uma grande variação do FC ao longo dos meses, a começar de 13% (menor FC verificado – abril de 2022) até 61% (maior FC verificado – outubro de 2022). Esse comportamento é devido a maior parte da potência instalada da CGH ser eólica. Em média o FC ficou por volta dos 31% ao longo desses 13 meses.

Figura 3.18: Fator de Capacidade Eólico-Solar (total) mensal

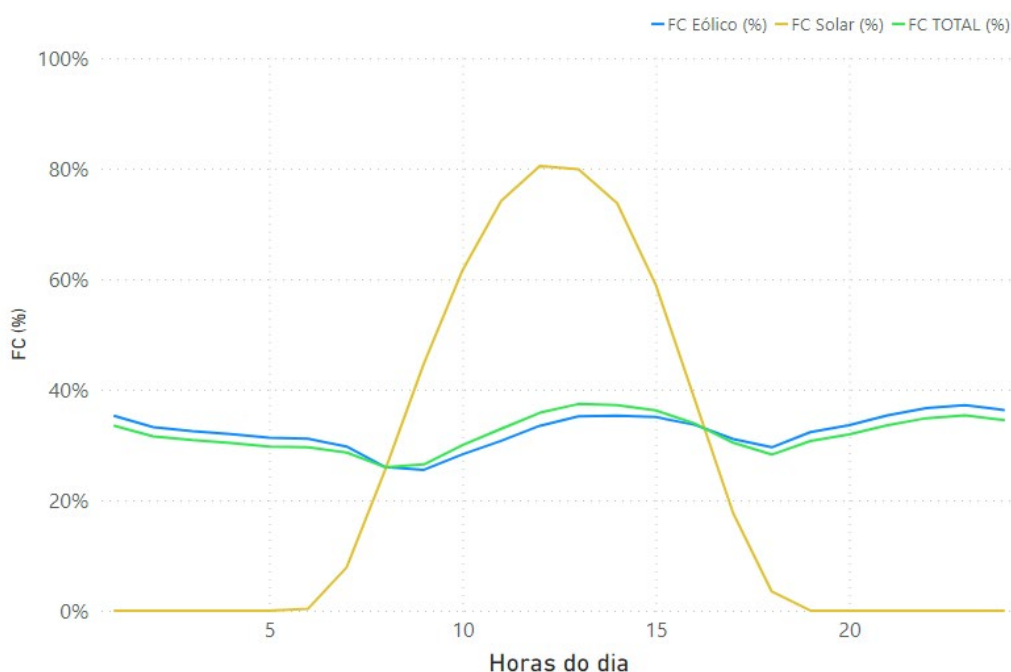


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.19 mostra o comportamento do FC eólico, solar e o total ao longo das 24 horas do dia. É possível notar que o FC eólico é mais constante no decorrer das horas, com valores variando entre 20 e 40% em média. Em contrapartida, o FC solar muda bastante, com valores variando de 0 a 80%. Em horários em que não há geração solar, o FC é nulo. Já em horários em que há geração solar até o meio-dia, percebe-se que o FC aumenta progressivamente. Depois desse período, ele vai diminuindo até chegar a zero.

Analisando-se o FC eólico-solar percebe-se que há um aumento entre as 08:00 até as 17:00. Essa melhora decorre por conta da participação solar na CGH. Nos momentos onde não há geração solar, o FC da CGH é igual ao eólico.

Figura 3.19: Fator de Capacidade médio horário eólico, solar e eólico-solar (total)

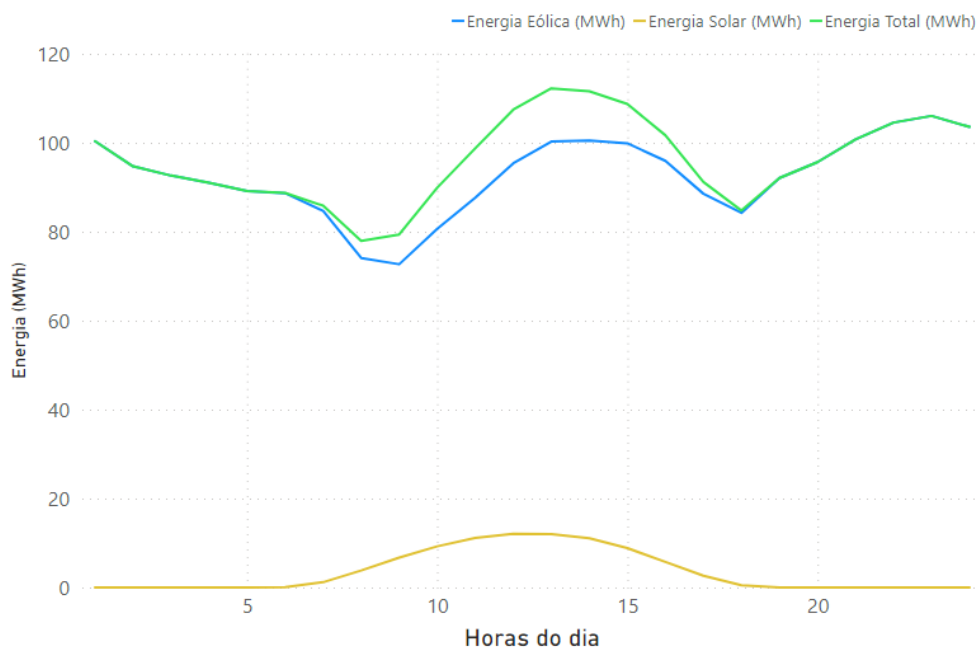


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3.20 mostra a média de energia horária eólica, solar e eólica-solar. Percebe-se que a parte eólica está todo tempo gerando energia, com valores variando entre 60 e 100 MWh. Em contrapartida, a parte solar só gera energia em parte do dia, apresentando valores que variam de 0 a 20 MWh. Quando se analisa a combinação das duas, observa-se que nos momentos onde não há geração solar, a geração eólica é responsável totalmente pela geração. Quando há geração solar, evidencia-se a

contribuição da mesma para uma geração mais estável do conjunto, com valores variando de 80 a 120 MWh.

Figura 3.20: Média horária de energia eólica, solar e eólica-solar (total)

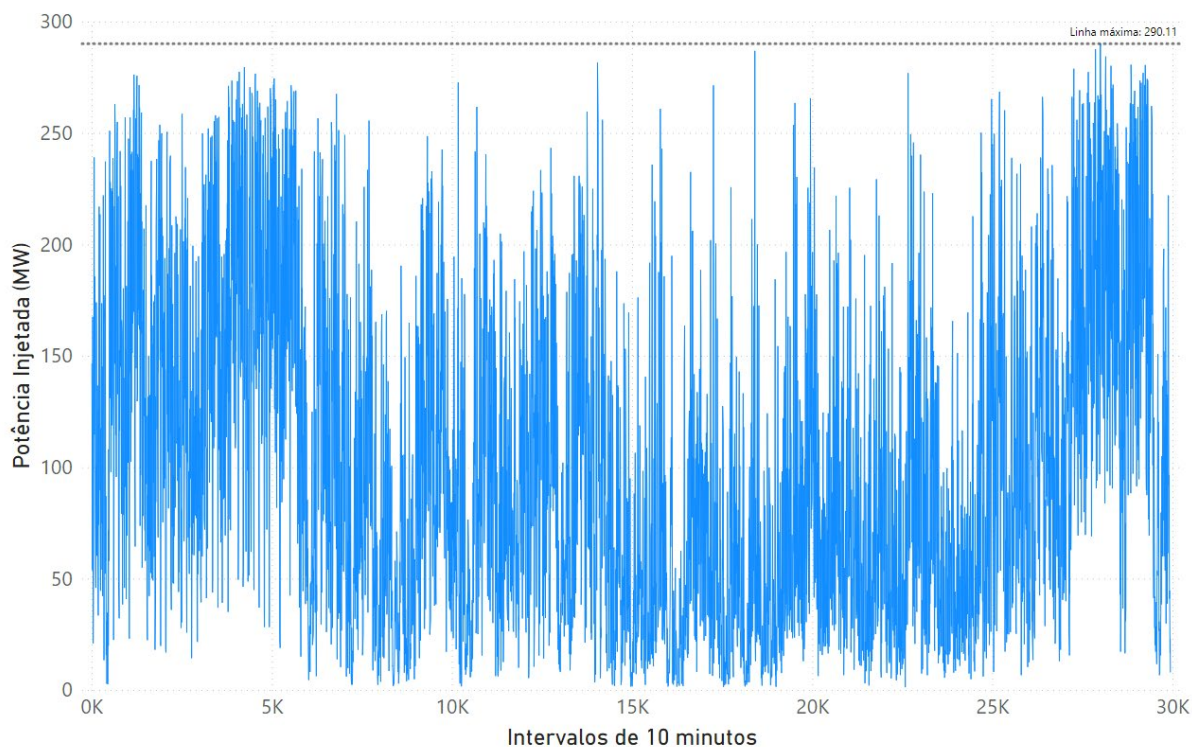


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.4 Valor ideal do MUST a ser contratado

A Figura 3.21 mostra o comportamento da potência injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos analisados. É possível notar que há uma grande variação do seu valor ao longo desse período com máximo de 290,11 MW.

Figura 3.21: Comportamento da potência elétrica injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos



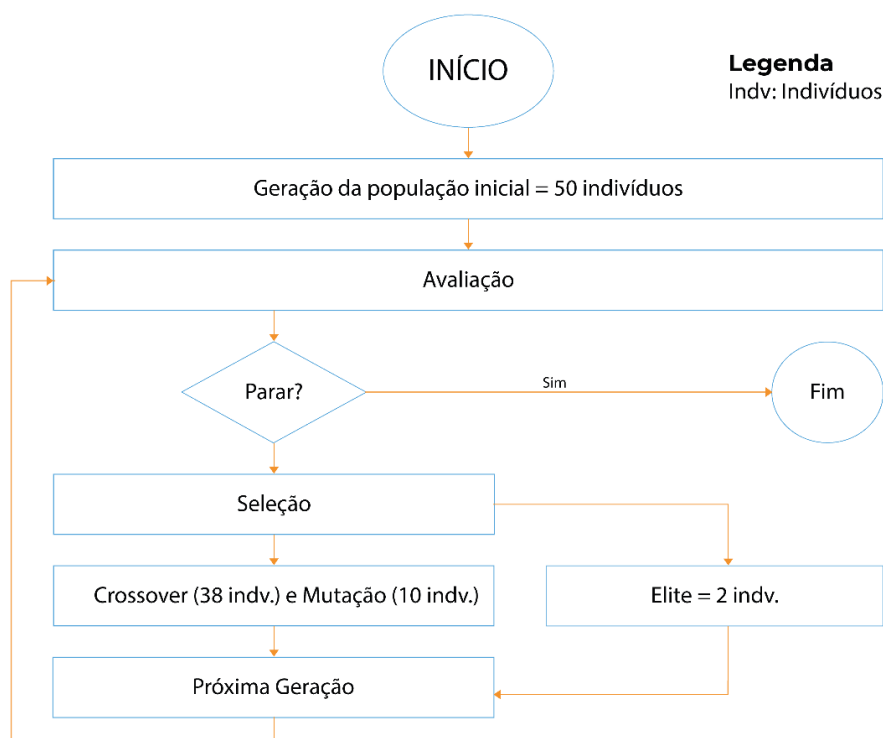
Portanto é seguro dizer que contratar um valor de MUST de 290,11 MW não causará níveis de potência acima do máximo permitido, neste caso, 293 MW considerando a folga de 1%, evitando cortes ou até mesmo ultrapassagens.

3.3 Composição ótima da CGA

Neste trabalho foi simulada uma planta eólica que possui 300 MW de potência instalada e um MUST contratado de 300 MW (não foi descontado a mínima carga própria).

Para otimização da parametrização da CGA, também se utilizou a *toolbox* de algoritmos genéticos do *software* MATLAB. A população inicial foi de 50 indivíduos uma vez que é um problema caracterizado por apenas uma variável de entrada. O processo deste algoritmo é idêntico ao utilizado na otimização da parametrização da CGH. Para este caso, o indivíduo se caracteriza como o número total de painéis fotovoltaicos, sendo que este deve ser discreto já que não existem valores não inteiros de painéis. A Figura 3.22 mostra o fluxograma do algoritmo genético.

Figura 3.22: Fluxograma do algoritmo genético



Fonte: Elaborado pelo autor

Como método de avaliação para interrupção do algoritmo, foram estabelecidos dois critérios: o primeiro foi a parada após um número total de 100 gerações e o segundo foi a convergência da população para um único ponto. O segundo método foi aplicado antes do número máximo de gerações, alcançando 63 ciclos antes de convergir para um valor ótimo como mostra a Figura 3.23.

A potência instalada ideal da usina solar a ser associada a usina eólica existente, de forma que o MUST contratado atualmente não seja modificado e que as restrições de ultrapassagem sejam atendidas apropriadamente é de 13,227 MW. A planta eólica é composta por 100 aerogeradores e a solar por 44090 painéis fotovoltaicos. A potência total instalada da CGA é de 313,227 MW. A Tabela 3.5 sumariza esses dados.

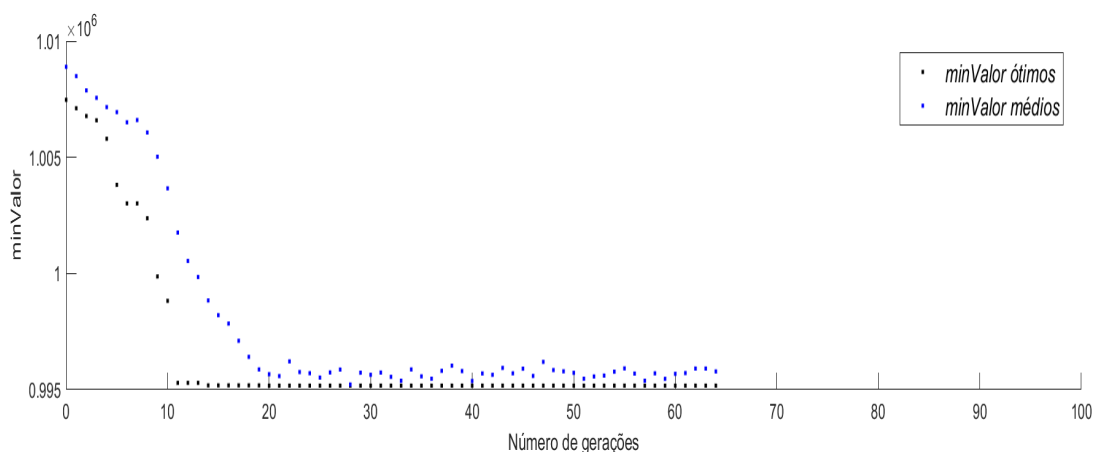
Tabela 3.5: Dados da CGA

Potência Instalada Eólica (MW)	Potência Instalada Solar (MW)	Potência Instalada Total (MW)	Número de Aerogeradores	Número de Painéis
300	13,227	313,227	100	44090

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia total atingiu aproximadamente 502,42 GWh ao longo dos 208 dias, sendo a geração eólica responsável por 96,90% desse valor, detendo 486,83 GWh. Já a solar foi responsável por 3,10%, detendo de 16,59 GWh.

Figura 3.23: Valores da função $\min Valor$ (2.12) avaliados a cada geração



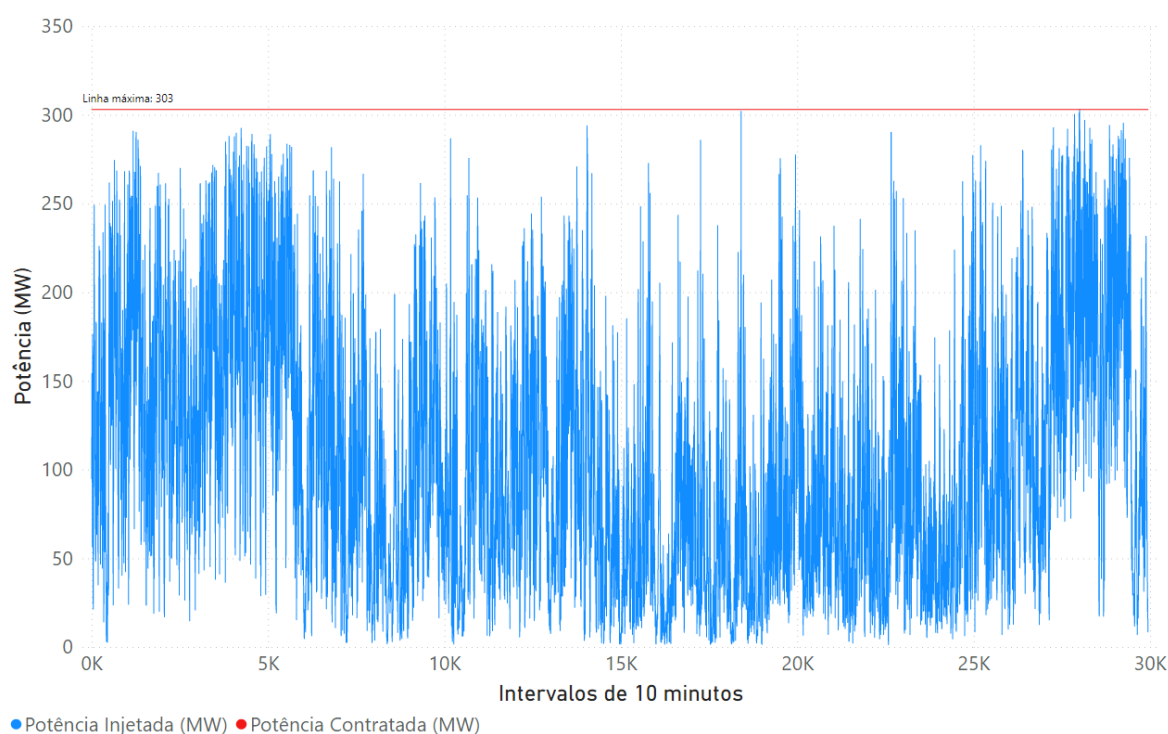
Fonte: Elaborado pelo autor

Dada a natureza não linear da função otimizada é possível perceber no início do processo que o valor ótimo da função muda por algum número de gerações devido aos diversos mínimos locais que não possuem aptidão suficiente para atrair toda população à convergência. Ao longo das gerações, é possível ver um decaimento do valor da função $\min Valor$ que progressivamente se aproxima do valor ótimo, mas mesmo muito próximo deste, é possível ver pequenas variações entre as gerações causadas possivelmente pelo fator de mutação aleatório também presente neste algoritmo e dado a construção matemática do problema é possível ver que pequenas variações na entrada podem causar deslocamentos grandes no valor de aptidão da saída. Mesmo com todas essas considerações e atingindo gerações superiores a 60, este algoritmo ainda convergirá em um valor 44090 painéis fotovoltaicos.

3.3.1 Análise de Ultrapassagem do MUST

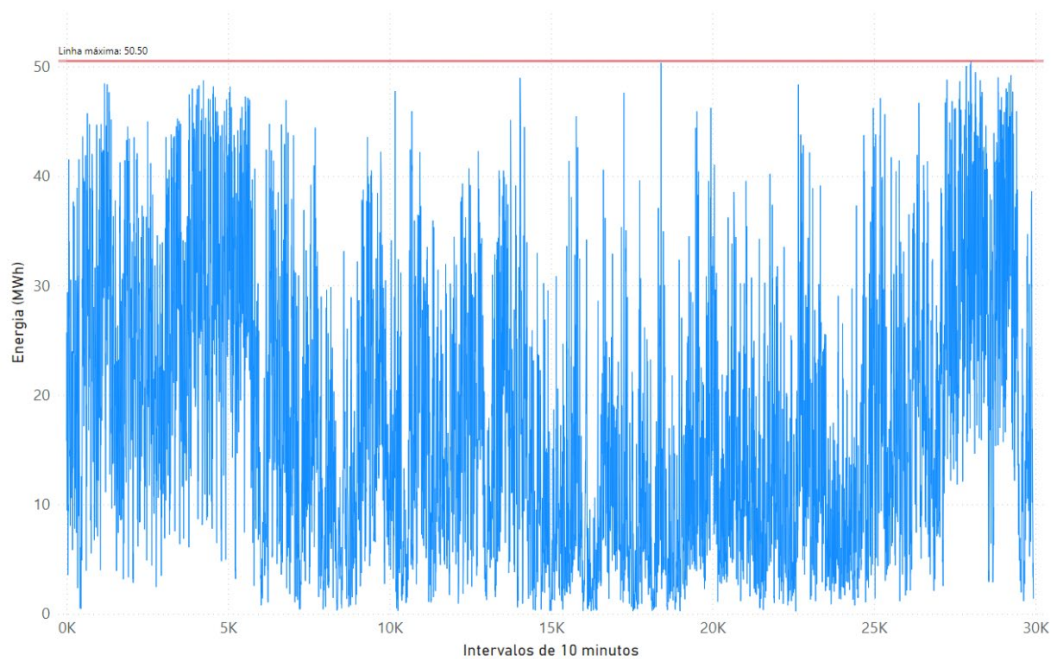
A Figura 3.24 e a Figura 3.25 apresentam a variação de potência injetada no sistema e da energia ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos. Esses gráficos mostram que, embora haja uma variação considerável nessas variáveis, elas chegam muito próximas aos limites contratados, mas não os ultrapassam. Isso indica um uso eficiente de utilização da rede de transmissão, diminuindo a ociosidade da infraestrutura existente.

Figura 3.24: Comparação entre a potência injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos e o limite de potência contratada no ponto de conexão da CGA



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.25: Comparação entre a energia injetada no sistema ao longo dos 29952 intervalos de 10 minutos e o limite de energia no ponto de conexão da CGA



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, é seguro dizer que manter o valor do MUST em 300 MW não causará níveis de geração acima do contrato, evitando cortes ou até mesmo ultrapassagens e atingindo o objetivo proposto.

4 CONCLUSÕES

As Usinas Híbridas são opções de empreendimentos de geração de energia elétrica possíveis em regiões onde a disponibilidade das fontes renováveis apresenta uma característica complementar, aumentando a eficiência da planta e garantindo a sustentabilidade do empreendimento. Estas usinas possuem uma característica de geração mais constante, menos suscetível a intermitência dos recursos primários.

A Resolução Normativa 954/2022 da Agência Nacional de Energia Elétrica criou no Sistema Elétrico Brasileiro as figuras das usinas híbridas e associadas, nas quais as fontes eólica e solar podem ser utilizadas concomitantemente. Além disso, permite que o contrato de transmissão dessas modalidades de usina possa ter um valor entre a potência nominal da fonte predominante e a potência nominal da planta. Este novo arcabouço regulatório permite que alguma flexibilidade possa ser considerada no planejamento dessas novas usinas.

Considerando este novo cenário, este trabalho analisou a complementaridade das fontes eólica e solar na região norte do Maranhão e utilizando esses dados propôs algumas contribuições sobre o hibridismo de plantas de geração. Os dados utilizados nas simulações foram medidos no âmbito do projeto de P&D EOSOLAR, dentro do Programa de P&DI da ANEEL.

A partir disso, este trabalho apresentou metodologias de planejamento da configuração ótima de uma usina híbrida eólico-solar, à luz da nova regulamentação existente no Brasil. Usando dados reais de vento e irradiação solar, foram apresentados dois métodos diferentes de determinação da configuração ótima de uma usina híbrida eólico-solar. O primeiro baseado em um método analítico e o segundo baseado em inteligência artificial. Nos dois casos o objetivo era determinar a configuração que maximizasse o fator de capacidade da planta, consideradas as restrições do problema.

Ainda de acordo com o novo arcabouço regulatório, este trabalho também apresentou uma metodologia de determinação da capacidade ótima solar a ser adicionada a uma planta eólica existente, hibridizando a mesma, de forma que a nova usina associada não necessitasse pedir revisão de seu contrato de uso do sistema de transmissão e que não fossem geradas ultrapassagens que resultassem em multas e desconexão da planta.

No que tange à complementaridade, é possível concluir que a sua predominância ocorre apenas na escala diária. Quanto ao grau, constatou-se que o mesmo foi majoritariamente insignificante ou fraco em todas as escalas avaliadas.

Os resultados também mostraram que a composição ótima da CGH é 95% eólica e 5% solar. Para esta configuração o FC eólico, solar e eólico-solar mensais foram, respectivamente, 32%, 23% e 31%. A ONS em [26], apresenta os resultados do fator de capacidade médio mensal das usinas eólicas e solares brasileiras. As informações podem ser agregadas por tipo de geração, valores, patamar de carga, subsistema, localização, estado ou ponto de conexão. Considerando o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2022 e o subsistema nordeste, o FC eólico médio mensal das usinas é de 47%. Fazendo as mesmas considerações para as usinas solares, constatou-se que o FC médio mensal é de aproximadamente 15%.

Comparando-se o FC eólico da CGH simulada neste trabalho ao das usinas eólicas do subsistema nordeste, verifica-se que o FC eólico mensal ficou 15% abaixo da observada para plantas da região, o que pode ser interpretado como um indicativo de que a região apresenta um potencial menor para implantação de usinas eólicas em relação a outras regiões do país.

Por outro lado, o FC solar mensal ficou 8% acima, o que sugere que a região possui um bom potencial para implantação de usinas solares. Isso pode ser explicado pela alta incidência de radiação solar na região nordeste, o que torna a geração de energia solar uma opção viável para a região.

Ademais, de forma a otimizar os contratos de uso da rede, poder-se-ia contratar um valor de MUST de 290,11 MW (não foi tirada a carga própria) sem grandes riscos de cortes ou até mesmo ultrapassagens.

Em relação a CGA, constatou-se que a potência ideal da usina solar a ser associada com a usina eólica sem que o valor do MUST de 300 MW seja modificado é de 13,227 MW. A sua composição ótima é de 95,77% eólica e de 4,22% solar.

4.1 Trabalhos futuros

Durante a execução das atividades deste trabalho foram observadas novas oportunidades de continuação desta pesquisa relacionadas a:

- Revisão dos dados de geração aplicando modelos de turbina eólica mais apropriados ao regime de ventos do local estudado;
- Caracterização mais acurada da complementaridade eólico-solar da região, visto que existe na literatura outros índices de correlação e críticas a aplicação do Coeficiente de Pearson;
- Avaliação da complementaridade energética sazonal de usinas híbridas localizadas na região com outras plantas conectadas no SIN.

4.2 Publicações

As seguintes publicações foram oriundas das atividades de pesquisa realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho:

- **“Projeto otimizado de uma usina híbrida eólico-solar para maximização da energia produzida”**. Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica 2022, Rio de Janeiro, Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] REN21. Renewables 2016 global status report. Paris: REN21 Secretariat, 2016.
- [2] ANEEL. Sistema de informações de geração. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd kNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5Yz AxNzBIMSIsImMiOiR9> . Acesso em 17 de dezembro de 2022.
- [3] Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.
- [4] IEMA. Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico. São Paulo, novembro de 2016.
- [5] EPE. Estudos de planejamento e expansão da geração – avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas. 2017.
- [6] Hansen, A.D.; Das, K.; Sørensen, P.; Singh, P.; Gavrilovic, A. European and Indian Grid Codes for Utility Scale Hybrid Power Plants. *Energies* 2021, 14, 4335. <https://doi.org/10.3390/en1414433>.
- [7] WindEurope, 2019. Renewable hybrid power plants - exploring the benefits and market opportunities. Tech. Rep. 22.
- [8] Ministério de Minas e Energia. Resolução normativa ANEEL n° 954. 30 de novembro de 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-954-de-30-de-novembro-de-2021-364715864>.
- [9] Resolução normativa ANEEL n° 666. 23 de junho de 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015666.pdf>.
- [10] EPE. Estudos de planejamento e expansão da geração – avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas. 2017.
- [11] José Alexandre Ferraz de Andrade Santos, Pieter de Jong, Caiuby Alves da Costa, Ednildo Andrade Torres, Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil, *Utilities Policy*, Volume 67, 2020, 101084, ISSN 0957-1787, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101084>.
- [12] António Couto, Ana Estanqueiro. Assessment of wind and solar PV local complementarity for the hybridization of the wind power plants installed in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, volume 319, 2021, 128728, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128728>.
- [13] Rafael Peña Gallardo, Aurelio Medina Ríos, Juan Segundo Ramírez, Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico, *Journal of Cleaner*

Production, Volume 268, 2020, 122323, ISSN 0959-6526,
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122323>.

[14] Franciele Weschenfelder, Gustavo de Novaes Pires Leite, Alexandre Carlos Araújo da Costa, Olga de Castro Vilela, Claudio Moises Ribeiro, Alvaro Antonio Villa Ochoa, Alex Maurício Araújo, A review on the complementarity between grid-connected solar and wind power systems, Journal of Cleaner Production, Volume 257, 2020, 120617, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120617>.

[15] Cindy Viviescas, Lucas Lima, Fabio A. Diuana, Eveline Vasquez, Camila Ludovique, Gabriela N. Silva, Vanessa Huback, Leticia Magalar, Alexandre Szklo, André F.P. Lucena, Roberto Schaeffer, Juan Roberto Paredes, Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 113, 2019, 109232, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.039>.

[16] Frederico A. During Filho, Alexandre Beluco. Simulating hybrid energy systems based on complementary renewable resources, MethodsX, Volume 6, 2019, Pages 2492-2498, ISSN 2215-0161, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.10.017>.

[17] Couto, A.; Estanqueiro, A. Exploring Wind and Solar PV Generation Complementarity to Meet Electricity Demand. Energies 2020, 13, 4132.
<https://doi.org/10.3390/en13164132>.

[18] Mohammed Guezgouz, Jakub Jurasz, Mohamed Chouai, Hannah Bloomfield, Benaissa Bekkouche. Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria, Energy Conversion and Management, Volume 238, 2021, 114170, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114170>.

[19] Rafael Antunes Campos, Lucas Rafael do Nascimento, Ricardo Rüther, The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants, Energy Conversion and Management, Volume 221, 2020, 113160, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113160>.

[20] Slusarewicz, J.H., Cohan, D.S. Assessing solar and wind complementarity in Texas. Renewables 5, 7 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40807-018-0054-3>.

[21] Schober, Patrick MD, PhD, MMedStat; Boer, Christa PhD, MSc; Schwarte, Lothar A. MD, PhD, MBA Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation, Anesthesia & Analgesia: May 2018 - Volume 126 - Issue 5 - p 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>.

[22] ENERCON Product Overview. Disponível em: <https://docs.wind-watch.org/Enercon.pdf>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

[23] Canadian Solar CS3K-300P. Disponível em: https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2020/05/Canadian_Solar-Datasheet-KuPower_CS3K-P_EN.pdf. Acesso em: 22 de dezembro de 2022.

[24] VILLALVA, Marcelo Gradella. Energia Solar Fotovoltaica: conceito e aplicações. 1 edição. São Paulo: Érica, 2012.

[25] ONS. Submódulo 15.7: Apuração dos montantes de uso do sistema de transmissão. 2017.

[26] Dados de geração eólica e solar. ONS.

<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>. Acesso em 02 de janeiro de 2023.