

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração

Paulo Marcos Penna de Sena Orsini

**INTEGRAÇÃO E COMPLEMENTARIDADE DE FONTES DE ENERGIA SOLAR E
EÓLICA EM CONFIGURAÇÕES HÍBRIDAS: UM ESTUDO DE CASO**

Belo Horizonte

2024

Paulo Marcos Penna de Sena Orsini

**INTEGRAÇÃO E COMPLEMENTARIDADE DE FONTES DE ENERGIA SOLAR E
EÓLICA EM CONFIGURAÇÕES HÍBRIDAS: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Martins Neto

Belo Horizonte

2024

O76i

Orsini, Paulo Marcos Penna de Sena.

Integração e complementaridade de fontes de energia solar e eólica em configurações híbridas [recurso eletrônico] : um estudo de caso / Paulo Marcos Penna de Sena Orsini. - 2024.

1 recurso online (72 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: José Henrique Martins Neto.

"Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Fontes renováveis: geração, operação e integração da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais."

Bibliografia: f. 70-72.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. 4. Estudos de viabilidade. 5. Estudos de caso. I. Martins Neto, José Henrique. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos nove dias do mês de agosto de 2024, às 9h, o estudante Paulo Marcos Penna de Sena Orsini, matrícula 2022689385, defendeu o Trabalho intitulado "**Integração e Complementaridade de Fontes de Energia Solar e Eólica em Configurações Híbridas: Um Estudo de Caso**" tendo obtido a média 95 (noventa e cinco).

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 95 (noventa e cinco)

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Martins Neto

Nota: 95 (noventa e cinco)

Examinador: Prof. Dr. Victor Flores Mendes



Documento assinado eletronicamente por **José Henrique Martins Neto, Usuário Externo**, em 03/09/2024, às 07:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Victor Flores Mendes, Professor do Magistério Superior**, em 04/09/2024, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3448567** e o código CRC **F50A3D22**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

AGRADECIMENTOS

A Adriana, minha esposa, pela identificação deste curso de especialização na UFMG e por toda a motivação transmitida desde o início, tendo sido grande incentivadora de minha decisão de retorno à sala de aulas, após quatro décadas de minha formatura, o que foi uma excelente oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

A meu filho e filhas, Vinícius, Mariana, Erika e Paula, por todo o apoio e interesse demonstrados durante o período do curso. Foi muito bom perceber a reação de vocês quando falamos de minha decisão de voltar a estudar.

A minha mãe, Gelta, por sua contínua demonstração de interesse e apoio durante o andamento do curso, tema sempre presente em nossas conversas desde 2022.

A todos os professores, por sua dedicação e compartilhamento de conhecimentos que contribuíram de forma significativa para meu aprendizado durante o curso. Em especial a meu orientador, Professor José Henrique, por sua disponibilidade e ensinamentos e ao Professor Victor, por sua constante motivação e perseverança quanto à necessidade de continuar com a formação de mais profissionais especializados na área e de manter um alto nível de qualidade deste curso de especialização.

Aos colegas de turma e a Fátima que muito contribuíram para tornar nossa caminhada ainda mais rica e prazerosa.

E a todos os demais que, de alguma forma, contribuíram!

RESUMO

Este trabalho contemplou uma avaliação da viabilidade técnica e econômica da utilização de diferentes tecnologias em configurações híbridas de sistemas de geração de energia elétrica. Foram analisados os resultados de simulações computacionais executadas no software SAM (System Advisor Model) do NREL (Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos), referentes a configurações híbridas sem armazenamento de energia e utilizando recursos solares e eólicos, cuja complementaridade está presente no local das simulações. Esta complementaridade dos recursos solares e eólicos foi também objeto de análise. Foram simuladas configurações Fotovoltaicas (FV), Heliotérmicas com calhas parabólicas (CSP/PTC), Heliotérmicas com torre central e heliostatos (CT) e Eólicas (EO) com turbinas de eixo horizontal. Pelos resultados obtidos foi possível observar que as configurações híbridas apresentaram curvas de potência muito mais lineares do que as com um único tipo de tecnologia, semelhante ao que se obtém quando se utiliza armazenamento de energia, térmico ou em baterias. As configurações com predominância de geração eólica se destacaram pelo maior volume de energia gerada, maior fator de capacidade, maior eficiência global, maior VPL e menor LCOE em relação às demais. O benefício da complementaridade de recursos meteorológicos foi mais significativo nas configurações com predominância de recursos solares. Do ponto de vista econômico e de desempenho, dentre as configurações que utilizam recursos solares a que melhor se integrou com a eólica foi a fotovoltaica.

Palavras-chave: transição energética; complementaridade; energia solar; energia eólica.

ABSTRACT

This paper included an evaluation of the technical and economic feasibility of using different technologies in hybrid configurations of electric power generation systems. The results of computer simulations performed in the SAM (System Advisor Model) software of NREL (National Renewable Energy Laboratory of the United States) were analyzed, referring to hybrid configurations without energy storage and using solar and wind resources, whose complementarity is present at the site of the simulations. This complementarity of solar and wind resources was also analyzed. Photovoltaic (PV), Heliothermal with parabolic troughs (CSP/PTC), Heliothermal with central tower and heliostats (CT) and Wind (EO) with horizontal axis turbines were simulated. From the results obtained, it was possible to observe that hybrid configurations presented much more linear power curves than those with a single type of technology, similar to what is obtained when using energy storage, thermal or battery. The configurations with a predominance of wind generation stood out for the greater volume of energy generated, higher capacity factor, higher overall efficiency, higher NPV and lower LCOE in relation to the others. The benefit of the complementarity of meteorological resources was more significant in the configurations with predominance of solar resources. From an economic and performance point of view, among the configurations that use solar resources, the one that best integrated with wind power was photovoltaic.

Key words: energy transition; complementarity; solar energy; wind energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

FIGURAS

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira	12
Figura 2 – Geração de Eletricidade e Capacidade.....	14
Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira	15
Figura 4 - Fontes Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira.....	15
Figura 5 - Evolução da Matriz Elétrica Brasileira.....	16
Figura 6 - Evolução De Fontes Renováveis na Matriz Brasileira	16
Figura 7 - Configuração 1	20
Figura 8 - Configuração 2	20
Figura 9 - Configuração 3	21
Figura 10 - Configuração 4	22
Figura 11 – Local Selecionado – Sul da Califórnia.....	24
Figura 12 – Mapa de Recursos Solares – Sul da Califórnia.....	24
Figura 13 – Mapa de Recursos Eólicos – Sul da Califórnia.....	25
Figura 14 – Perfil Recurso Solar no Sul da Califórnia	25
Figura 15 - Perfil Recurso Eólico no Sul da Califórnia	26
Figura 16 – Irradiância Solar x Estações do Ano.....	26
Figura 17 - Velocidade do Vento x Estações do Ano	27
Figura 18 - Recursos Solar e Eólico - Média Horária Anual	28
Figura 19 - Arranjo Heliostatos.....	36
Figura 20 - Curva De Potência Da Turbina Eólica	41
Figura 21 - Arranjo do Parque Eólico	42
Figura 22 - EEA - Configurações 1 a 4.....	44
Figura 23 - Perfil Mensal de Energia - Configurações 1 a 4.....	45
Figura 24 - Perfil de Potência e Fator de Capacidade - Configurações 1 a 4.....	46
Figura 25 - Perfil Médio Anual Horário de Potência – Configurações 1 a 4.....	47
Figura 26 - Eficiência Global e Densidade Energética Específica - Configurações 1 a 4	48
Figura 27 - Área Campos Solares e Eólico - Configurações 1 a 4.....	49
Figura 28 - Área de Terreno Ocupada - Configurações 1 a 4	49
Figura 29 - LCOE e CAPEX - Configurações 1 a 4	50
Figura 30 - VPL - Configurações 1 a 4.....	50
Figura 31 - EEA - Configurações 5 a 8.....	52
Figura 32 - Perfil Mensal de Energia - Configurações 5 a 8.....	52
Figura 33 - Perfil de Potência e Fator de Capacidade - Configurações 5 a 8.....	53
Figura 34 - Perfil Médio Anual Horário – Configurações 5 a 8.....	54
Figura 35 - Eficiência Global e Densidade Energética Específica - Configurações 5 a 8	55

Figura 36 - Área Campos Solares e Eólico - Configurações 5 a 8.....	56
Figura 37 - Área de Terreno Ocupada - Configurações 5 a 8	56
Figura 38 - LCOE e CAPEX - Configurações 5 a 8	57
Figura 39 - VPL - Configurações 5 A 8.....	57
Figura 40 - Comparativo EEA	58
Figura 41 - Comparativo Potência Mensal e Fator de Capacidade	59
Figura 42 - Velocidade Média dos Ventos.....	59
Figura 43 - Comparativo CAPEX e LCOE.....	60
Figura 44 - Comparativo Áreas Recursos Meteorológicos	61
Figura 45 - Comparativo Áreas de Terreno Ocupadas.....	61
Figura 46 - Comparativo VPL.....	62
Figura 47 - Comparativo Eficiência Global	62
Figura 48 - Comparativo entre Principais Resultados.....	63
Figura 49 - Potência Média Anual Horária	64
Figura 50 – Complementaridade Configuração 7	65
Figura 51 - Complementaridade Configuração 8.....	66
Figura 52 - Integração Solar + Eólica	66

TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Entrada Configuração 1.....	29
Tabela 2 - Parâmetros de Entrada Configuração 2.....	30
Tabela 3 - Parâmetros de Entrada Configuração 3.....	30
Tabela 4 - Parâmetros de Entrada Configuração 4.....	30
Tabela 5 - Parâmetros para Cálculo da Eficiência Global.....	32
Tabela 6 - Análise Paramétrica Configuração 1.....	34
Tabela 7 - Análise Paramétrica Configuração 2.....	35
Tabela 8 – Análise Paramétrica Configuração 3.....	37
Tabela 9 – Análise Paramétrica 1 Configuração 4.....	38
Tabela 10 – Análise Paramétrica 2 Configuração 4.....	40
Tabela 11 - Resultados das Simulações - Configurações 1 a 4.....	44
Tabela 12 - Resultados das Simulações - Configurações 5 a 8.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CAPEX	Capital Expenditure (Capital investido)
COP	Conference of the Parties (Conferência das Partes)
CSP	Concentrating Solar Power (Usina de Concentração Solar)
CT	Central Tower (Usina de Concentração Solar com Torre Central)
EEA	Energia Elétrica Anual
EO	Eolic (Usina Eólica)
GHI	Global Horizontal Irradiance (Irradiação Global Horizontal)
HCE	Heat Collection Element (Elemento Coletor de Calor)
HTF	Heat Transfer Fluid (Fluido de Transferência de Calor)
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IRENA	Internacional Renewable Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
LCOE	Levelized Cost of Electricity (Custo Nivelado de Energia)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Laboratório Nacional de Energia Renovável)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPEX	Operation Expenditure (Custos operacionais)
PTC	Parabolic Trough Collector (Coletor de Calha Parabólica)
FV	Photovoltaic (Usina Fotovoltaica)
SAM	System Advisor Model
SCA	Solar Collector Assembly (Dispositivo de coleta de radiação solar)
SM	Solar Multiple (Múltiplo Solar)
UN	United Nations (Organização das Nações Unidas)
VPL	Valor Presente Líquido
WEF	World Economic Forum (Fórum Econômico Mundial)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	12
1.1.Objetivos	16
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.METODOLOGIA	23
3.1.Seleção da localização das plantas	23
3.2.Complementaridade de recursos solares e eólicos	25
3.3.Critérios de análise e comparação	28
3.4.Parâmetros e variáveis de entrada	28
3.5.Parâmetros e variáveis de saída.....	31
3.6.Configurações analisadas	33
3.6.1.Configuração 1 => Planta Heliotérmica do tipo (CSP/PTC)	33
3.6.2.Configuração 2 => Planta Heliotérmica do tipo Torre Central (CT)	34
3.6.3.Configuração 3 => Planta Solar Fotovoltaica (FV)	36
3.6.4.Configuração 4 => Planta Eólica (EO)	38
3.6.5.Configuração 5 => Planta Híbrida Heliotérmica do tipo (CSP/PTC) + Eólica (EO).....	42
3.6.6.Configuração 6 => Planta Híbrida Heliotérmica do tipo (CT) + Eólica (EO)	42
3.6.7.Configuração 7 => Planta Híbrida Fotovoltaica (FV) + Eólica (EO)	42
3.6.8.Configuração 8 => Planta Híbrida Fotovoltaica (FV) + Eólica (EO)	43
4.RESULTADOS	44
4.1Configurações com um único tipo de tecnologia	44
4.2.Configurações híbridas.....	51
4.3.Comparação de resultados entre as configurações com um tipo de tecnologia e as híbridas.....	58
4.4.Complementaridade de recursos solares e eólicos nas configurações híbridas.....	63
5.CONCLUSÃO	68
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

A transição energética está defasada em relação aos compromissos assumidos pelos países participantes da COP que ratificou o Acordo de Paris [UN, 2015]. Cada fração de aumento de grau da temperatura ambiente global tem gerado consequências significativas na natureza, sociedade e economia. Para alcançar correção de rumo continuam sendo necessárias medidas criativas e transformadoras.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), espera-se que as energias renováveis desempenhem um papel significativo na geração global de eletricidade.

A eletricidade representa cerca de 20% do consumo final total de energia do mundo e é central para muitos aspectos da vida quotidiana, tornando-se ainda mais importante à medida que se espalha para novas utilizações finais, como veículos elétricos e bombas de calor, por exemplo [IEA, 2022].

O setor elétrico foi responsável por 59% de todo o carvão utilizado globalmente em 2021, juntamente com 34% do gás natural, 4% do petróleo, 52% de todas as energias renováveis e quase 100% da energia nuclear. Também foi responsável por mais de um terço de todas as emissões de CO₂ relacionadas com a energia em 2021 [IEA, 2022].

A matriz elétrica brasileira já é um ótimo exemplo em relação ao percentual de recursos renováveis conforme mostrado na figura 1.



FIGURA 1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

FONTE: ANEEL/ABSOLAR 2024

A capacidade renovável deve atender a 35% da geração global de energia até 2025. Isso inclui fontes como energia solar, eólica e nuclear. O aumento da capacidade de energia renovável ajudará a limitar as emissões de CO₂ do setor energético global [IEA, 2022].

A demanda global de eletricidade deve crescer 3% ao ano nos próximos três anos em comparação com 2022. Mais de 70% desse crescimento deve vir da China, Sudeste Asiático e Índia. As economias avançadas também estão procurando gerar mais eletricidade, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis em setores como aquecimento e transporte [IEA, 2022].

Ressalta-se que o mundo adicionou 50% mais capacidade renovável em 2023 em comparação com o ano anterior [WEF, 2023].

A participação das energias renováveis no mix global de geração deve aumentar de 29% para 35% até 2025 e conseqüentemente a geração a carvão e a gás diminuirá. A China será responsável por quase metade da geração renovável adicional, seguida pela União Europeia [IEA, 2022].

Até 2024, a energia eólica e solar fotovoltaica gerarão juntas mais eletricidade do que a energia hidrelétrica, sendo que tanto a energia eólica quanto a energia solar fotovoltaica superarão a geração de eletricidade nuclear em 2025 e 2026, respectivamente [IEA, 2022].

Adicionalmente em 2025, as energias renováveis deverão superar o carvão e se tornarão a maior fonte de geração de eletricidade [IEA, 2022].

Governos e líderes empresariais em todo o mundo estão se concentrando na segurança energética. Acelerar o investimento em energias renováveis, construir resiliência e abordar a acessibilidade e a sustentabilidade são prioridades fundamentais para as estratégias energéticas.

Embora o investimento global em todas as tecnologias de transição energética tenha atingido um máximo recorde de 1,3 bilhões de dólares em 2022, o investimento anual precisa mais do que quadruplicar para permanecer na trajetória dos 1,5°C de aumento de temperatura. O período que se seguirá à COP28 será fundamental para os esforços destinados a conter as alterações climáticas e a alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável delineados na Agenda 2030 [IRENA, 2023].

A definição simultânea e proativa de estruturas físicas, políticas e institucionais será essencial para concretizar os objetivos de desenvolvimento e climáticos rumo a um mundo mais

resiliente e equitativo. Estas bases deverão constituir os pilares da estrutura que suportará a transição energética e, portanto, devem incluir planejamento, modernização e expansão de infraestruturas de apoio em terra e no mar para facilitar o desenvolvimento, armazenamento, distribuição, transmissão e consumo de energias renováveis, concepção de políticas e regulamentações que facilitem a implantação, integração e comércio de energia baseada em fontes renováveis além da capacitação de instituições, comunidades e indivíduos para adquirir as competências e conhecimentos necessários para impulsionar e sustentar a transição energética [IRENA, 2023].

A expectativa de adição de capacidade renovável, a nível global, por tecnologia e tanto para o cenário atual quanto para o de 1.5°C de aumento da temperatura global está apresentada na figura 2.

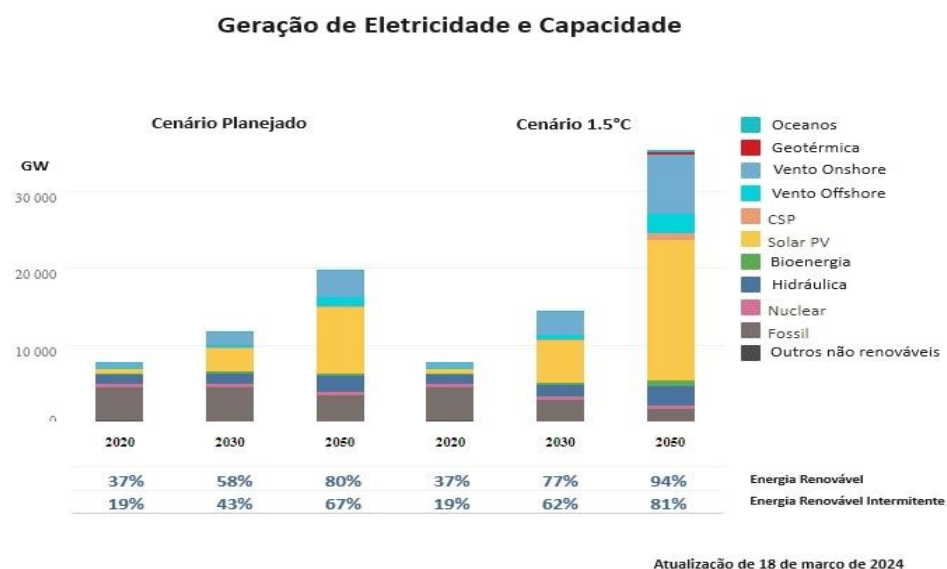


FIGURA 2 – GERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CAPACIDADE

FONTE: IRENA

Observa-se na figura 2 o destaque e a relevância das gerações solar fotovoltaica e eólica dentre as diversas tecnologias baseadas em fontes renováveis, o que justifica especial atenção ao estudo de possibilidades e soluções baseadas nestas tecnologias.

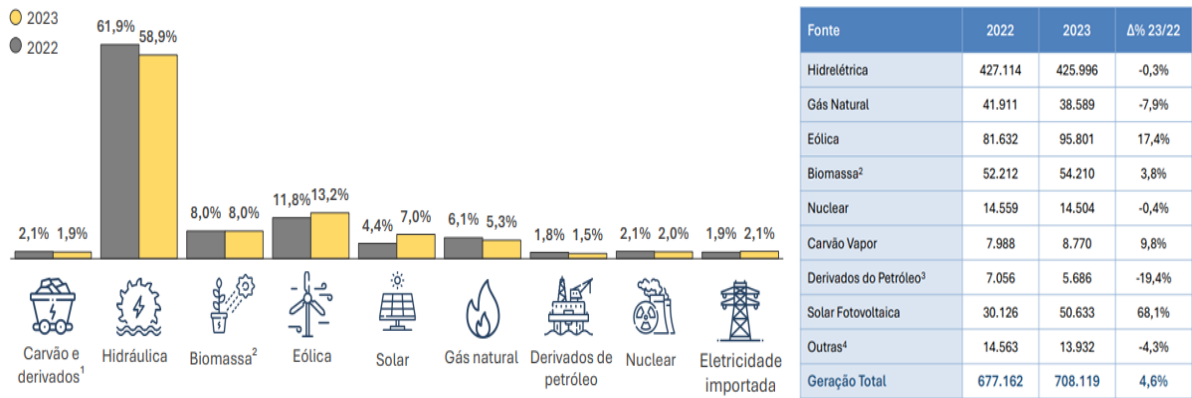


FIGURA 3 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

FONTE: EPE

A matriz elétrica brasileira em 2023 apresentou mudanças em função da estabilidade do regime hídrico associada ao aumento da geração eólica e solar, conforme apresentado na figura 3 [EPE, 2024].

As variações de 2022 para 2023 estão indicadas na mesma figura, com destaque relevante para o crescimento das parcelas eólica e solar fotovoltaica.

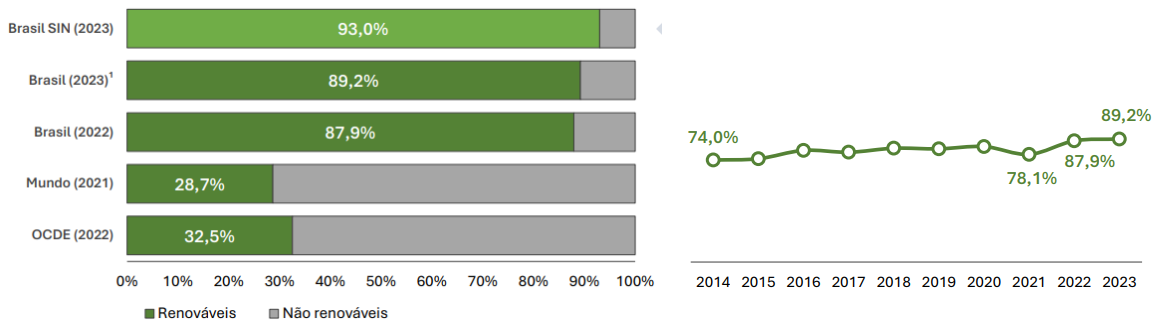


FIGURA 4 - FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

FONTE: EPE

A participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira (incluindo todo o Sistema Interligado Nacional (SIN), os Sistemas Isolados e a Autoprodução não-injetada na rede) atingiu 89,2% de renovabilidade em 2023 [EPE, 2024].

No cálculo da renovabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) não estão incluídos os Sistemas Isolados, a Importação de Eletricidade, a Autoprodução não injetada na rede e a MMGD [EPE, 2024].

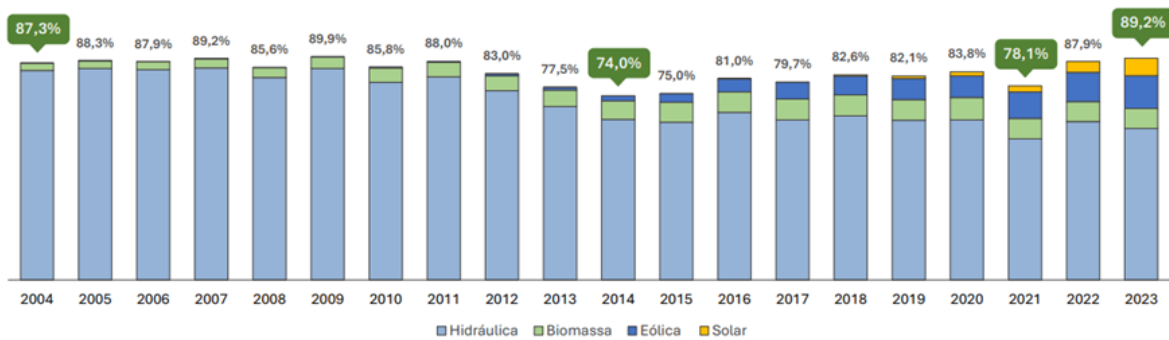


FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

FONTES: EPE

Ao longo dos últimos 20 anos, a participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira se manteve acima de 70%, patamar considerado elevado em relação aos valores mundiais [EPE, 2024].

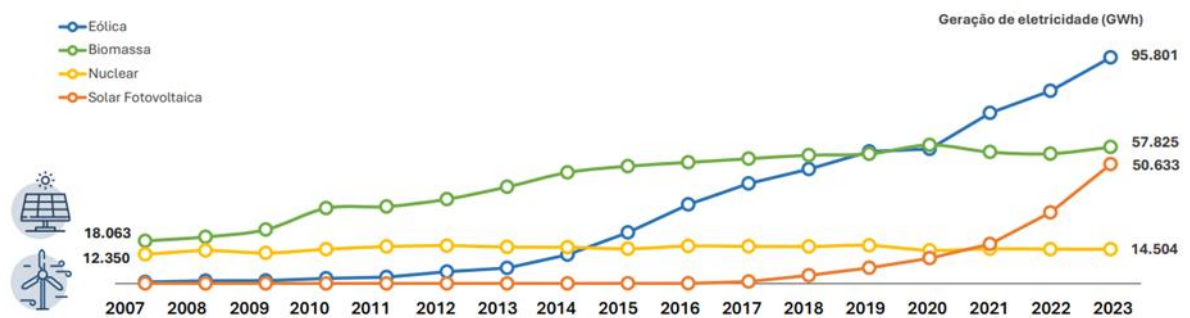


FIGURA 6 - EVOLUÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ BRASILEIRA

FONTES: EPE

Em 2023, a geração eólica sofreu aumento de cerca de 14 TWh, enquanto a geração solar fotovoltaica apresentou crescimento de mais de 20 TWh [EPE, 2024].

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi dimensionar e analisar a viabilidade técnica e econômica de arranjos de plantas de geração de energia elétrica do tipo solar e eólica, considerando um regime de operação diário que contribua para uma maior despachabilidade e confiabilidade.

A integração da tecnologia solar nas configurações “CSP” (Concentrating Solar Power) ou “CT” (Central Tower) ou “FV” (Fotovoltaica) e Eólica (EO) é uma abordagem atraente a ser investigada como forma de otimização da utilização da energia renovável, neste contexto.

Foi também avaliado o impacto da utilização da complementaridade entre recursos solares e eólicos em um mesmo local, em configurações híbridas, de forma a manter o regime diário de geração de energia elétrica, sem necessidade de armazenamento de energia térmica ou armazenamento de energia elétrica em baterias.

1.1.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram apresentar e analisar os seguintes parâmetros e variáveis técnicas e econômicas dos diferentes arranjos das plantas:

- a) Área dos campos solares ou eólicos e áreas de terreno requeridas;
- b) Eficiência global;
- c) Energia Elétrica Anual Gerada (EEA);
- d) Fator de Capacidade;
- e) Custo nivelado de produção da energia elétrica - “LCOE”;
- f) Investimento Inicial - “CAPEX”;
- g) Valor Presente Líquido - “VPL”;
- h) Perfil das curvas de potência;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia solar tem o potencial de fornecer a maior parte da eletricidade necessária para a humanidade de forma sustentável [SUMAYLI, 2023] o que é importante considerando que cada fração de grau na mudança da temperatura global pode gerar consequências significativas na natureza, na sociedade humana e nas economias [IRENA, 2023].

No passado, as tecnologias CSP e FV eram vistas como tecnologias concorrentes, entretanto, apesar das reduções nos custos de geração de eletricidade das usinas CSP, a geração de energia via tecnologia solar fotovoltaica (FV) é significativamente mais barata durante as horas de disponibilidade de irradiância solar [GEDEL, 2022].

A geração termo solar concentrada (CSP) é uma tecnologia promissora para gerar eletricidade devido ao armazenamento de energia ser por via térmica podendo armazenar o calor excedente proveniente do campo solar para posterior transformação em energia elétrica quando houver demanda de energia [ABDUL, 2023].

A geração termo solar concentrada baseada em torre central (CT) é a terceira forma de utilização de recursos solares para geração de energia elétrica. A eficiência do campo solar constituído por heliostatos das plantas do tipo CT é fundamental para o desempenho destas plantas, mas pode cair bastante com o aumento da capacidade de geração [XIAO, 2022].

A geração eólica compartilha da mesma natureza estocástica da geração solar e sua variabilidade traz as mesmas consequências já mencionadas. Devido a esta natureza estocástica pode haver falta de sincronismo entre geração e carga [FERRAZ, 2020].

A intermitência das fontes renováveis pode ser tratada com diferentes soluções e tecnologias. O armazenamento, térmico ou em baterias, é uma das alternativas que vem sendo bastante utilizada recentemente. A complementaridade entre os recursos solares e eólicos em uma mesma região é outra forma de se abordar este aspecto. A hibridização de geração solar e eólica é considerada como uma das alternativas mais promissoras e economicamente vantajosas dentre as soluções disponíveis [FERRAZ, 2020].

A principal dificuldade não é a quantidade de recursos eólicos e solares disponíveis, mas sim a integração adequada destas fontes de energia entre si e na rede elétrica [DE JONG, 2017].

Um dos pontos chave no dimensionamento da configuração híbrida é a relação entre a parcela solar e a parcela eólica de forma a se obter uma operação otimizada e com melhor performance [FERRAZ, 2020].

Uma análise crítica da literatura disponível indica que os sistemas híbridos atenuam significativamente os problemas de intermitência energética, melhoram a estabilidade da rede e podem ser mais rentáveis devido à infraestrutura partilhada [HASSAN, 2023].

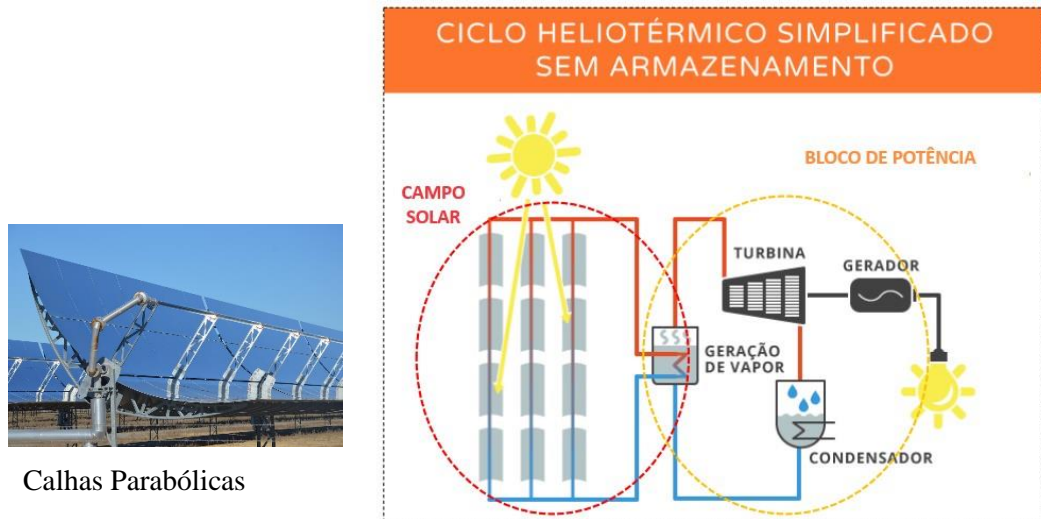
Previsões precisas, tanto dos recursos solares e eólicos quanto da performance das configurações híbridas, são cruciais para extrair esses benefícios e promover uma integração ideal destas formas de geração nos sistemas energéticos e nos mercados de eletricidade [COUTO, 2023].

O foco deste trabalho foi analisar diferentes configurações de sistemas constituídos pela combinação de plantas solares e eólicas.

Foram analisadas configurações baseadas nas seguintes tecnologias:

a) Heliotérmica do tipo Calhas Parabólicas (CSP/PTC);

Um sistema de calha parabólica é um tipo de sistema de energia solar concentrada (CSP) que coleta radiação solar normal direta e a converte em energia térmica para gerar eletricidade. Os componentes de um sistema de calha parabólica são o campo solar, o bloco de energia e, em alguns casos, o armazenamento de energia térmica (não utilizado no caso deste trabalho). O campo solar coleta calor do sol através de coletores solares parabólicos em forma de calha que concentram a radiação solar normal direta em receptores tubulares. Cada conjunto coletor é composto por espelhos e uma estrutura que suporta os espelhos e receptores, permite rastrear o sol em um eixo e pode suportar forças induzidas pelo vento. Cada receptor consiste em um tubo de metal com uma superfície absorvente de radiação solar no vácuo dentro de um tubo de vidro revestido. Um fluido de transferência de calor (HTF) transporta calor do campo solar para o bloco de energia e outros componentes do sistema. O bloco de energia é baseado na tecnologia convencional de ciclo de energia, usando uma turbina para converter energia térmica do campo solar em energia elétrica.



Calhas Parabólicas

FIGURA 7 - CONFIGURAÇÃO 1

FONTE: AULAS UFMG PROF. JOSÉ HENRIQUE NETO

b) Heliotérmica do tipo Torre Central (CT);

Um sistema de torre central (também chamado de sistema receptor central) é um tipo de sistema de energia solar concentrada que consiste em um campo de heliostatos, torre e receptor, bloco de energia e em alguns casos o armazenamento de energia térmica (não utilizado no caso deste trabalho). O campo de espelhos planos de rastreamento solar, chamados heliostatos, concentra a radiação solar normal direta em um receptor no topo da torre, onde um fluido de transferência de calor é aquecido e bombeado para o bloco de energia. O bloco de energia gera vapor que aciona uma turbina a vapor convencional e um gerador para converter a energia térmica em eletricidade.

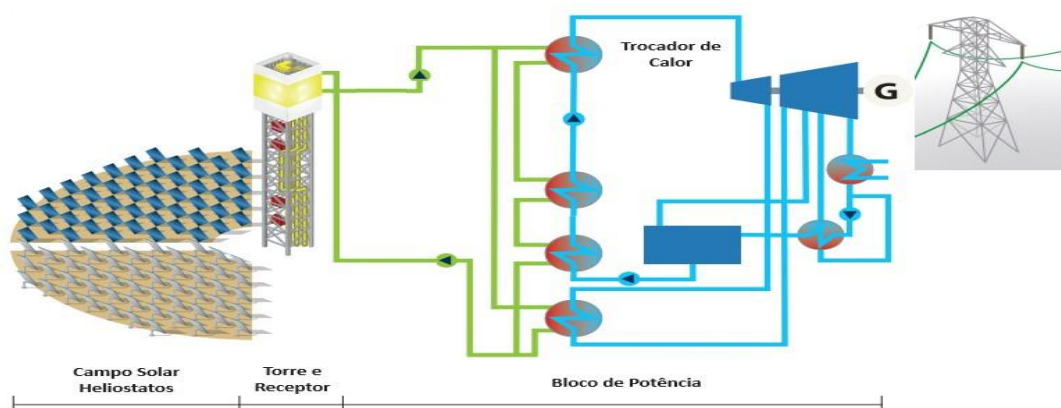


FIGURA 8 - CONFIGURAÇÃO 2

FONTE: SAM

c) Solar Fotovoltaica (FV);

Um sistema fotovoltaico converte a radiação do sol, na forma de luz, em eletricidade utilizável. É composto por painéis solares para absorver e converter a luz solar em eletricidade, inversores para converter a saída de corrente contínua dos painéis em corrente alternada, cabeamento e outros acessórios elétricos. Muitos sistemas fotovoltaicos usam sistemas de rastreamento que seguem o caminho diário do sol no céu para gerar mais eletricidade do que os sistemas montados em painéis fixos.

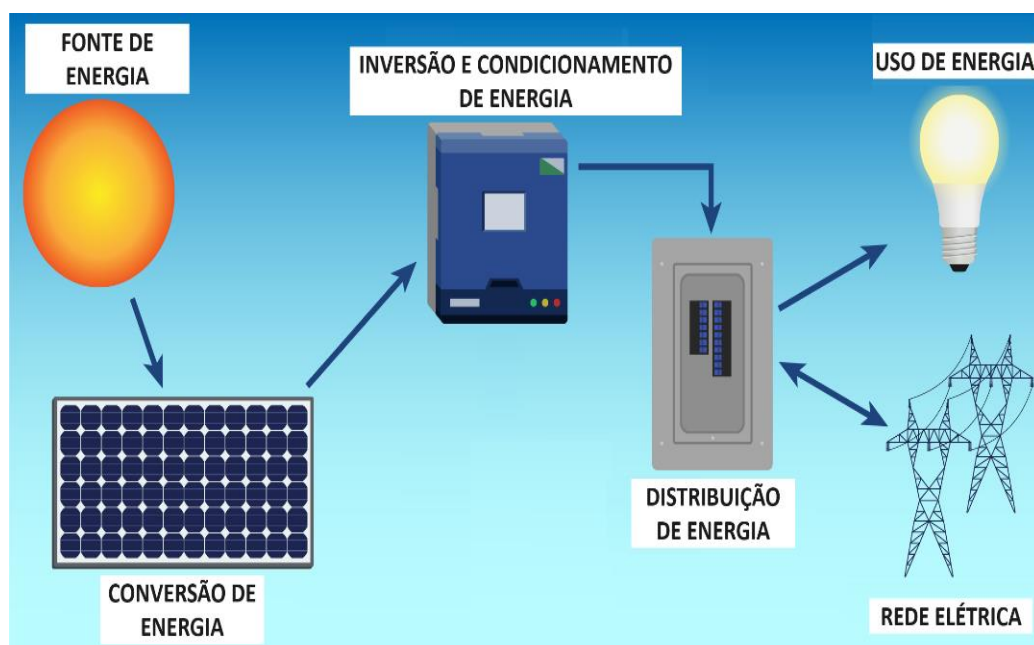


FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO 3

FONTE: [HTTPS://WWW.1VISIONSOLAR.CO.UK/WHAT-SOLAR-PV](https://www.1visionsolar.co.uk/what-solar-pv)

d) Eólica (EO);

Um sistema eólico faz uso da energia do vento para gerar eletricidade. Esta tecnologia depende de turbinas eólicas que convertem a força aerodinâmica do vento em movimento rotacional, acionando um gerador para produzir eletricidade. As turbinas eólicas são frequentemente agrupadas em parques eólicos. A energia eólica é considerada uma fonte de energia sustentável e renovável com um dos menores custos por unidade de energia produzida. As regiões com latitudes mais altas do norte e do sul

têm o maior potencial de energia eólica. A combinação de energia eólica e solar é adequada em muitos locais para equilibrar a produção de energia elétrica.

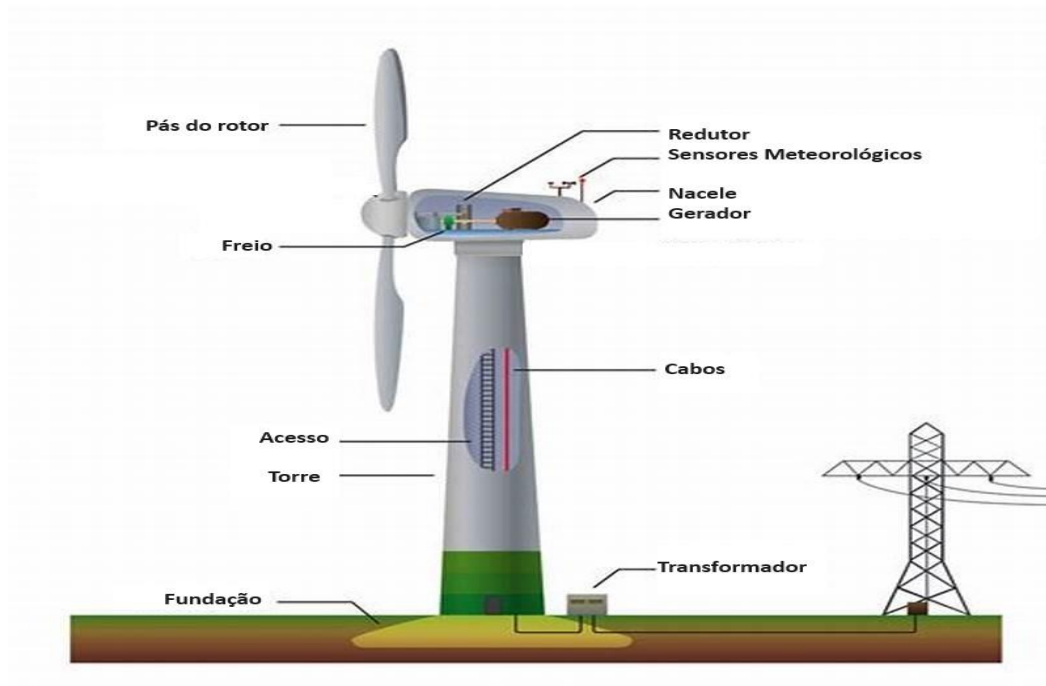


FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO 4

FONTE: EEPWERSCHOOL.COM

3. METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais utilizando o software SAM (System Advisor Model), desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), nos Estados Unidos.

O SAM faz previsões de desempenho e estimativas de custo para projetos de energia conectados à rede com base nos custos de instalação e operação e nos parâmetros de projeto do sistema especificados como entradas para o modelo. Utiliza modelos computacionais desenvolvidos no NREL, no Sandia National Laboratories, na Universidade de Wisconsin e em outras organizações e requer um arquivo meteorológico descrevendo o recurso de energia renovável e as condições climáticas do local do projeto.

O SAM inclui vários bancos de dados de desempenho e coeficientes para componentes do sistema, como módulos e inversores fotovoltaicos, baterias, receptores e coletores de calha parabólica, turbinas eólicas ou bioenergia. Os modelos de desempenho do SAM, disponíveis para as várias tecnologias consagradas e utilizadas atualmente para geração de potência elétrica por meio de fontes renováveis, fazem cálculos hora a hora da produção elétrica de um sistema de energia, gerando um conjunto de 8.760 valores horários que representam a produção de eletricidade do sistema em um único ano.

Interfaces gráficas são disponibilizadas tanto para a entrada de parâmetros e variáveis técnicas e financeiras quanto para os parâmetros e variáveis de saída nas formas tabular e gráfica, o que possibilita análises detalhadas dos resultados.

Todos os custos apresentados neste trabalho foram extraídos da base de dados do NREL e SAM e são valores vigentes no local das simulações, com base em aplicações reais.

Visando uma análise mais completa e também dar suporte à configuração das soluções híbridas, foram simuladas inicialmente configurações que utilizam apenas uma das tecnologias citadas. O resultado destas simulações iniciais deu subsídios a algumas comparações e análises adicionais referentes às configurações híbridas, as quais estão relacionadas neste documento.

3.1. Seleção da localização das plantas

Foi selecionado o sul do estado da Califórnia, nos Estados Unidos, como o local para simulação das plantas.

Geograficamente, o sul da Califórnia está localizado a aproximadamente $34^{\circ}00'$ N de latitude e $117^{\circ}00'$ O de longitude. A figura 11 mostra sua fronteira leste com Arizona e Nevada, e sua fronteira sul faz parte da fronteira México-Estados Unidos. O Deserto de Mojave (Latitude: $33,77$ N; Longitude: $-116,34$ O) faz parte desta região.



FIGURA 11 – LOCAL SELECIONADO – SUL DA CALIFÓRNIA

FONTE: [HTTPS://PT.DREAMSTIME.COM](https://pt.dreamstime.com)

A justificativa para a seleção deste local, e não de um local no Brasil, deve-se ao fato dos Estados Unidos, ao contrário do Brasil, possuir várias plantas comerciais instaladas de todos os tipos aqui analisados, disponibilizando parâmetros econômicos mais confiáveis.

Além disso, o SAM utiliza um formato específico para o arquivo de dados de simulação de sistemas eólicos, formato este ainda não disponível para cidades localizadas no Brasil.

As figuras 12 e 13 indicam o local selecionado para as simulações e seus respectivos recursos solar e eólico.

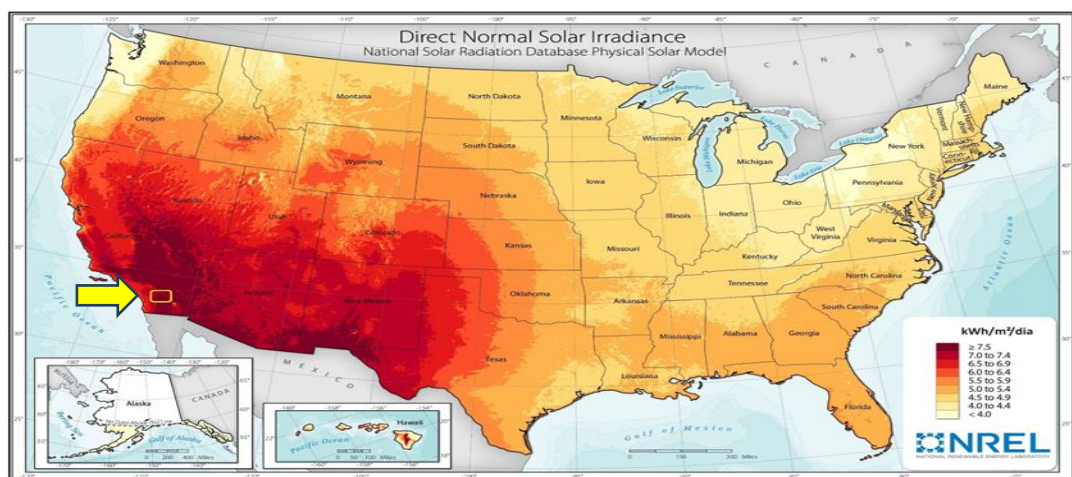


FIGURA 12 – MAPA DE RECURSOS SOLARES – SUL DA CALIFÓRNIA

FONTE: NREL

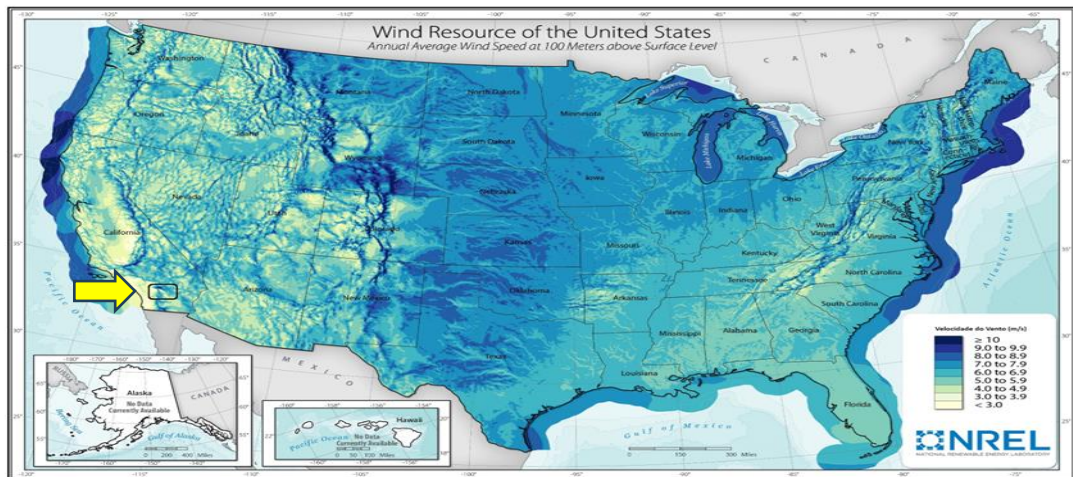


FIGURA 13 – MAPA DE RECURSOS EÓLICOS – SUL DA CALIFÓRNIA

FONTE: NREL

O local escolhido conta com boa qualidade tanto para os recursos solares quanto para os recursos eólicos como pode ser observado nos mapas das figuras 12 e 13.

3.2. Complementaridade de recursos solares e eólicos

A existência de complementaridade de recursos solares e eólicos no local das plantas de geração foi uma das premissas deste trabalho. As figuras 14 e 15 mostram os respectivos perfis no local escolhido para simulação das plantas.

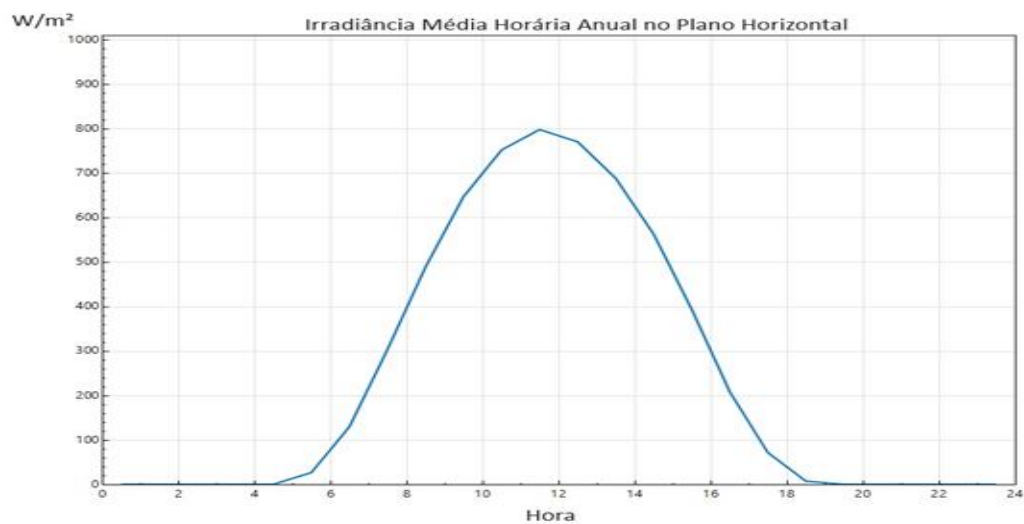


FIGURA 14 – PERFIL RECURSO SOLAR NO SUL DA CALIFÓRNIA

FONTE DE DADOS: SAM

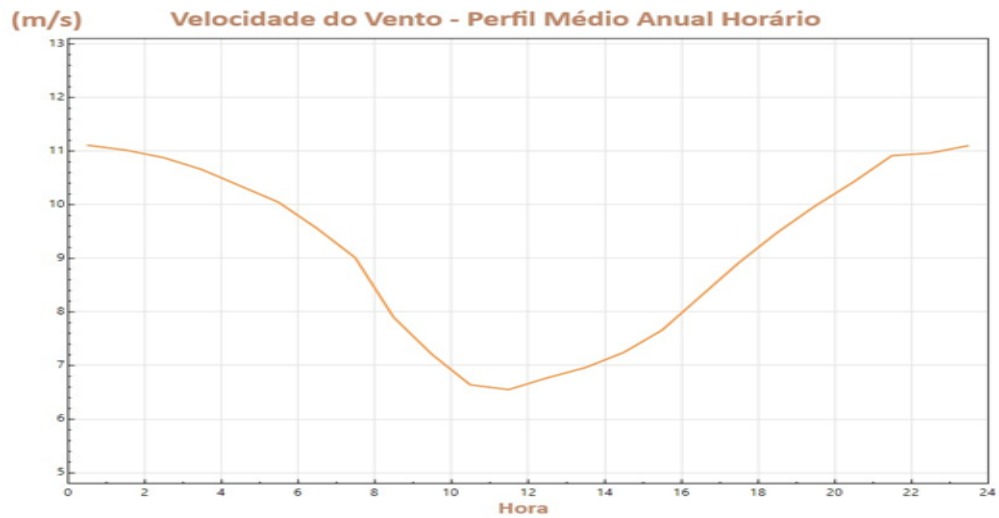


FIGURA 15 - PERFIL RECURSO EÓLICO NO SUL DA CALIFÓRNIA

FONTE DE DADOS: SAM

As figuras 14 e 15, foram extraídas do SAM e representam as médias horárias anuais da irradiância solar no plano horizontal e da velocidade do vento.

As figuras 16 e 17 apresentam valores médios horários, da irradiância solar e da velocidade do vento, em meses específicos nas diferentes estações ao longo do ano, possibilitando a visualização das variações sazonais.

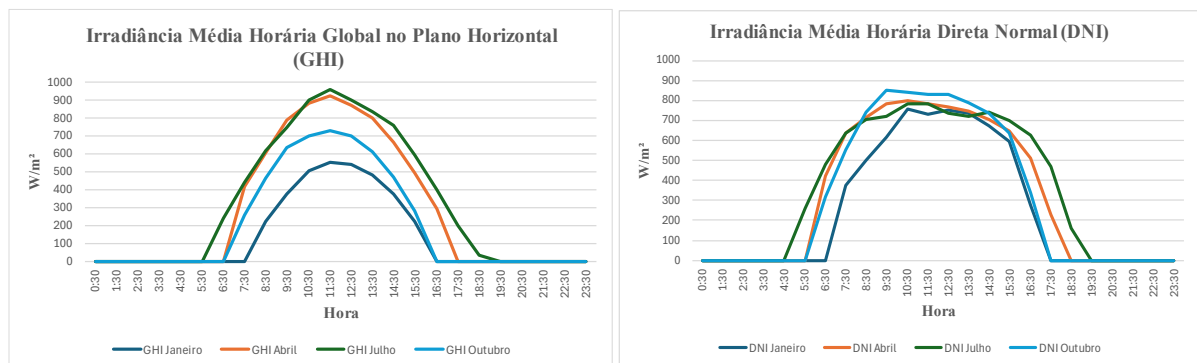


FIGURA 16 – IRRADIÂNCIA SOLAR X ESTAÇÕES DO ANO

FONTE DE DADOS: SAM

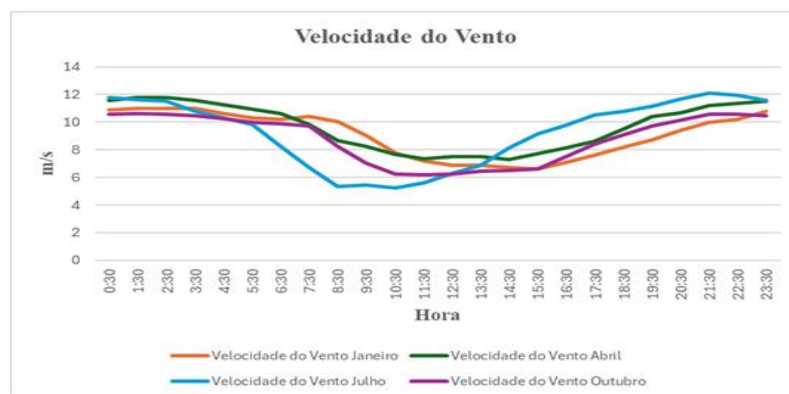


FIGURA 17 - VELOCIDADE DO VENTO X ESTAÇÕES DO ANO

FONTE DE DADOS: SAM

A análise das figuras 14, 15, 16 e 17 indica que os recursos solares e eólicos têm seu maior potencial em horários distintos, o que pode possibilitar a otimização de seu uso integrado através de configurações híbridas, que façam uso de ambos para geração de energia elétrica. Isso considerando que a geração de energia elétrica é diretamente proporcional aos valores destes recursos.

Desta forma a planta de geração eólica deverá gerar mais energia elétrica durante a noite enquanto a planta de geração solar deverá fazê-lo durante o dia.

Para uma melhor comparação entre os recursos foi feita a conversão da velocidade do vento para densidade de potência em W/m^2 com base na equação 1:

$$Densidade\ de\ potência\ \left(\frac{W}{m^2}\right) = Massa\ específica\ do\ ar \times \frac{(Velocidade\ do\ vento)^3}{2} \quad (1)$$

Massa específica do ar = 1,225 Kg/m³ (a 15°C e P atm. ao nível do mar).

A figura 18 apresenta a média horária anual dos recursos solar e eólico para esta condição, evidenciando a complementaridade destes recursos.

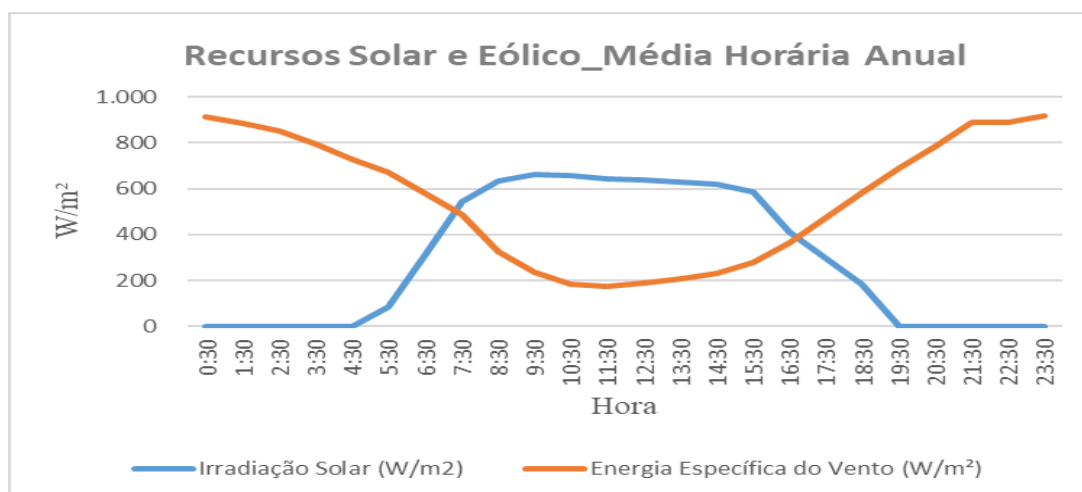


FIGURA 18 - RECURSOS SOLAR E EÓLICO - MÉDIA HORÁRIA ANUAL

FONTE DE DADOS: SAM

3.3. Critérios de análise e comparação

Para fins de análise e comparação foram considerados os seguintes aspectos: (i) Mesma potência nominal (100 MWe) para cada uma das configurações; (ii) Configurações instaladas no mesmo local; (iii) Inexistência de armazenamento de energia; (iv) Simulação de cada uma das tecnologias, inicialmente, em uma configuração individual para servir como base de comparação com as configurações híbridas; (v) Produção anual máxima de energia elétrica de 876 GWh, com a potência de 100 MWe, durante as 8.760 horas do ano, valor este que não será atingido devido a intermitência dos recursos meteorológicos.

3.4. Parâmetros e variáveis de entrada

Os seguintes parâmetros e variáveis geográficas, meteorológicas, técnicas e econômicas foram utilizados nas simulações realizadas com o software SAM: (i) Local: Sul do estado da Califórnia, nos Estados Unidos, onde fica o Deserto de Mojave; (ii) Latitude aproximada de 34°00' N; (iii) Longitude aproximada de 117°00' O; (iv) Potência total de cada uma das configurações igual à 100MWe (valor típico para fins de análise); (v) Irradiância Direta Normal (DNI) média horária anual de 268 W/m² (base de dados meteorológicos do SAM); (vi) Irradiância Global Horizontal (GHI) média horária anual de 314 W/m² (base de dados meteorológicos do SAM); (vii) Velocidade média horária anual do vento de 9,14 m/s (base de dados meteorológicos do SAM); (viii) Período de análise financeira igual a 25 anos; (ix) Taxa de inflação anual igual a 3%; (x) Taxa de juros (taxa

de desconto real) anual igual a 5%; (xi) Taxa de contingência (uma porcentagem da soma dos equipamentos, da mão de obra de instalação e da margem do instalador e dos custos indiretos que é usado para contabilizar a incerteza esperada nas estimativas de custo direto) igual a 5%; (xii) Custos de operação e manutenção das Configurações baseadas em (CSP/PTC) e (CT) igual a USD 66,00/kW (base de dados do NREL); (xiii) Custos de operação e manutenção das Configurações (FV) igual a USD 15,00/kW (base de dados do NREL); (xiv) Custos de operação e manutenção das Configurações (EO) igual a USD 40/kW (base de dados do NREL).

Os principais parâmetros técnicos utilizados pelo SAM, para dimensionamento de cada uma das configurações e cálculo dos resultados de geração e custos são apresentados nas Tabelas 1 a 4.

Os itens marcados com (*) foram sugeridos pelo SAM e os demais foram inseridos como entrada manual pelo usuário.

Configuração 1 (CSP/PTC)	
Potência (MWe)	100
Múltiplo Solar	1,5
Temperatura de entrada - HTF (°C) (*)	293
Temperatura de saída - HTF (°C) (*)	391
Quantidade de loops	138
Coletores solares (SCA) por loop	8
Espaçamento entre filas (m) (*)	15
Coletores Solares (SCA) / Receptores (HCE)	SkyFuel Sky Trough / Schott PTR80
Largura / Comprimento SCA (m)	6 / 115
Reflectância ótica do espelho dos coletores	0,93
Diâmetro interno do HCE (m)	0,076
Diâmetro externo do HCE (m)	0,080
Diâmetro externo do vidro do HCE (m)	0,12
Fluido de transferência de calor	Therminol VP-1
Tipo de condensador	Evaporativo
Fator de conversão de potência bruta (*)	0,9

TABELA 1 - PARÂMETROS DE ENTRADA CONFIGURAÇÃO 1
FONTE DE DADOS: SAM

Configuração 2 (CT)	
Potência (MWe)	100
Múltiplo Solar	1,5
Temperatura de entrada - HTF (°C) (*)	574
Temperatura de saída - HTF (°C) (*)	290
Altura da Torre (m) (*)	173
Largura x Altura Heliostatos (m) (*)	12,2 x 12,2
Material dos Receptores (*)	Stainless AISI316
Fluido de transferência de calor	Sal (60% NaNO ₃ +40%
Reflectância ótica dos espelhos	0,93
Relação distância heliostatos/altura da torre (max/min)	9,5/0,75
Tipo de condensador	Ar
Fator de conversão de potência bruta (*)	0,9

TABELA 2 - PARÂMETROS DE ENTRADA CONFIGURAÇÃO 2
FONTE DE DADOS: SAM

Configuração 3 (FV)	
Potência (MWe)	100
Tipo de módulo	Thin Film
Bifacialidade	Não
Eficiência dos inversores (%) (*)	96
Rastreamento	2 eixos
Perdas por sombreamento (%) (*)	3
Perdas por disponibilidade (%) (*)	3
Perdas por conexões e cabos (%) (*)	2,5
Perda total (%) (*)	14
Degradação anual (%/ano) (*)	0,5

TABELA 3 - PARÂMETROS DE ENTRADA CONFIGURAÇÃO 3
FONTE DE DADOS: SAM

Configuração 4 (EO)	
Potência (MWe)	100
Modelo das turbinas	Vestas V110-2.0
Potência das turbinas (KW)	2000
Diâmetro do rotor das turbinas (m)	110
Altura dos hubs (m)	80
Turbinas por fila / Número de filas (*)	10/5
Espaçamento entre turbinas (diâmetros rotor) (*)	8
Espaçamento entre filas (diâmetros rotor) (*)	8
Perdas "Wake" (%) (*)	1,1
Perdas por disponibilidade (%) (*)	5,5
Perdas elétricas (%) (*)	2
Perdas por performance das turbinas (%) (*)	3,95
Perdas em relação à curva da turbina (%) (*)	2,40
Perdas operacionais (%) (*)	2,80

TABELA 4 - PARÂMETROS DE ENTRADA CONFIGURAÇÃO 4

FONTE DE DADOS: SAM

3.5. Parâmetros e variáveis de saída

Os seguintes parâmetros e variáveis referentes às configurações simuladas foram selecionados para serem analisados e comparados: (i) Energia elétrica produzida por ano “EEA” (GWh/ano); (ii) Fator de capacidade (%); (iii) Área total dos coletores solares do campo solar (milhões de m²); (iv) Área total dos módulos fotovoltaicos (milhões de m²); (v) Área total coberta pelas pás das turbinas eólicas (milhões de m²); (vi) Eficiência Global (conversão solar/eólica – elétrica líquida), η_g (%); (vii) Custo nivelado da energia elétrica produzida “LCOE” (centavo de USD/kWh); (viii) Investimento inicial “CAPEX” (Capital Expenditure - milhões USD); (ix) Valor Presente Líquido “VPL” (milhões de USD);

Os parâmetros e variáveis de saída (exceto Eficiência Global) foram calculados pelo SAM em suas simulações.

O fator de capacidade, calculado pelo SAM, é a razão entre a produção elétrica do sistema no primeiro ano de operação (GWh) e a produção elétrica do sistema se ele operasse em sua capacidade nominal para cada hora do ano, ou seja, Potência Instalada (MW) x 8.760 horas (número de horas disponíveis em um ano).

O cálculo da Eficiência Global foi feito externamente, considerando alguns dados gerados pelo SAM.

A Eficiência Global expressa a relação entre a energia disponibilizada pelos recursos meteorológicos e a energia efetivamente gerada por cada uma das configurações, em base anual, conforme apresentado na equação 2.

A fórmula de cálculo da Eficiência Global está representada nas equações 2 e 3:

$$Eficiência\ Global\ (\%) = \frac{GWh\ Gerado}{GWh\ Disponível} \quad (2)$$

GWh Gerado é dado de saída das simulações do SAM e será apresentado junto com os resultados. GWh disponível foi calculado utilizando a equação 3.

$$GWh\ Disponível = Densidade\ de\ potência \left(\frac{GW}{m^2} \right) \times Horas\ de\ Operação \times Área\ (m^2) \quad (3)$$

Para as configurações que usam recursos solares, a densidade de potência foi obtida na base de dados meteorológicos do SAM, para o local escolhido para as simulações. Para as configurações eólicas a densidade de potência foi calculada utilizando a equação 1 e a a

velocidade do vento obtida na base de dados meteorológicos do SAM, para o local escolhido para as simulações. As áreas são variáveis de saída, calculadas pelo SAM para cada uma das configurações e serão apresentadas junto com os resultados.

A tabela 5 apresenta o resumo das densidades de potência e energia específica utilizados no cálculo da Eficiência Global.

		1 CSP100		2 CT100		3 FV100		4 EO100		
		Densidade de Potência Média Disponível	Energia Específica Média Disponível	Densidade de Potência Média Disponível	Energia Específica Média Disponível	Densidade de Potência Média Disponível	Energia Específica Média Disponível	Velocidade Média do Vento	Densidade de Potência Média Disponível	Energia Específica Média Disponível
	Hs	W/m ²	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²	m/s	W/m ²	kWh/m ²
jan	744	161,62	120,25	250,28	186,21	141,71	105,43	9,10	461,56	343,40
fev	672	195,25	131,21	260,54	175,08	180,74	121,46	9,24	483,19	324,71
mar	744	278,12	206,92	321,85	239,46	247,70	184,29	9,65	550,41	409,51
abr	720	301,82	217,31	324,73	233,81	293,35	211,21	9,71	560,74	403,73
mai	744	355,77	264,69	368,71	274,32	332,89	247,67	9,82	580,02	431,53
jun	720	386,59	278,34	399,77	287,83	350,87	252,63	9,67	553,84	398,77
jul	744	342,27	254,65	355,01	264,13	320,27	238,28	9,28	489,50	364,19
ago	744	321,23	239,00	341,74	254,25	295,88	220,13	8,55	382,83	284,82
set	720	299,01	215,29	334,85	241,09	262,87	189,27	7,88	299,70	215,78
out	744	240,78	179,14	310,65	231,12	208,79	155,34	8,84	423,12	314,80
nov	720	183,39	132,04	263,67	189,84	156,10	112,39	8,73	407,52	293,41
dez	744	152,81	113,69	239,00	177,82	131,50	97,84	9,25	484,77	360,67
Total	8760	<i>Base Dados SAM</i>	2.352,53	<i>Base Dados SAM</i>	2.754,96	<i>Base Dados SAM</i>	2.135,94	<i>Base Dados SAM</i>	<i>Calculado</i>	4.145,32
	Horas		kWh/m ² .ano		kWh/m ² .ano		kWh/m ² .ano		<i>Equação 1</i>	kWh/m ² .ano

TABELA 5 - PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA EFICIÊNCIA GLOBAL

FONTES DE DADOS: SAM

O custo nivelado de energia elétrica “LCOE”, Equação (4), é o custo anualizado da geração da energia elétrica de um sistema, ou seja, é um valor fixo que representa o custo anual ao longo de todo o período da análise financeira, que também pode ser considerado o período da vida útil do sistema.

O LCOE é uma métrica crucial usada para avaliar a relação custo-efetividade de diferentes fontes de energia. Ele considera vários fatores, incluindo despesas de capital (CAPEX) associadas com a instalação dos sistemas, despesas operacionais (OPEX), custos de combustível e vida útil esperada da planta. O LCOE é diretamente influenciado pelo CAPEX. Quando o CAPEX aumenta, o LCOE também tende a subir. Ele também é impactado pela quantidade de energia elétrica gerada, tendendo a reduzir com o aumento do volume de energia.

O parâmetro econômico “FRC” (Fator de Recuperação de Capital), Equação (5) depende da taxa de desconto “i” e do período em anos da análise financeira “n”. O “FRC”, serve para transformar o investimento inicial “I” em parcelas fixas ao longo do período da análise financeira. O parâmetro “j” representa o percentual anual do investimento “I”,

sendo destinado aos custos operacionais e de manutenção. A variável $E_{ele,anual}$ representa a produção fixa anual de energia elétrica. As equações utilizadas pelo software SAM são as seguintes:

$$LCOE = \frac{(FRC + j)}{E_{ele,anual}} \cdot I \quad (4)$$

$$FRC = \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (5)$$

O Valor Presente Líquido “VPL” Equação (6), é uma variável financeira que demonstra se um projeto é ou não viável do ponto de vista econômico e inclui todas as receitas e despesas ocorridas ao longo do período da análise financeira. Um “VPL” positivo indica que o projeto é economicamente viável, ou seja, gera um valor maior do que seu investimento inicial, enquanto um “VPL” negativo indica que o projeto em questão é inviável do ponto de vista econômico, ou seja, o oposto do “VPL” positivo. Quanto maior o “VPL” maior a rentabilidade de um projeto. As equações utilizadas pelo software SAM são as seguintes:

$$VPL = \sum_1^n E_{ele,anual} - I \therefore VPL = E_{ele,anual} \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - I \quad (6)$$

3.6. Configurações analisadas

As análises objeto deste trabalho referem-se, principalmente, às plantas de geração híbridas, com uso de recursos solar e eólico.

Entretanto, de forma a permitir a comparação entre plantas de geração híbridas e não híbridas foram também simuladas também configurações com um único tipo de tecnologia.

3.6.1. Configuração 1 => Planta Heliotérmica do tipo (CSP/PTC)

Para configuração desta planta Heliotérmica (CSP – Concentrating Solar Power) de 100 MWe, sem armazenamento de energia e utilizando coletores concentradores do tipo “Calha Parabólica” (PTC - Parabolic Trough Collector) foi feita uma análise paramétrica, dentro do software SAM, com o objetivo de avaliar o impacto das variações do fator Múltiplo Solar (SM) no Valor Presente Líquido (VPL), Custo Normalizado da Energia Produzida (LCOE), Valor do Investimento Inicial (CAPEX) e Energia Elétrica Anual Gerada (EEA), de forma a possibilitar a otimização da configuração a ser utilizada.

Os resultados obtidos nesta análise paramétrica estão indicados na tabela 6.

	Múltiplo Solar	LCOE (cUSD/Kwh)	VPL (USD)	EEA (Kwh/ano)
1	1	11,2446	-9,59986E+06	1,89642E+08
2	1.5	9,92496	3,54358E+07	2,56188E+08
3	2	10,5762	1,23726E+07	2,73936E+08
4	2.5	11,6285	-2,92924E+07	2,78356E+08
5	3	12,2653	-5,72131E+07	2,91866E+08
6	3.5	13,1713	-9,68742E+07	2,97721E+08
7	4	14,3829	-1,47462E+08	2,95747E+08
8	4.5	15,2977	-1,88945E+08	3,00293E+08
9	5	16,3458	-2,34986E+08	3,01578E+08
10	6	18,3669	-3,25606E+08	3,04463E+08

TABELA 6 - ANÁLISE PARAMÉTRICA CONFIGURAÇÃO 1

FONTE: SAM

Com base nos valores obtidos foi selecionado o múltiplo solar de 1,5 para esta configuração, por ser esta a primeira opção com o VPL positivo, ou seja, a primeira na qual os custos do projeto são menores do que os lucros. Além disso foi a alternativa com menor LCOE dentre as analisadas para este tipo de tecnologia.

Para um múltiplo solar de 2 a EEA produzida seria um pouco maior, porém o LCOE também seria maior do que o obtido com múltiplo solar de 1.5. Por este motivo foi utilizado SM = 1.5.

3.6.2. Configuração 2 => Planta Heliotérmica do tipo Torre Central (CT)

Para configuração desta planta Heliotérmica (CT – Concentrating Solar Power com Torre Central) de 100 MWe, sem armazenamento de energia e utilizando heliostatos, foi feita uma análise paramétrica, dentro do software SAM, com o objetivo de avaliar o impacto das variações do fator Múltiplo Solar (SM) no Valor Presente Líquido (VPL), Custo Normalizado da Energia Produzida (LCOE) e Energia Elétrica Anual Gerada (EEA), de forma a possibilitar a otimização da configuração a ser utilizada.

Os resultados obtidos nesta análise paramétrica estão indicados na tabela 7.

	Múltiplo Solar	LCOE (cUSD/Kwh)	VPL (USD)	EEA (Kwh/ano)
1	1	11,2525	-1,14293E+07	2,21414E+08
2	1.5	10,7139	6,36489E+06	2,49245E+08
3	2	11,1165	-9,21958E+06	2,87325E+08
4	2.5	11,5039	-2,07539E+07	2,36246E+08
5	3	12,4811	-4,83924E+07	2,11088E+08
6	3.5	14,0110	-1,32050E+08	2,94958E+08
7	4	0	-6,24420E+08	-1,41461E+07
8	4.5	0	-1,11856E+09	-3,39519E+07
9	5	0	-1,21666E+09	-4,31730E+07
10	6	0	-5,40684E+08	-1,34937E+07

TABELA 7 - ANÁLISE PARAMÉTRICA CONFIGURAÇÃO 2

FONTE DE DADOS: SAM

Com base nos valores obtidos foi selecionado o múltiplo solar de 1.5 para esta configuração, por ser esta a opção com o menor LCOE, maior EEA e a única que tem o VPL positivo.

Para múltiplos solares a partir de 4 o LCOE encontrado foi de zero, e a energia anual foi negativa, ou seja, para estes casos houve consumo anual de energia, para manter a configuração operacional, e não geração. Perdas parasitas, elétricas ou térmicas, foram o provável motivo deste consumo maior do que geração e são consequência do aumento do campo solar e consequentemente do número de espelhos à medida que o múltiplo solar aumenta, demandando maior energia para sua operação.

A figura 19, apresenta o arranjo dos heliostatos do campo solar desta Configuração.

Este arranjo foi calculado pelo SAM com base no múltiplo solar de 1.5 selecionado.

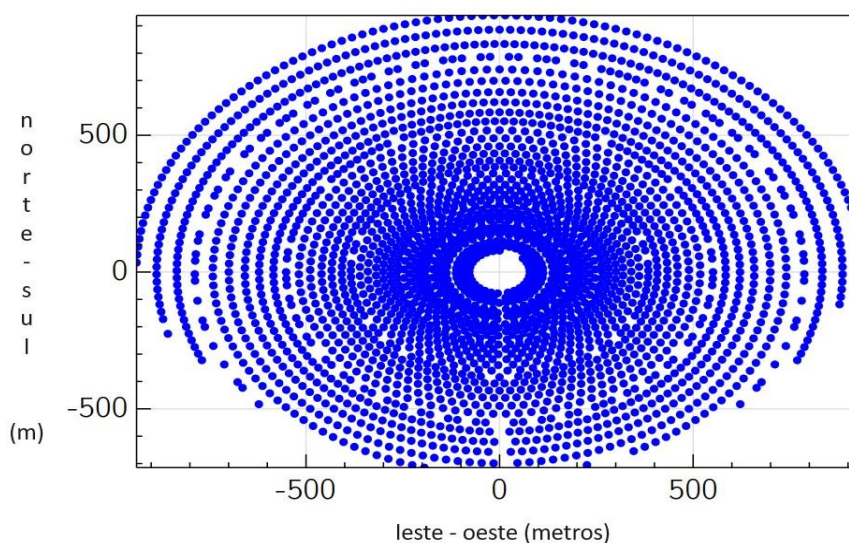


FIGURA 19 - ARRANJO HELIOSTATOS

FONTE: SAM

3.6.3. Configuração 3 => Planta Solar Fotovoltaica (FV)

Para configuração desta planta Fotovoltaica (FV) de 100 MWe, sem armazenamento de energia, foram feitas análises paramétricas, dentro do software SAM, com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes definições de entrada no resultado das simulações, de forma a possibilitar a otimização da configuração a ser utilizada, especificamente em relação ao Custo Nivelado da Energia Produzida (LCOE), Energia Elétrica Anual Gerada (EEA) e Valor Presente Líquido (VPL).

Foram avaliados uso de sistemas de rastreamento solar para os módulos fotovoltaicos, tipo de módulo fotovoltaico e relação CC/CA dos inversores utilizados.

No rastreamento dos dois eixos a matriz gira de leste pela manhã para oeste à noite para rastrear o movimento diário do sol no céu e de norte a sul para rastrear o movimento sazonal do sol ao longo do ano. No rastreamento de um eixo o subarray é fixado no ângulo da horizontal definido pelo valor de Tilt e gira em torno do eixo inclinado de leste pela manhã para oeste à noite para rastrear o movimento diário do sol no céu.

Tres tipos de módulo são disponibilizados pelo SAM. “Standard (eficiência de 19% e perda de potência por temperatura de $-0,37\% / ^\circ\text{C}$)” , “Premium (eficiência de

21% e perda de potência por temperatura de $-0,35\% / ^\circ\text{C}$)” e “Thin Film (eficiência de 18% e perda de potência por temperatura de $-0,32\% / ^\circ\text{C}$)”.

A análise paramétrica foi feita de forma matricial e os resultados obtidos estão indicados na tabela 8.

	Relação CC/CA	Rastreamento	Tipo de Módulo	LCOE (cents USD/kWh)	VPL (USD)	EEA (kWh/ano)
1	1,1	2 eixos	Thin Film	2,5363	3,78E+07	2,88E+08
2	1,2	2 eixos	Thin Film	2,5427	3,75E+07	2,88E+09
3	1,3	2 eixos	Thin Film	2,6022	3,46E+07	2,83E+08
4	1,1	Fixo (rack aberto)	Thin Film	4,9477	-3,39E+07	1,76E+08
5	1,2	Fixo (rack aberto)	Thin Film	4,9417	-3,38E+07	1,76E+08
6	1,3	Fixo (rack aberto)	Thin Film	4,9373	-3,38E+07	1,76E+08
7	1,1	1 eixo	Thin Film	3,2575	8,25E+06	2,42E+08
8	1,2	1 eixo	Thin Film	3,2543	8,36E+06	2,42E+08
9	1,3	1 eixo	Thin Film	3,2554	8,33E+06	2,42E+08
10	1,1	2 eixos	Standard	2,5780	3,58E+07	2,85E+08
11	1,2	2 eixos	Standard	2,5829	3,55E+07	2,85E+07
12	1,3	2 eixos	Standard	2,6328	3,32E+07	2,81E+08
13	1,1	Fixo (rack aberto)	Standard	5,0015	-3,49E+07	1,74E+08
14	1,2	Fixo (rack aberto)	Standard	4,9954	-3,48E+07	1,74E+08
15	1,3	Fixo (rack aberto)	Standard	4,9906	-3,47E+07	1,75E+08
16	1,1	1 eixo	Standard	3,3018	6,74E+06	2,40E+08
17	1,2	1 eixo	Standard	3,2986	6,85E+06	2,40E+07
18	1,3	1 eixo	Standard	3,2980	6,87E+06	2,40E+07
19	1,1	2 eixos	Premium	2,5607	3,66E+07	2,86E+08
20	1,2	2 eixos	Premium	2,5670	3,63E+07	2,86E+08
21	1,3	2 eixos	Premium	2,6233	3,36E+07	2,82E+08
22	1,1	Fixo (rack aberto)	Premium	5,0101	-3,51E+07	1,74E+08
23	1,2	Fixo (rack aberto)	Premium	5,0040	-3,50E+07	1,74E+08
24	1,3	Fixo (rack aberto)	Premium	4,9994	-3,49E+07	1,74E+08
25	1,1	1 eixo	Premium	3,2942	7,00E+06	2,40E+08
26	1,2	1 eixo	Premium	3,2909	7,11E+06	2,40E+08
27	1,3	1 eixo	Premium	3,2912	7,10E+06	2,40E+08

TABELA 8 – ANÁLISE PARAMÉTRICA CONFIGURAÇÃO 3

FONTE: SAM

A análise dos resultados obtidos mostra que a melhor opção é a com rastreamento em 2 eixos com módulos fotovoltaicos do tipo “Thin Film” e relação CC/CA de 1,1, por ser esta a com o menor LCOE e maior valor de energia elétrica gerada anualmente (EEA).

Embora os módulos do tipo “Thin Film” não sejam os que têm a melhor eficiência são aqueles que têm a menor perda de potência em função da temperatura, o que contribuiu para uma maior produção anual de energia elétrica, no local da simulação.

A opção com rack aberto fixo, sem rastreamento, gera VPL negativo, além dos maiores valores de LCOE e menores valores de energia elétrica gerada anualmente (EEA) dentre as alternativas analisadas.

3.6.4. Configuração 4 => Planta Eólica (EO)

Para configuração desta planta Eólica (EO) de 100 MWe, sem armazenamento de energia, foram feitas análises paramétricas, dentro do software SAM, com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes turbinas com seus diferentes parâmetros para dimensionamento do parque eólico baseando-se no Custo Nivelado da Energia Produzida (LCOE), Valor do Investimento Inicial (CAPEX), Energia Elétrica Anual Gerada (EEA) e Valor Presente Líquido (VPL), de forma a possibilitar a otimização da configuração a ser utilizada.

A tabela 9 resume os resultados obtidos para alguns modelos diferentes de turbinas.

	MODELO TURBINA	LCOE (cUSD/Kwh)	VPL (USD)	EEA (Kwh/ano)
1	Vestas V110-2.0	1,5068	1,19645E+08	4,86578E+08
2	Vestas V90-2.0	1,9939	7,32587E+07	4,13327E+08
3	Gamesa G97 2.0 MW	1,7022	9,91857E+07	4,54270E+07
4	Gamesa G87 2.0 MW	2,0385	6,96986E+07	4,07705E+08
5	Vensys 112m 2500kW	1,7261	9,68741E+07	4,50620E+07
6	Vensys 100m 2500kW	2,0041	7,24301E+07	4,12018E+08
7	GE 2.5xl	2,0592	6,80751E+07	4,05141E+08
8	Mitsubishi MWT 1000A	1,7956	9,03417E+07	4,40304E+08
9	BARD 5.0	2,4046	4,37756E+07	3,66768E+08
10	IEA 10MW RWT	1,6621	1,03167E+08	4,60557E+08

TABELA 9 – ANÁLISE PARAMÉTRICA 1 CONFIGURAÇÃO 4

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que há variações nos valores do LCOE, VPL e também na quantidade de energia gerada ao longo de um ano (EEA) para o parque eólico de 100MWe, composto por um conjunto de turbinas, cujo modelo e potência fizeram parte desta análise paramétrica.

Com base nos resultados obtidos nesta primeira análise foi selecionada a turbina Vestas de 2.0 MW para esta configuração, por ser esta a opção com o menor LCOE e maior valor de energia elétrica gerada anualmente (EEA).

Escolhida a turbina a etapa seguinte foi a definição da altura dos hubs e do “Wake Model” (Modelo de Esteira), referente às turbinas eólicas.

O efeito “esteira” na energia eólica ocorre quando o fluxo do vento é influenciado pela presença de uma turbina eólica, o que impacta turbinas próximas. Quando o vento

encontra uma turbina eólica, ele cria uma zona de baixa pressão atrás dela, resultando em vento mais lento e menos energético para as turbinas subsequentes. Essa situação reduz a eficiência e o desempenho das turbinas a jusante, levando ao que chamamos de efeito “esteira”.

Para maximizar a utilização do espaço disponível em um parque eólico, precisamos otimizar a disposição das turbinas eólicas. O espaçamento adequado entre as turbinas é necessário para evitar a influência de sombras de esteira e turbulência gerada, o que pode reduzir a produção geral.

No entanto, as turbinas também devem ser posicionadas próximas o suficiente para otimizar a área disponível e minimizar os custos na rede interna de média tensão do parque eólico e as perdas de energia na rede.

Entender e mitigar o efeito “esteira” são cruciais para maximizar a produção de energia eólica e garantir uma operação eficiente do parque eólico. Pesquisadores e engenheiros usam modelos para prever características deste evento e otimizar o layout de parques eólicos.

As perdas devidas ao efeito “esteira” explicam a redução na potência das turbinas posicionadas na sequência de outras turbinas do parque eólico.

O cálculo do efeito de esteira requer uma modelagem precisa para minimizar as perdas de energia causadas pelo efeito de esteira tanto a distâncias próximas quanto distantes.

O SAM permite a escolha entre quatro modelos diferentes para tratar o efeito “esteira” nas simulações e estimar o impacto das turbinas a montante no desempenho das turbinas a jusante.

O modelo “Simple Wake” usa um coeficiente de empuxo para calcular o déficit de velocidade do vento em cada turbina devido aos efeitos de esteira das turbinas a favor do vento.

O modelo “Park” calcula o déficit de velocidade do vento atrás de cada turbina usando uma constante de decaimento e calcula a sobreposição desse perfil de esteira com a turbina a jusante para calcular a velocidade do vento nesta turbina.

O modelo “Eddy-Viscosity” é semelhante ao modelo “Park”, exceto que o déficit de velocidade do vento atrás de cada turbina é assumido como tendo uma forma gaussiana (não há constante de decaimento).

O modelo “Constant Loss” considera a perda como uma redução percentual constante na produção do parque eólico.

Foi feita também a análise da altura ideal para os hubs e os resultados estão apresentados na tabela 10.

	ALTURA HUB (m)	MODELO ESTEIRA	LCOE (cUSD/Kwh)	VPL (USD)	EEA (Kwh/ano)
1	60	Simple Wake	1,5396	1,16013E+08	4,80844E+08
2	60	Park	1,7568	9,39545E+07	4,46009E+08
3	60	Eddy-Viscosity	1,5848	1,11137E+08	4,73143E+08
4	60	Constant Loss	1,8537	8,51106E+07	4,32043E+08
5	80	Simple Wake	1,5068	1,18244E+08	4,86578E+08
6	80	Park	1,7059	9,90343E+07	4,53712E+08
7	80	Eddy-Viscosity	1,5477	1,14073E+08	4,79439E+08
8	80	Constant Loss	1,8206	8,66347E+07	4,36719E+08
9	100	Simple Wake	1,5069	1,19628E+08	4,86552E+08
10	100	Park	1,6976	9,96450E+07	4,54995E+08
11	100	Eddy-Viscosity	1,5463	1,15276E+08	4,79679E+08
12	100	Constant Loss	1,8219	8,79502E+07	4,36527E+08
13	120	Simple Wake	1,5193	1,19645E+08	4,84367E+08
14	120	Park	1,7038	9,88321E+07	4,54031E+08
15	120	Eddy-Viscosity	1,5574	1,15124E+08	4,77780E+08
16	120	Constant Loss	1,8365	8,80717E+07	4,34450E+08

TABELA 10 – ANÁLISE PARAMÉTRICA 2 CONFIGURAÇÃO 4

FONTE: SAM

Observa-se que há variações nos valores do LCOE, VPL e EEA para cada uma das alturas dos hubs e modelo de esteira analisados.

Com base nos resultados obtidos foi definida a altura dos hubs como 80 metros e o modelo de esteira como o “Simple Wake” para esta configuração, por ser esta a opção com o menor LCOE e maior EEA, que foram as prioridades nesta avaliação.

A figura 20 mostra a variação de potência em relação a distintas velocidades do vento para a turbina selecionada para esta configuração, Vestas V110-2.0. Esta turbina tem um rotor de 110 metros de diâmetro e potência de 2 MW.

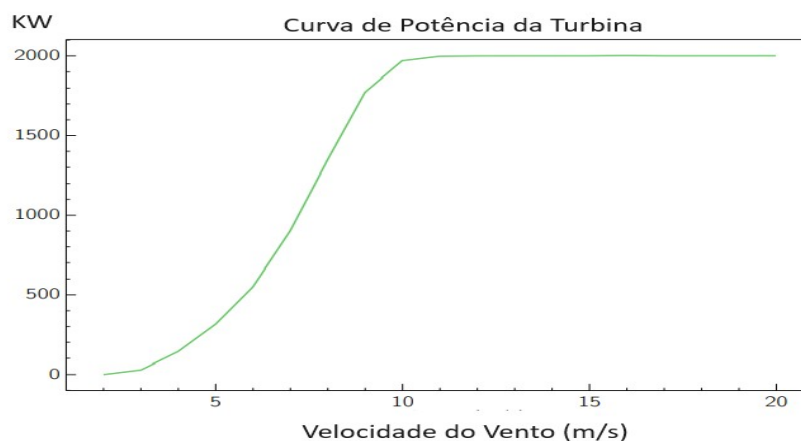


FIGURA 20 - CURVA DE POTÊNCIA DA TURBINA EÓLICA

FONTE: SAM

Os parâmetros de projeto das turbinas definem sua curva de potência. Para um parque eólico com várias turbinas o SAM considera que são todas idênticas.

Observa-se que esta potência de 2 MW só é gerada na faixa de velocidade de vento entre 10 e 20 m/s, o que no caso específico desta configuração, ocorre em alguns horários do dia, ou seja, aproximadamente entre 20:00 hs e 06:00 hs.

Para definição do arranjo do parque eólico o SAM disponibiliza três alternativas. A primeira utilizando uma única turbina com a potência total da configuração, a segunda baseado na definição da potência total do parque solar e a terceira baseada no número de turbinas e sua potência individual.

A alternativa escolhida foi a da definição da potência total do parque solar.

O SAM calculou, com base em seus modelos internos, o espaçamento ideal entre as turbinas e o número de fileiras e turbinas por fileira.

A figura 21 apresenta o arranjo do parque solar sugerido pelo SAM, para esta alternativa e que considerou 5 fileiras de 10 turbinas cada.

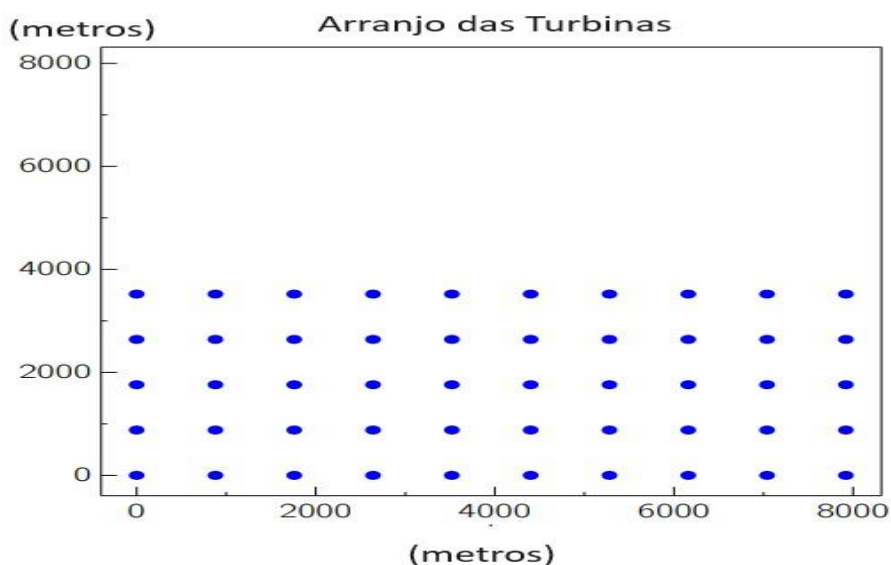


FIGURA 21 - ARRANJO DO PARQUE EÓLICO

FONTE: SAM

3.6.5. Configuração 5 => Planta Híbrida Heliotérmica do tipo (CSP/PTC) + Eólica (EO)

Esta configuração integra, em uma mesma planta geradora, duas tecnologias distintas. A planta Heliotérmica do tipo (CSP/PTC) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.1, porém com potência de 50MWe. A planta Eólica (EO) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.4, porém com potência de 50MWe. A potência total da Configuração 5 é de 100MWe, como as demais.

3.6.6. Configuração 6 => Planta Híbrida Heliotérmica do tipo (CT) + Eólica (EO)

Esta configuração também integra, em uma mesma planta geradora, duas tecnologias distintas. A planta Heliotérmica do tipo (CT) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.2, porém com potência de 50MWe. A planta Eólica (EO) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.4, porém com potência de 50MWe. A potência total da Configuração 6 é de 100MWe, como as demais.

3.6.7. Configuração 7 => Planta Híbrida Fotovoltaica (FV) + Eólica (EO)

Esta configuração também integra, em uma mesma planta geradora, duas tecnologias distintas. A planta Fotovoltaica (FV) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.3, porém com potência de 50MWe. A planta Eólica (EO) tem as

mesmas características da que foi descrita no item 3.3.4, porém com potência de 50MWe. A potência total da Configuração 7 é de 100MWe, como as demais.

3.6.8. Configuração 8 => Planta Híbrida Fotovoltaica (FV) + Eólica (EO)

Esta configuração também integra, em uma mesma planta geradora, duas tecnologias distintas. A planta Fotovoltaica (FV) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.3, porém com potência de 10MWe. A planta Eólica (EO) tem as mesmas características da que foi descrita no item 3.3.4, porém com potência de 90MWe. A turbina eólica escolhida foi a Vestas 110m, com potência de 2000 KW. A potência total da Configuração 8 é de 100MWe, como as demais.

O objetivo da análise desta configuração foi avaliar os impactos da divisão de potência entre as tecnologias distintas em parcelas que não fossem iguais.

4. RESULTADOS

Uma análise de viabilidade técnica e econômica foi realizada para as configurações apresentadas neste trabalho.

4.1 Configurações com um único tipo de tecnologia

A tabela 11 resume os resultados obtidos para as simulações das configurações de 1 a 4, feitas no SAM.

PARÂMETRO ANALISADO	1_CSP100	2_CT100	3_FV100	4_EO100
Potência instalada (MW)	100	100	100	100
Energia Elétrica Anual Gerada "EEA", (GWh)	256	249	288	487
Fator de Capacidade (%)	29,2	28,5	29,9	55,5
Área Campo Solar/Eólico (Milhões de m ²)	0,724	0,512	0,611	0,475
Área de terreno ocupada (Milhões de m ²)	2,530	3,310	2,040	28,800
Eficiência global (conversão solar – elétrica líquida), ηg (%)	14,7	17,5	23,5	25,2
Custo Nivelado de Energia Elétrica "LCOE" (¢USD/kWh)	9,92	10,71	2,54	1,51
Investimento Inicial "CAPEX" (Milhões de USD)	346	345	130	153
Valor Presente Líquido "VPL" (Milhões de USD)	35	6	38	120

TABELA 11 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FONTE DE DADOS: SAM

A partir destes dados foram gerados alguns gráficos específicos com o objetivo de dar suporte à análise de cada um dos itens.

A figura 22 aborda os valores de energia elétrica produzida anualmente por cada uma das configurações.



FIGURA 22 - EEA - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FONTE DE DADOS: SAM

Analisando a figura 22 constata-se que a Configuração 4 produz a maior quantidade de energia elétrica em base anual, cerca de 95% a mais do que as Configurações 1 e 2, ou 70% a mais do que a Configuração 3.

A justificativa destas diferenças está na maior eficiência da tecnologia eólica em relação à tecnologia solar e da maior densidade de potência (W/m^2) disponível para a Configuração 4 quando comparada com as demais.

A distribuição mensal da energia elétrica gerada pelas configurações que usam apenas um tipo de tecnologia está indicada na figura 23.

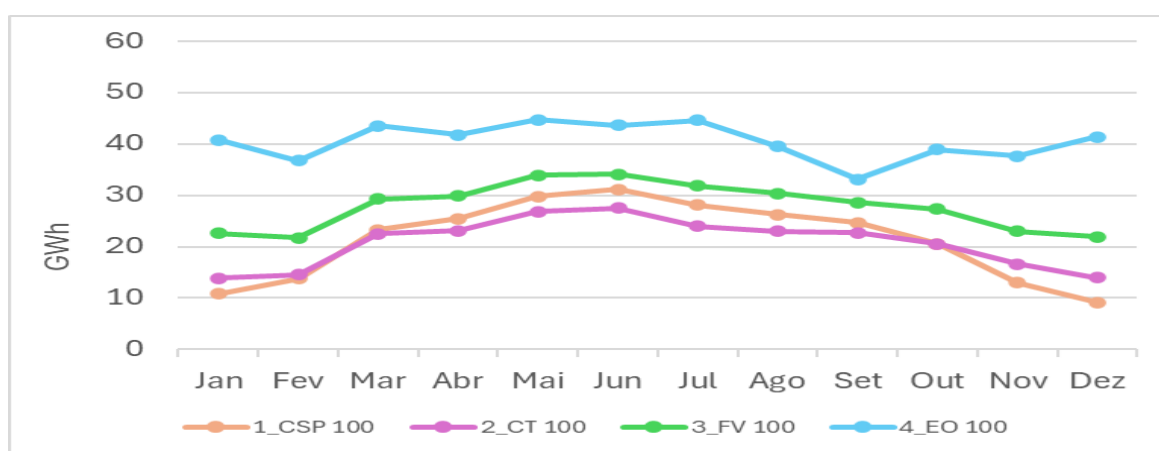


FIGURA 23 - PERFIL MENSAL DE ENERGIA - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FONTE DE DADOS: SAM

Analisando a figura 23, pode-se observar que o perfil de geração mensal ao longo dos meses do ano, para as configurações que usam recursos solares (1 a 3), tem um mesmo padrão, porém com volumes diferentes de energia disponibilizada por cada uma delas. Por outro lado, a Configuração 4, que usa recursos eólicos, tem um perfil diferente das outras ao longo dos meses e também um volume mensal sempre maior, como explicado na análise do gráfico 3.

Além disso, observa-se também, na mesma figura, que a Configuração 4 tende a manter o valor mensal de energia mais linear, com variações menores do que as demais ao longo dos meses.

A potência elétrica gerada mensalmente por cada uma das configurações foi calculada pelo SAM e está representada na figura 24, assim como o respectivo fator de capacidade,

que é o quociente entre a potência gerada e a potência nominal de 100MWe definida no SAM.

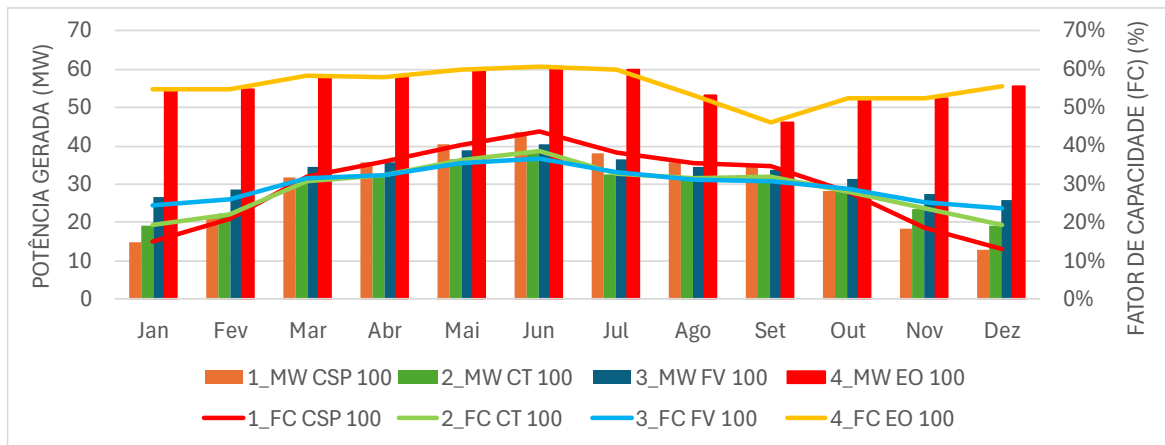


FIGURA 24 - PERFIL DE POTÊNCIA E FATOR DE CAPACIDADE - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FUNTE DE DADOS: SAM

Analisando a figura 24, pode-se observar que, apesar da potência nominal de todas as configurações ser a mesma (100 MWe), a Configuração 4, que usa recursos eólicos, gera uma potência média mensal média maior e com menor variabilidade ao longo do ano quando comparado com os perfis das outras Configurações (1 a 3), que usam recursos solares.

A justificativa destas diferenças está na maior eficiência da tecnologia eólica em relação à tecnologia solar e da maior densidade de potência (W/m^2) disponível para a Configuração 4 quando comparada com as demais.

A figura 25 mostra, em base horária, a média anual da geração de potência por cada uma das configurações analisadas.

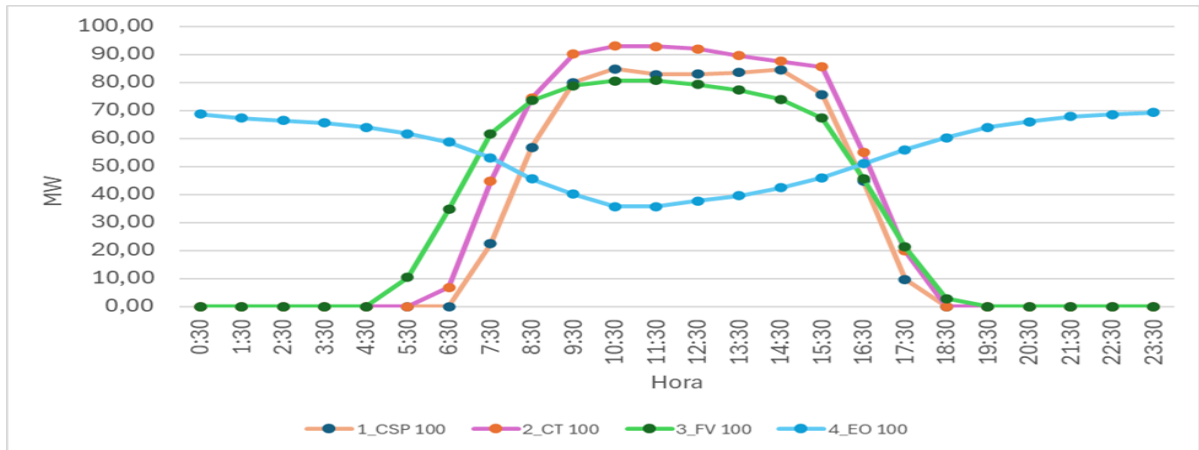


FIGURA 25 - PERFIL MÉDIO ANUAL HORÁRIO DE POTÊNCIA – CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FONTE DE DADOS: SAM

As Configurações 1 a 3 que utilizam recursos solares, não geram potência no intervalo aproximado entre 18h30 e 05h30. Diferentemente das outras a Configuração 4 que utiliza recursos eólicos gera potência durante as 24 horas diárias, porém com valores menores no período entre 05h30 e 18h30, o oposto das demais configurações.

A figura 26 apresenta, para cada uma das configurações, os valores médios mensais da Energia Específica Disponível no local das simulações (calculada pela equação 3), da Energia Gerada conforme calculado pelo SAM e da Eficiência Global (calculada pela equação 2).

GWh Disponível

$$= \text{Densidade de potência} \left(\frac{\text{GW}}{\text{m}^2} \right) \times \text{Horas de Operação} \times \text{Área} (\text{m}^2) \quad (3)$$

$$\text{Eficiência Global} (\%) = \frac{\text{GWh Gerado}}{\text{GWh Disponível}} \quad (2)$$

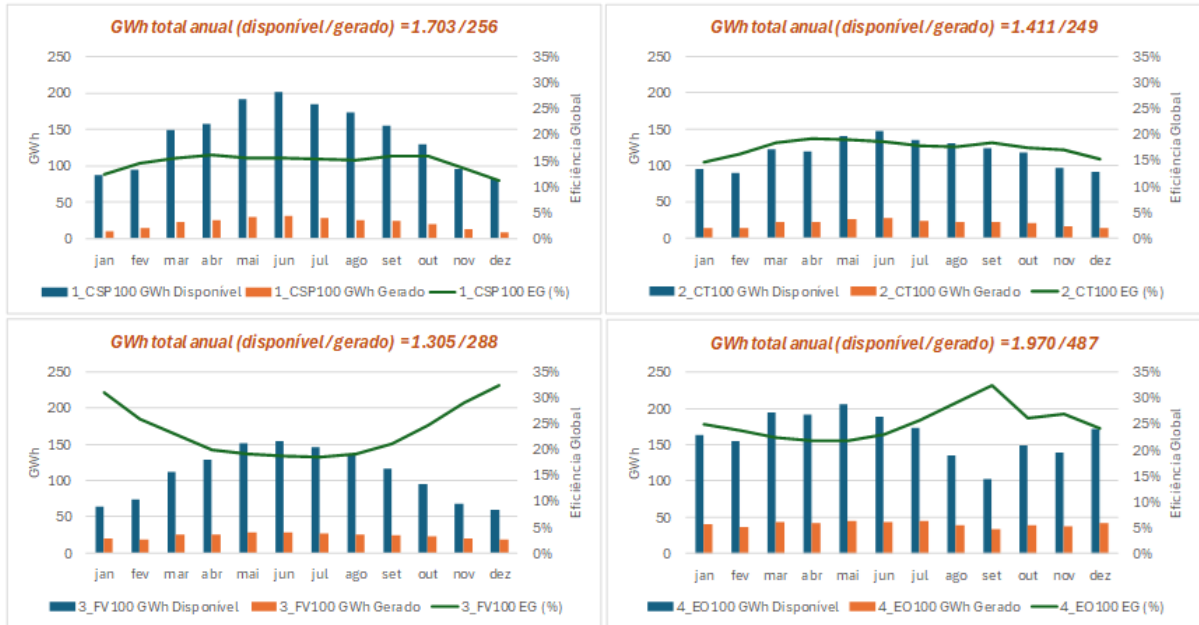


FIGURA 26 - EFICIÊNCIA GLOBAL E DENSIDADE ENERGÉTICA ESPECÍFICA - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FUNTE DE DADOS: SAM

Observa-se na figura 26 que a Configuração 4 (eólica) tem a sua disponição, na maior parte do ano, valores de energia provenientes dos recursos meteorológicos maiores do que as demais configurações, o que resulta em um total anual disponível maior do que as demais.

Observa-se também que a mesma Configuração 4 gera mensalmente valores de energia sempre maiores do que as demais, o que se justifica pela maior eficiência desta tecnologia frente às tecnologias solares das demais configurações, o que resulta em um total anual gerado maior do que as demais.

A Eficiência Global da Configuração 4 é maior do que as demais, ficando acima de 20% em todos os meses e chegando a mais de 30% em alguns destes meses. A Configuração 3 (fotovoltaica) tem sua Eficiência Global maior do que 20% em cerca da metade do ano chegando a mais de 30% em alguns destes meses.

As áreas de incidência dos recursos meteorológicos, que tem influência no cálculo da Eficiência Global, estão representadas na figura 27.

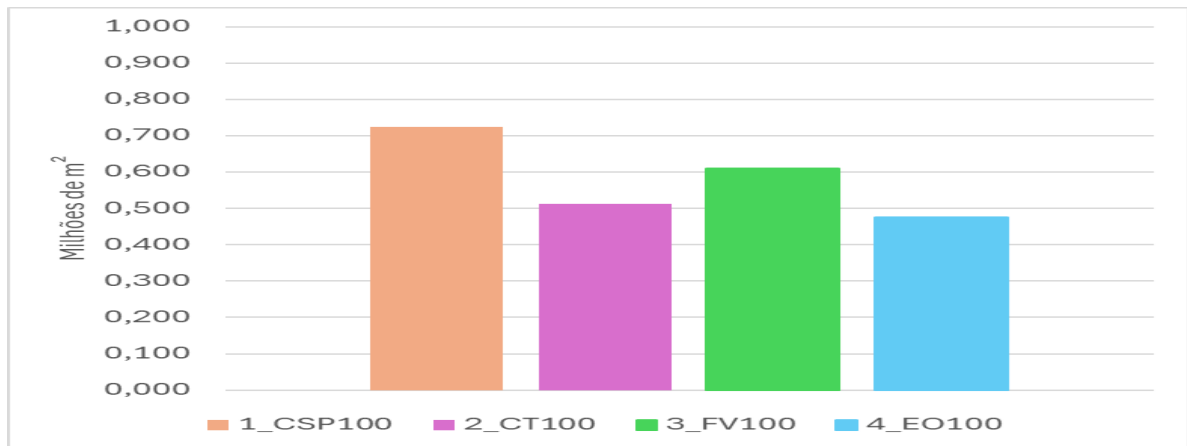


FIGURA 27 - ÁREA CAMPOS SOLARES E EÓLICO - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

Fonte de dados: SAM

Observa-se na figura 27, que a área do campo eólico da Configuração 4 é a menor de todas as configurações analisadas. Esta área foi calculada multiplicando a área da circunferência do rotor de cada turbina pelo número de turbinas do parque eólico.

As áreas das configurações 1 a 3 foram calculadas pelo SAM e representam a área total de abertura refletiva das calhas parabólicas na Configuração 1, a área total refletiva dos heliostatos na Configuração 2 e a área total dos módulos fotovoltaicos na Configuração 3.

Conforme apresentado na figura 28, a área de terreno necessária para instalação da Configuração 4 é muito maior do que a requerida para as demais.

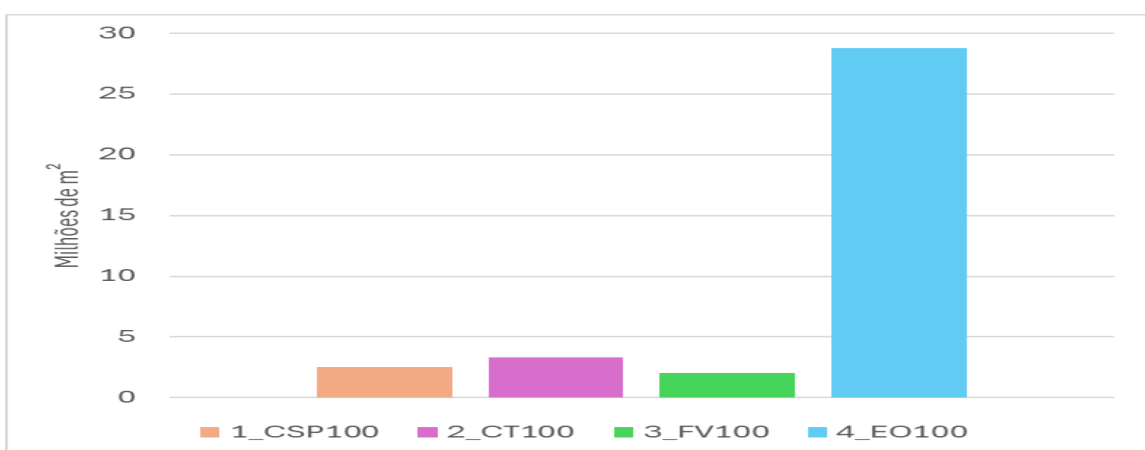


FIGURA 28 - ÁREA DE TERRENO OCUPADA - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

Fonte de dados: SAM

A justificativa é o espaçamento de 8 vezes o diâmetro do rotor requerido entre turbinas e filas de turbinas para permitir a correta operação destes sistemas.

Quanto aos aspectos econômicos a figura 29 apresenta os valores do LCOE e CAPEX, ambos calculados pelo SAM.

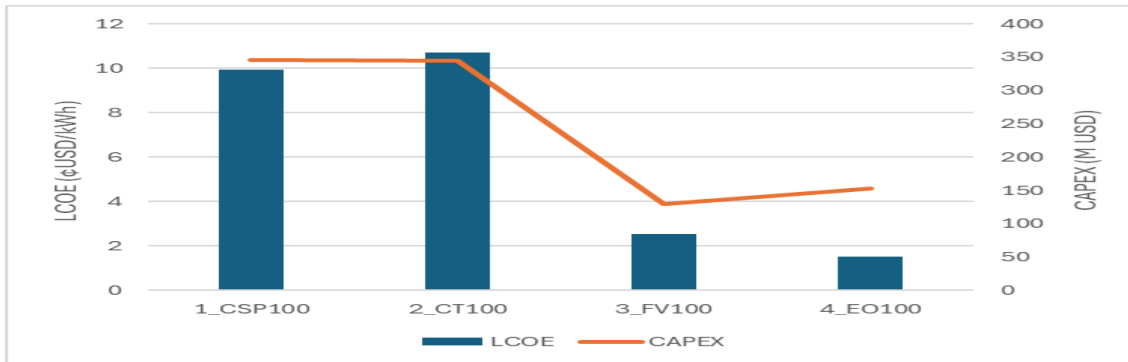


FIGURA 29 - LCOE E CAPEX - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que o LCOE da Configuração 4 é muito menor do que as das Configurações 1 e 2 e também menor do que o da Configuração 3. O motivo desta diferença é o maior volume de energia gerado pela Configuração 4 e seus menores custos de operação e manutenção quando comparado com as demais configurações. Vantagem importante para a Configuração 4.

Observa-se também que o CAPEX das Configurações 3 e 4 têm valores próximos, e muito menores do que as das Configurações 1 e 2, que por sua vez também têm valores praticamente iguais entre si. Todos os custos considerados nas simulações são da base de dados do SAM, que utiliza valores de aplicações reais, localizadas na região escolhida.

A figura 30 apresenta os resultados referentes ao VPL para as configurações analisadas.

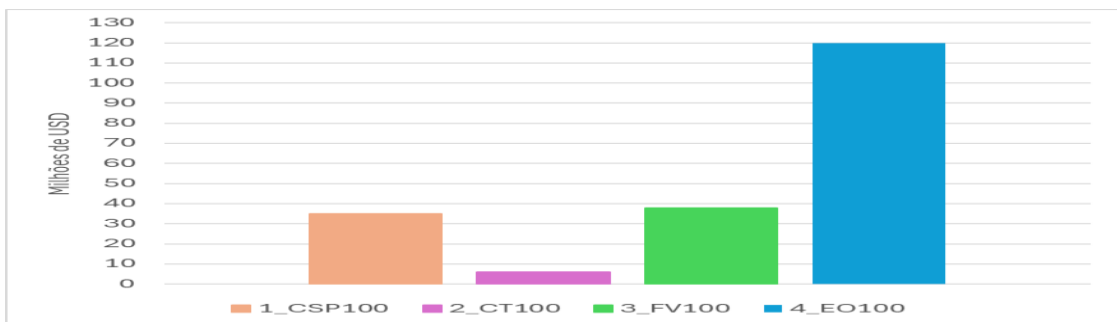


FIGURA 30 - VPL - CONFIGURAÇÕES 1 A 4

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que as Configurações 1 a 4 têm um VPL positivo, o que indica sua atratividade econômica pois indica que o investimento tem potencial para gerar retorno financeiro e criar valor.

Ressalta-se que a Configuração 4 tem um valor de VPL muito maior em relação às demais (cerca de 4 vezes maior do que o das Configurações 1 e 3), o que significa ser esta a solução mais atrativa sob o aspecto econômico, o que associado às outras vantagens já apresentadas acima consolida a melhor performance da Configuração 4.

4.2. Configurações híbridas

A tabela 12 resume os resultados obtidos para as simulações das configurações de 5 a 8, feitas no SAM.

PARÂMETRO ANALISADO	5_CSP50 + EO50	6_CT50 + EO50	7_FV50 + EO50	8_FV10 + EO90
Potência instalada (MW)	100	100	100	100
Energia Elétrica Anual Gerada "EEA", (GWh)	372	334	387	467
Fator de Capacidade (%)	42,4	38,3	42,1	52,7
Área Campo Solar/Eólico (Milhões de m ²)	0,600	0,478	0,544	0,489
Área de terreno ocupada (Milhões de m ²)	13,520	13,720	13,270	25,404
Eficiência global (conversão solar – elétrica líquida), η _g (%)	20,4	20,4	24,1	25,0
Custo Nivelado de Energia Elétrica "LCOE" (¢USD/kWh)	6,81	7,44	4,17	3,99
Investimento Inicial "CAPEX" (Milhões de USD)	250	253	142	152
Valor Presente Líquido "VPL" (Milhões de USD)	665	569	837	1.021

TABELA 12 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

A partir destes dados foram gerados alguns gráficos específicos com o objetivo de dar suporte à análise de cada um dos itens.

A figura 31 aborda os valores de energia elétrica produzida anualmente por cada uma das configurações.

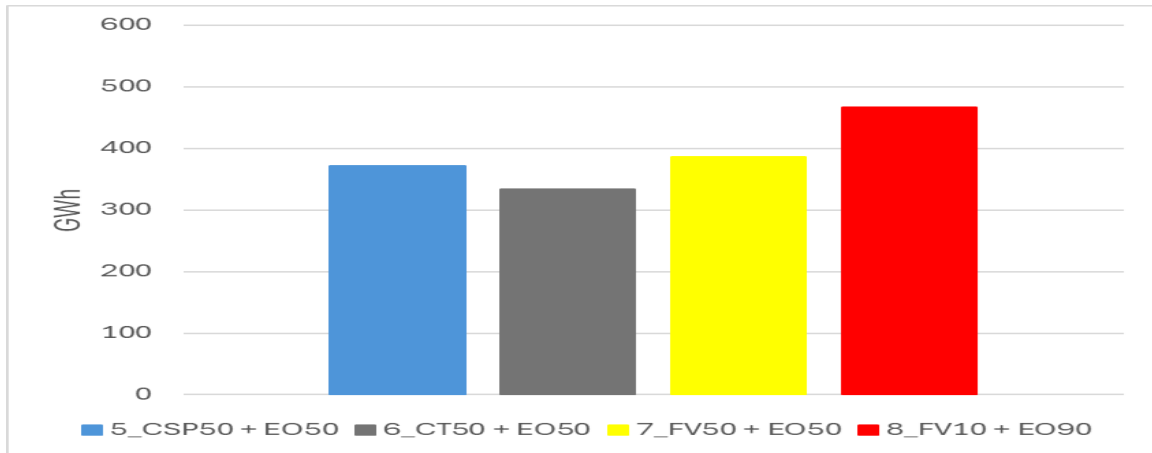


FIGURA 31 - EEA - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Analisando a figura 31 constata-se que a Configuração 8 produz a maior quantidade de energia em base anual, cerca de 20% a mais do que a Configuração 7, ou 25% a mais do que as Configurações 5 e 6.

A justificativa destas diferenças está na maior eficiência da tecnologia eólica em relação à tecnologia solar e da maior densidade de potência (W/m^2) disponível para a parcela eólica de cada uma das configurações quando comparada com as demais.

A distribuição mensal da energia elétrica gerada pelas configurações híbridas está indicada na figura 32.

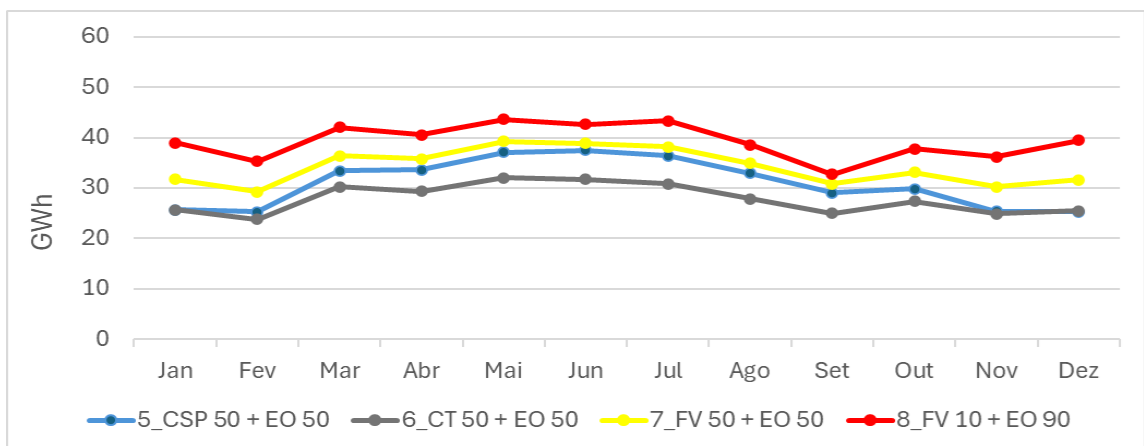


FIGURA 32 - PERFIL MENSAL DE ENERGIA - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Analisando a figura 32, pode-se observar que o perfil de geração mensal ao longo do ano é praticamente o mesmo, com volumes diferentes de energia disponibilizada por cada uma das configurações. A Configuração 8 é a que gera maiores valores mensais.

A potência elétrica gerada mensalmente por cada uma das configurações foi calculada pelo SAM e está representada na figura 33, assim como o respectivo fator de capacidade, que é o quociente entre a potência gerada e a potência nominal de 100MWe definida no SAM.

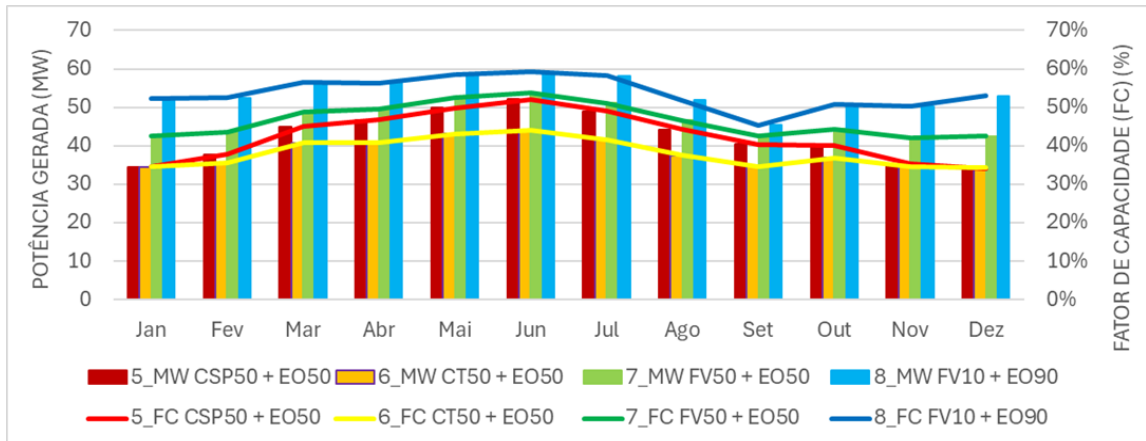


FIGURA 33 - PERFIL DE POTÊNCIA E FATOR DE CAPACIDADE - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Analisando a figura 33, pode-se observar que, apesar da potência nominal de todas as configurações ser a mesma (100 MWe), a Configuração 8, que usa 90% de recursos eólicos, gera uma potência média mensal maior quando comparado com os perfis das outras Configurações (5 a 7), que usam uma parcela maior de recursos solares.

A justificativa destas diferenças está na maior eficiência da tecnologia eólica em relação à tecnologia solar e da maior densidade de potência (W/m^2) disponível para a parcela eólica de cada uma das configurações quando comparada com as demais.

A figura 34 mostra, em base horária, a média anual da geração de potência por cada uma das configurações analisadas.

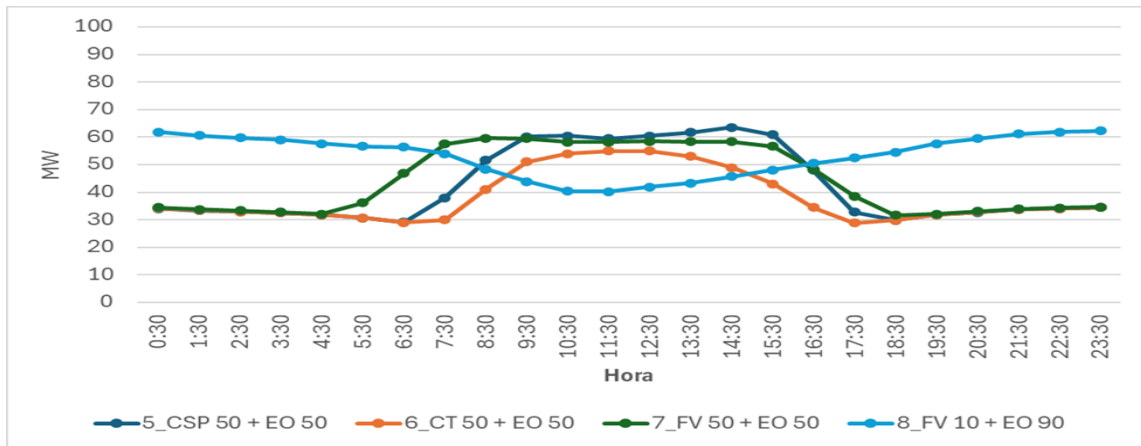


FIGURA 34 - PERFIL MÉDIO ANUAL HORÁRIO – CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Todas as Configurações 5 a 8, que utilizam recursos solares e eólicos, geram potência durante as 24 horas diárias.

As Configurações 5 a 7, que têm uma integração de 50% de recursos solares e 50% de recursos eólicos, geram valores menores no período entre 18h30 e 05h30, período em que os recursos solares não estão disponíveis e maiores no período entre 05h30 e 18h30, período em que estão disponíveis recursos solares e eólicos.

A Configuração 8 que tem uma integração de 10% de recursos solares e 90% de recursos eólicos apresenta comportamento oposto. Como a parcela eólica representa quase a totalidade dos recursos na configuração 8 a complementaridade solar não traz grandes benefícios neste caso.

A figura 35 apresenta, para cada uma das configurações, os valores médios mensais da Energia Específica Disponível no local das simulações (calculada pela equação 3), da Energia Gerada conforme calculado pelo SAM e da Eficiência Global (calculada pela equação 2).

GWh Disponível

$$= \text{Densidade de potência} \left(\frac{\text{GW}}{\text{m}^2} \right) \times \text{Horas de Operação} \times \text{Área} (\text{m}^2) \quad (3)$$

$$\text{Eficiência Global} (\%) = \frac{\text{GWh Gerado}}{\text{GWh Disponível}} \quad (2)$$

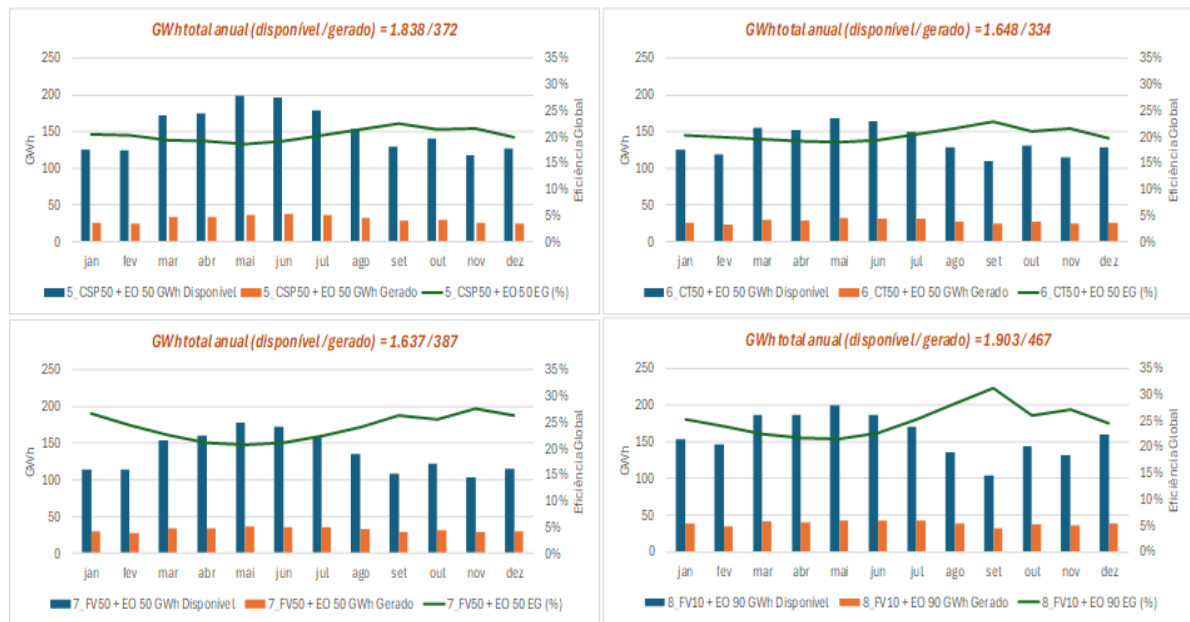


FIGURA 35 - EFICIÊNCIA GLOBAL E DENSIDADE ENERGÉTICA ESPECÍFICA - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se na figura 35 que as Configurações 5 e 8 têm a sua disposição, na maior parte do ano, valores de energia provenientes dos recursos meteorológicos maiores do que as demais configurações, o que resulta em um total anual disponível maior do que as demais.

Observa-se também que a Configuração 8 gera mensalmente valores de energia sempre maiores do que as demais, o que se justifica por sua maior parcela eólica e a maior eficiência desta tecnologia frente às tecnologias solares das demais configurações.

A Eficiência Global das Configurações 7 e 8 é maior do que as demais, ficando acima de 20% em todos os meses, sendo que a Configuração 8 chega a mais de 30% em alguns destes meses.

As áreas de incidência dos recursos meteorológicos, que influenciam o cálculo da Eficiência Global, estão representadas na figura 36.

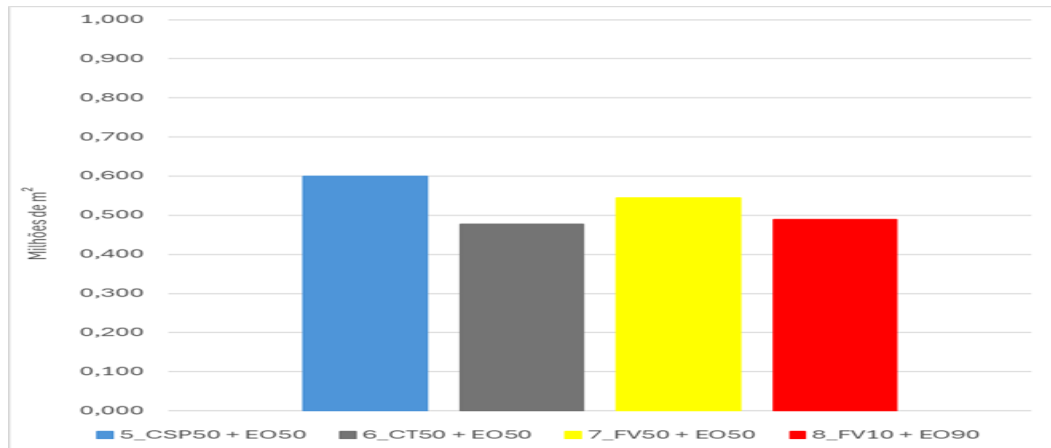


FIGURA 36 - ÁREA CAMPOS SOLARES E EÓLICO - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTES DE DADOS: SAM

Observa-se na figura 36, que a área dos campos eólico e solar da Configuração 6 é a menor de todas as configurações analisadas, seguido de perto pelo da Configuração 8.

Conforme apresentado na figura 37, a área de terreno necessária para instalação da Configuração 8 é muito maior do que a requerida para as demais.

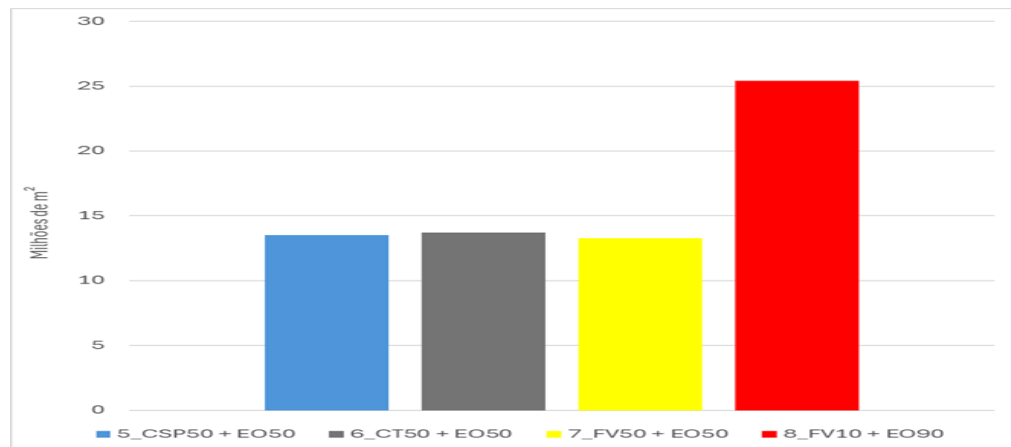


FIGURA 37 - ÁREA DE TERRENO OCUPADA - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTES DE DADOS: SAM

Quanto aos aspectos econômicos a figura 38 apresenta os valores do LCOE e CAPEX.

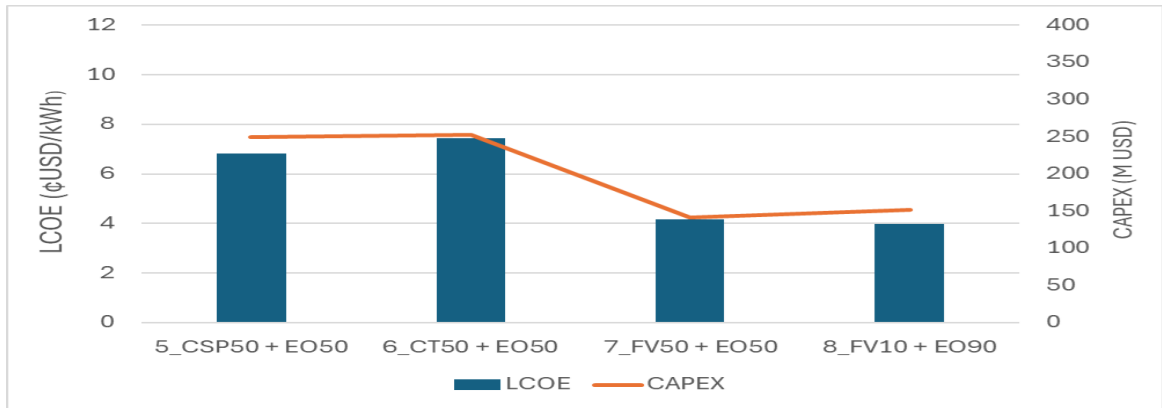


FIGURA 38 - LCOE E CAPEX - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Na figura 38 observa-se que o LCOE da Configuração 8 é o menor entre as configurações híbridas, cerca de 55% do valor da Configuração 6 e 5% menor do que o da Configuração 7.

O motivo desta diferença é o maior volume de energia gerado pela Configuração 8 e seus menores custos de operação e manutenção quando comparado com as demais configurações. Mais uma vantagem para a Configuração 8.

Na mesma figura 38 observa-se que o CAPEX das Configurações 7 e 8 são os menores, representando uma diferença de cerca de 40% a menos do que o das Configurações 5 e 6.

Todos os custos considerados nas simulações são da base de dados do SAM, que utiliza valores de aplicações reais no local escolhido.

A figura 39 apresenta os resultados referentes ao VPL para as configurações analisadas.

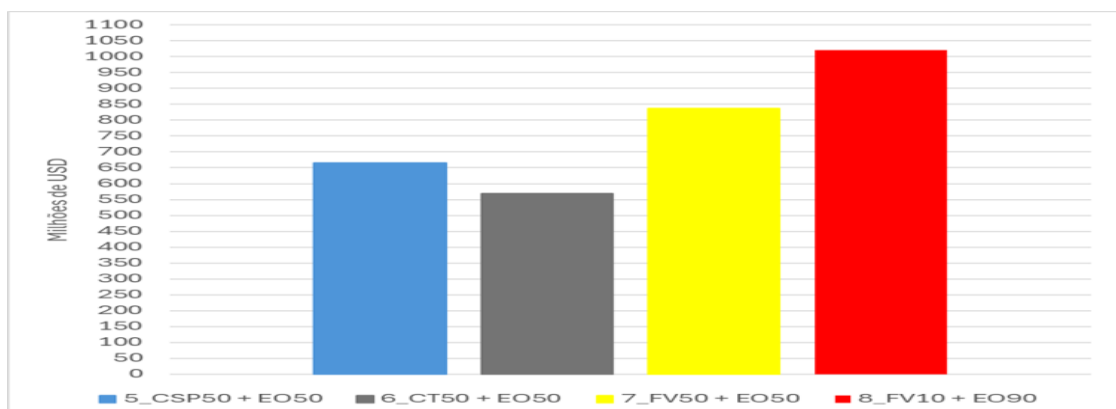


FIGURA 39 - VPL - CONFIGURAÇÕES 5 A 8

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que as Configurações 5 a 8 têm um VPL positivo, o que indica sua atratividade econômica pois indica que o investimento tem potencial para gerar retorno financeiro e criar valor.

Ressalta-se que a Configuração 8 tem um valor de VPL bem maior em relação às demais, cerca de 2 vezes maior do que o das Configurações 5 e 6, e 20% maior do que o da Configuração 7, o que significa ser esta a solução mais atrativa sob o aspecto econômico, o que associado às outras vantagens já apresentadas acima consolida a melhor performance da Configuração 8.

4.3. Comparação de resultados entre as configurações com um tipo de tecnologia e as híbridas

Foi feita uma análise comparativa dos principais aspectos técnicos e econômicos entre as configurações mono tecnológicas e híbridas.

Na figura 40 é possível comparar, lado a lado, a energia elétrica gerada anualmente pelas Configurações 5 a 8 (híbridas) com aquela gerada pelas Configurações 1 a 4 (que utilizam um único tipo de tecnologia).

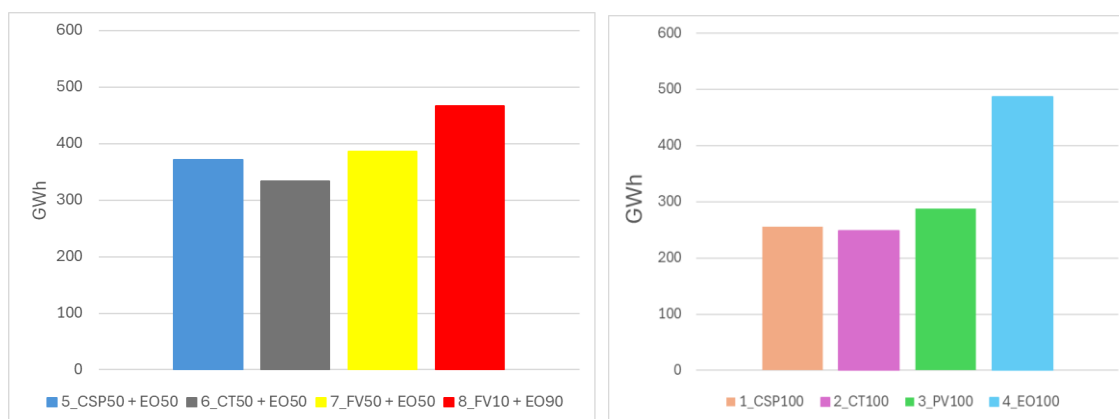


FIGURA 40 - COMPARATIVO EEA

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que as configurações híbridas apresentam valores maiores do que as configurações individuais de 1 a 3, que utilizam apenas recursos solares.

A Configuração 4, que é 100% eólica é aquela com a maior produção anual de energia, com valor bem próximo do referente à Configuração 8, que também é predominantemente eólica.

A figura 41, mostra lado a lado, a potência elétrica média mensal para cada uma das configurações analisadas e os respectivos fatores de capacidade.

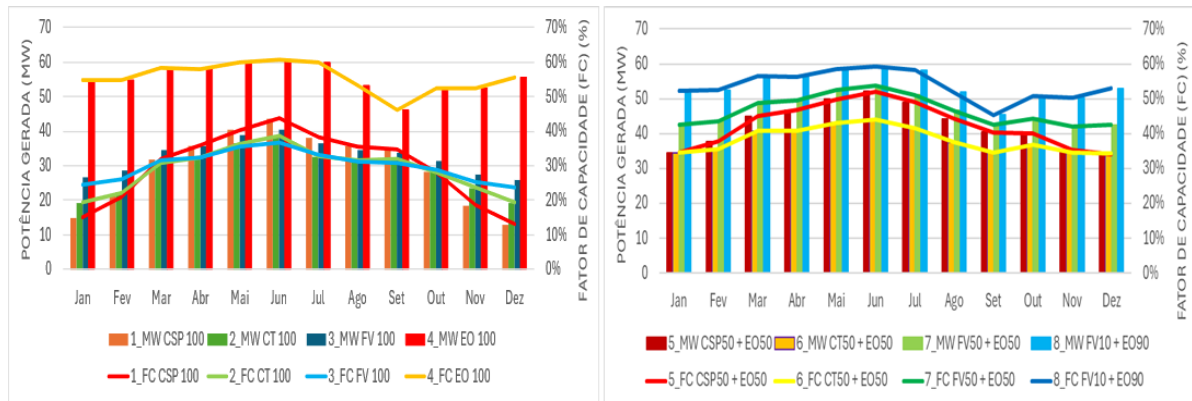


FIGURA 41 - COMPARATIVO POTÊNCIA MENSAL E FATOR DE CAPACIDADE

FUNTE DE DADOS: SAM

Fica evidenciado que as Configurações híbridas 5 a 7 apresentam valores médios mensais de potência mais estáveis (horizontais) ao longo dos meses do que as Configurações 1 a 3 com um único tipo de tecnologia.

As Configurações 1 e 8 apresentam curvas de potência bem parecidas uma vez que a única diferença entre elas é que a primeira tem 100% de geração eólica enquanto a outra tem 90% de geração eólica, mais 10% de geração fotovoltaica.

A queda de potência que pode ser observada no mês de setembro, e que é mais intensa nas Configurações 4 e 8 (com 100% e 90% de parcela eólica) são causadas pela menor velocidade média nos ventos neste mês. A figura 42, que foi elaborada com informações da base de dados do SAM, mostra este aspecto.

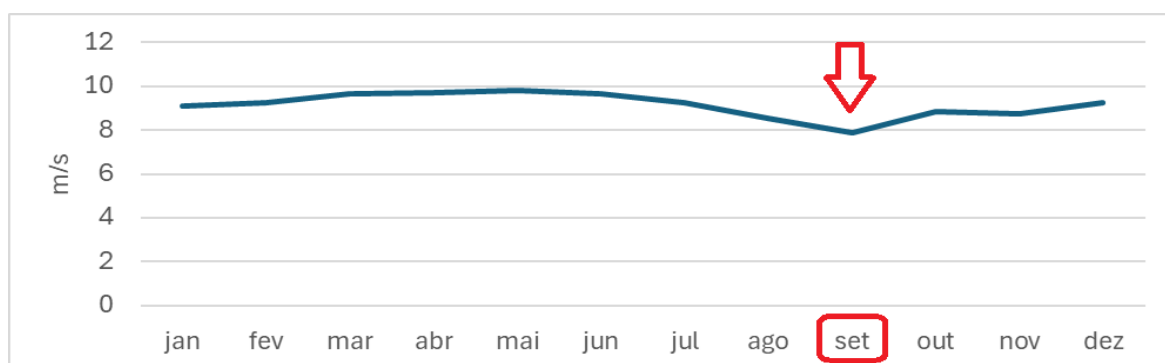


FIGURA 42 - VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS

FUNTE DE DADOS: SAM

Os fatores de capacidade das Configurações híbridas 5 a 7 são maiores do que os das Configurações 1 a 3 com um único tipo de tecnologia.

As Configurações 4 e 8 apresentam fatores de capacidade parecidos uma vez que a única diferença entre elas é a troca de 10% de geração eólica por 10% de geração fotovoltaica.

A figura 43, mostra lado a lado, os valores do CAPEX e LCOE para cada uma das configurações analisadas.

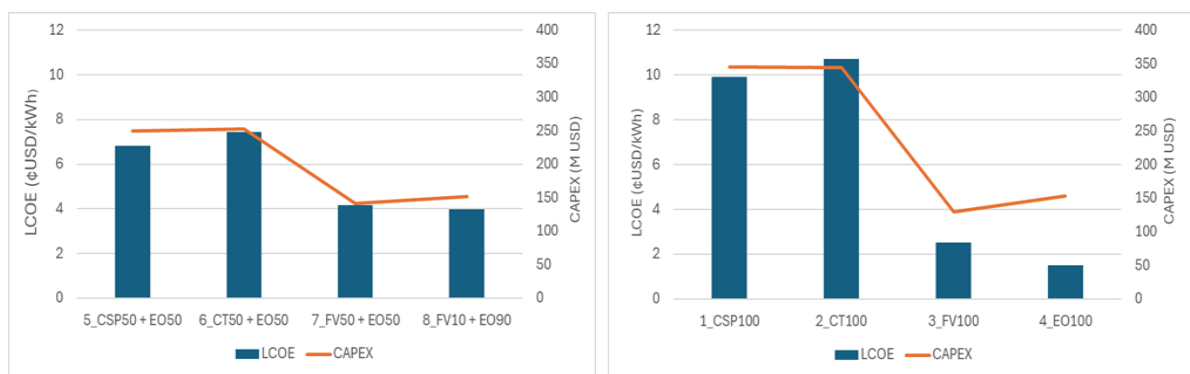


FIGURA 43 - COMPARATIVO CAPEX E LCOE

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que as Configurações 4 e 3 são as que apresentam os menores valores de LCOE, o que se justifica por serem elas as que têm o menor CAPEX associado a um bom volume de energia gerado.

Observa-se também que o LCOE das Configurações 1 e 2 reduziu ao se adicionar recursos eólicos a estas tecnologias nas Configurações 5 e 6. A justificativa se baseia no maior volume de energia produzido.

A figura 44, mostra lado a lado, as áreas necessárias para captação dos recursos solares e/ou eólicos para cada uma das configurações analisadas.

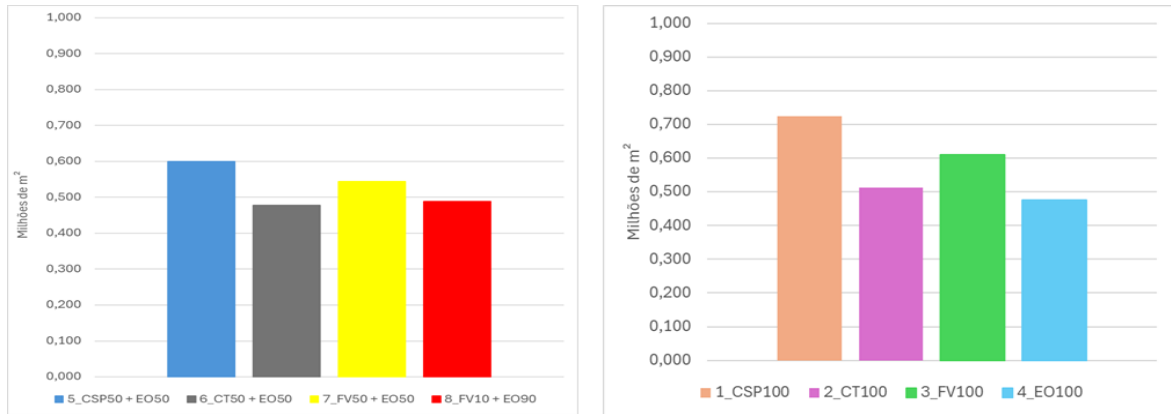


FIGURA 44 - COMPARATIVO ÁREAS RECURSOS METEOROLÓGICOS

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que as áreas requeridas pelas Configurações 4 e 6 são as menores, com vantagem para a configuração puramente eólica.

Observa-se ainda que ao se agregar recursos eólicos às configurações que só utilizavam recursos solares as áreas requeridas reduziram.

A figura 45, mostra lado a lado, os valores das áreas de terreno ocupadas por cada uma das configurações analisadas.

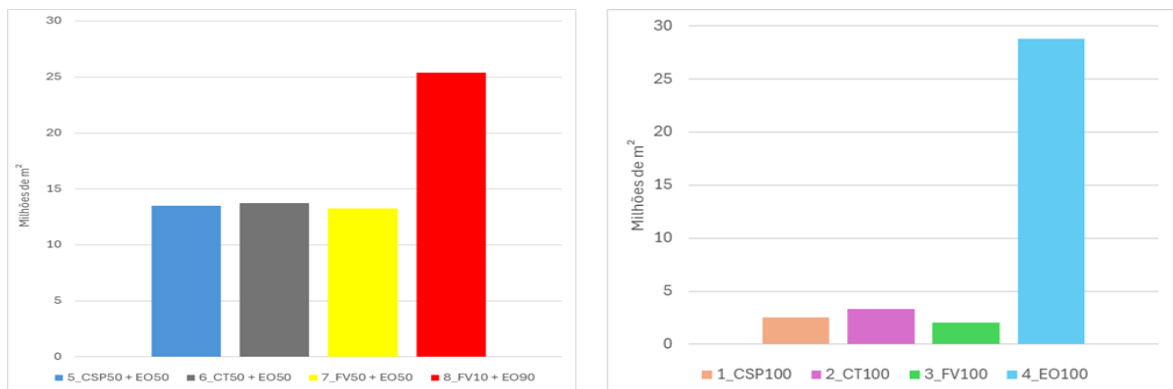


FIGURA 45 - COMPARATIVO ÁREAS DE TERRENO OCUPADAS

FONTE DE DADOS: SAM

Conforme apresentado na figura 45, a área de terreno necessária para instalação das configurações com parcela eólica é muito maior do que a requerida pelas demais. A justificativa é o espaçamento requerido entre turbinas e filas de turbinas para permitir a correta operação destes sistemas.

A figura 46, mostra lado a lado, os valores do VPL para cada uma das configurações analisadas.



FIGURA 46 - COMPARATIVO VPL

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que todas as configurações analisadas têm um VPL positivo, o que indica sua atratividade econômica pois indica que o investimento tem potencial para gerar retorno financeiro e criar valor.

Fica evidenciado que as configurações híbridas têm VPL bem maior do que as mono tecnológicas e que existe uma grande diferença no VPL da Configuração 8 em relação às demais.

A figura 47 mostra os valores da Eficiência Global para cada uma das configurações analisadas.

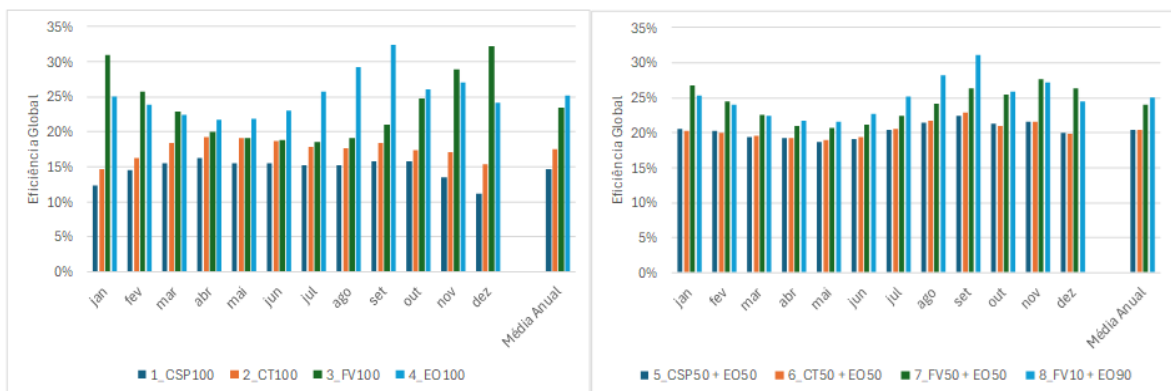


FIGURA 47 - COMPARATIVO EFICIÊNCIA GLOBAL

FONTE DE DADOS: SAM

Observa-se que as configurações híbridas (5 a 7) analisadas têm uma Eficiência Global maior do que as configurações 1 a 3. A justificativa dos valores maiores é a adição da parcela eólica que tem o maior valor de Eficiência Global dentre todas. As Configurações 4 e 8 têm praticamente o mesmo valor de Eficiência Global, o que se justifica por terem praticamente o mesmo percentual eólico (100% e 90%).

Um resumo destas comparações está apresentado na figura 48.

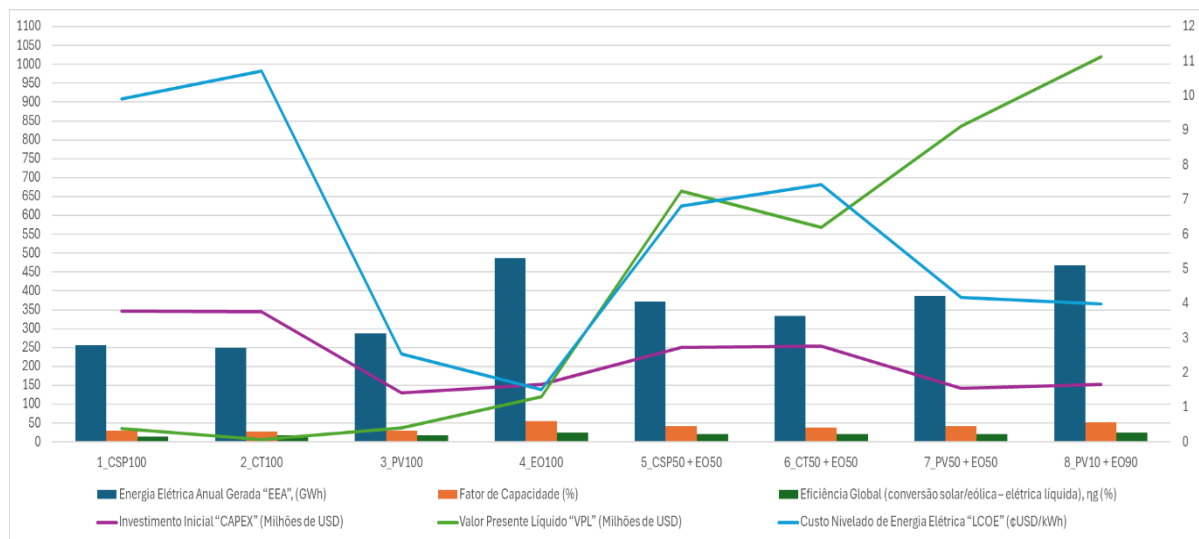


FIGURA 48 - COMPARATIVO ENTRE PRINCIPAIS RESULTADOS

FONTE DE DADOS: SAM

4.4. Complementaridade de recursos solares e eólicos nas configurações híbridas

Diante dos resultados obtidos com as simulações foi feita a análise das vantagens e/ou desvantagens, advindos da complementaridade de recursos solares e eólicos, no local escolhido para as plantas.

A figura 49 apresenta as curvas das médias anuais horárias de geração elétrica das Configurações 5 a 8 (híbridas).

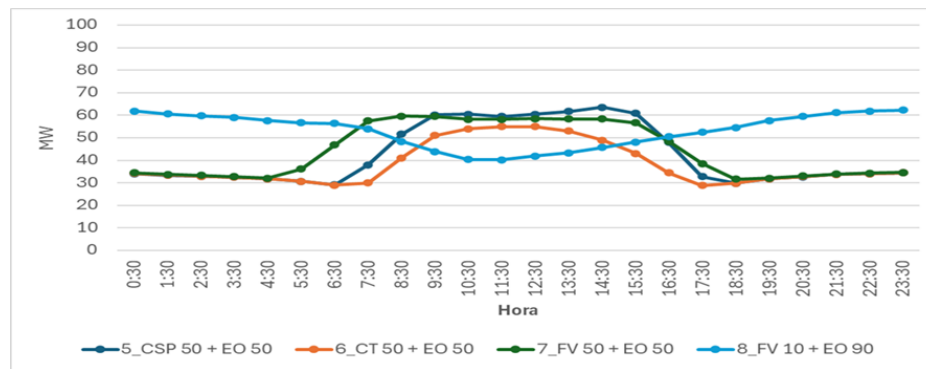


FIGURA 49 - POTÊNCIA MÉDIA ANUAL HORÁRIA

FUNTE DE DADOS: SAM

As Configurações 5 a 8 geram energia elétrica durante todas as horas do dia, com valores que variam conforme indicado na mesma figura 48.

A justificativa está no fato de que como a geração de energia elétrica acompanha o perfil dos recursos meteorológicos a complementaridade destes torna possível a complementaridade da geração de energia elétrica, se utilizadas fontes solares e eólicas em uma mesma configuração.

Dentre as configurações analisadas a que apresenta a maior linearidade do valor de potência disponibilizada é a Configuração 8, que considera 10% de geração fotovoltaica e 90% de geração eólica.

A Configuração 7, que considera 50% de geração fotovoltaica e 50% de geração eólica, apresenta um perfil menos linear do que a Configuração 8, se assemelhando mais com as Configurações 5 e 6, que também consideram a mesma proporção de contribuição solar/eólica da Configuração 7.

Em alguns horários do dia as Configurações 5, 6 e 7 entregam uma potência maior do que a da Configuração 8, porém fora destes horários entregam uma potência menor.

Ainda com base na figura 49, fica evidenciado que a hibridização das configurações de geração de energia elétrica, em locais onde exista complementaridade de recursos solares e eólicos, favorece a geração mais linear de potência elétrica, ao longo das horas do dia. A maior ou menor linearidade está relacionada com a proporção de cada recurso utilizado, aumentando, neste local, nos casos com maior contribuição dos recursos eólicos, como pode ser observado na comparação entre as Configurações 7 e 8.

A potência máxima gerada pela Configuração 8 (híbrida) é um pouco menor do que a gerada pela Configuração 4 que usa apenas recursos eólicos, porém a linearidade ao longo do dia é bem melhor. O motivo deste valor menor é que como foi adotada a premissa de se manter a potência de todas as configurações em 100 MWe, a Configuração 8 tem menor capacidade eólica (90 MWe) do que a Configuração 4 (100 MWe).

Foi feita a mesma análise para as Configurações 5 a 7 e observou-se que a potência máxima gerada por cada uma delas foi menor do que a gerada pelas Configurações 1 a 3, porém sem deixar de gerar energia elétrica em nenhum horário do dia.

Neste caso o motivo destes valores menores é que como foi adotada a premissa de se manter a potência de todas as configurações em 100 MWe, as Configurações 5 a 7 têm menor capacidade solar (50 MWe) do que as Configurações 1 a 3 (100 MWe). Os aspectos referentes a maior linearidade de geração das Configurações 5 a 7 são os mesmos mencionados em relação às Configurações 4 e 8.

O impacto da complementaridade em uma configuração híbrida com 50% de cada tecnologia pode ser observado na figura 50.

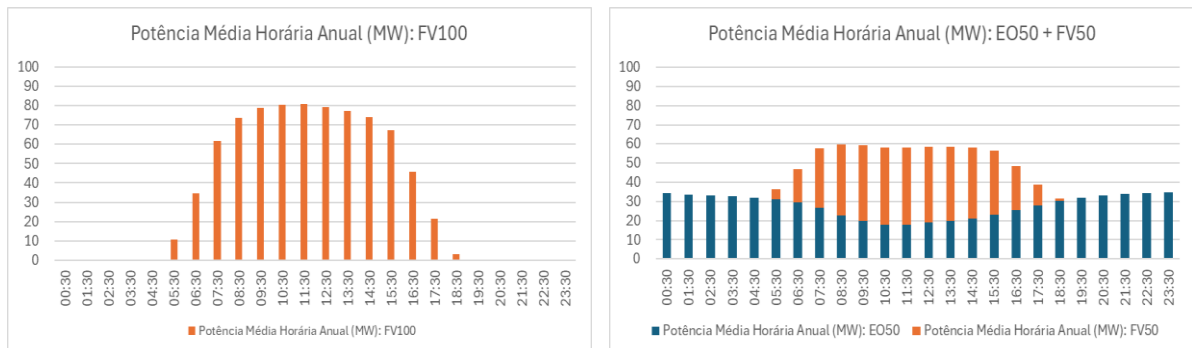


FIGURA 50 – COMPLEMENTARIDADE CONFIGURAÇÃO 7

FONTE DE DADOS: SAM

Do lado esquerdo da figura 50 é apresentado o perfil da potência média anual horária para uma configuração totalmente fotovoltaica, enquanto do lado direito desta mesma figura é apresentado o perfil para uma configuração híbrida, fotovoltaica e eólica.

O impacto da complementaridade em uma configuração híbrida com 10% de uma tecnologia e 90% de outra pode ser observado na figura 51.

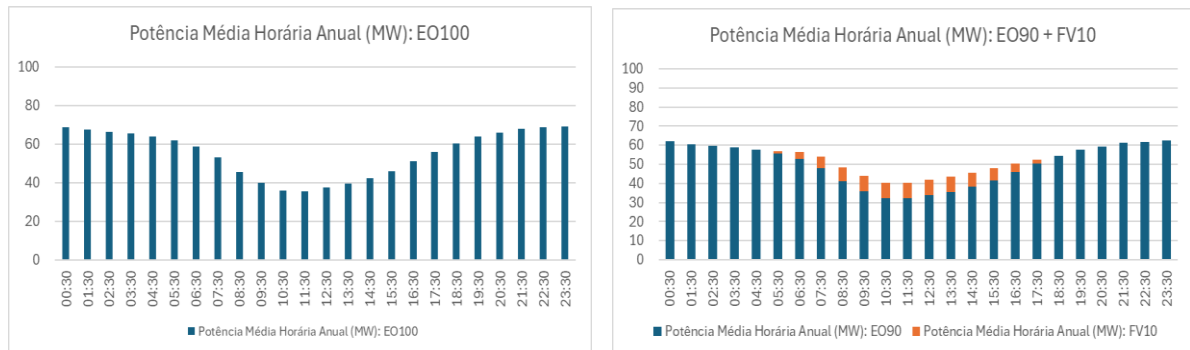


FIGURA 51 - COMPLEMENTARIDADE CONFIGURAÇÃO 8

FONTE DE DADOS: SAM

Do lado esquerdo da figura 51 é apresentado o perfil da potência média anual horária para uma configuração totalmente eólica, enquanto do lado direito desta mesma figura é apresentado o perfil para uma configuração híbrida, fotovoltaica e eólica. Para estas proporções de cada uma das tecnologias o impacto da complementaridade é menor.

De forma a avaliar qual seria a melhor solução, dentre as configurações híbridas apresentadas, foi feita uma análise de alguns fatores que normalmente são decisivos nesta escolha, conforme apresentado na figura 52.

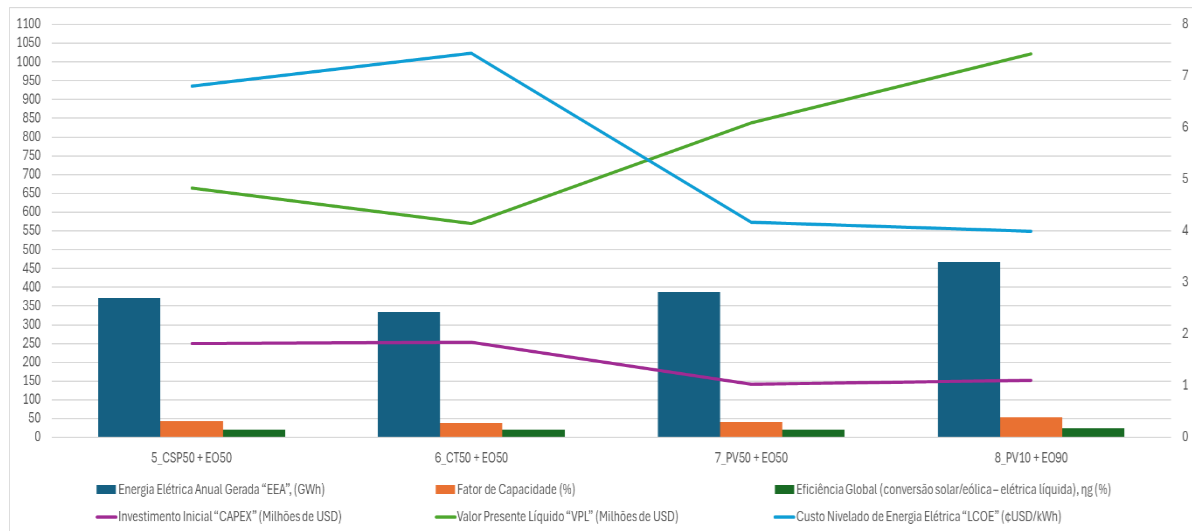


FIGURA 52 - INTEGRAÇÃO SOLAR + EÓLICA

FONTE DE DADOS: SAM

Em cinco das seis avaliações a Configuração 8 se apresentou como a mais atrativa, com o maior volume anual de energia elétrica gerada, o maior fator de capacidade, a maior eficiência global, o menor LCOE e o maior VPL.

5. CONCLUSÃO

A simulação de várias configurações utilizando distintas tecnologias possibilitou a visualização de vários aspectos referentes a cada uma delas e a combinação entre elas, conforme apresentado na figura 48.

As Configurações 4 (100% eólica) e 8 (90% eólica) se destacaram pelo maior volume de energia gerada em base anual, maior fator de capacidade, maior eficiência global e menor LCOE em relação às demais configurações.

As Configurações 1 e 2 (termosolares) foram as que apresentaram os menores volumes de energia gerada em base anual e os maiores valores de LCOE e CAPEX em relação às demais configurações. Os valores de LCOE e CAPEX destas duas configurações são muito maiores do que os da Configuração 3 (fotovoltaica) que também utiliza recursos solares. A análise mais aprofundada desta diferença pode ser um aspecto interessante a ser estudado no futuro, com o objetivo de melhor entender se há relação com a não utilização de armazenamento térmico nas configurações termosolares.

As configurações híbridas analisadas apresentaram curvas de potência mais lineares do que a das configurações com um único tipo de tecnologia. A complementaridade dos recursos solares e eólicos foi o fator responsável por esta maior linearidade.

A maior linearidade na geração de energia elétrica se assemelha ao que se obtém quando se utiliza armazenamento de energia, térmico ou em baterias.

As vantagens da Configuração 8 em relação à Configuração 4 foram a maior linearidade no valor horário de potência gerada e o VPL muito maior, na verdade o maior dentre todas as configurações analisadas.

A maior linearidade da potência gerada pode ser um benefício em aplicações que requeiram potência o mais próximo possível de um mesmo valor durante as 24 horas do dia. O maior VPL indica a maior atratividade de retorno econômico da Configuração 8.

As principais desvantagens encontradas, da Configuração 8 em relação à Configuração 4, foram uma pequena redução no total anual de energia gerada e um aumento do LCOE, que mesmo assim se manteve menor do que o das outras configurações híbridas.

O benefício da complementaridade de recursos meteorológicos e do aumento da despachabilidade foi mais significativo nas configurações com predominância de recursos solares, devido a indisponibilidade destes recursos no período noturno, o que foi compensado pelo uso de recursos eólicos disponíveis neste mesmo período.

Nas configurações com predominância de recursos eólicos o maior benefício da integração observado foi a maior linearidade da geração elétrica devido ao suporte da geração solar no período diurno, compensando a redução dos recursos eólicos disponíveis neste mesmo período.

A geração eólica apresentou um peso maior nas configurações híbridas em função do perfil mais intenso de recursos energéticos advindos dos ventos quando comparado com a disponibilidade de irradiação solar. Uma melhor performance foi observada quando o percentual de contribuição eólico aumentou nas configurações híbridas simuladas.

Do ponto de vista econômico e de desempenho, dentre as configurações que utilizam recursos solares a que melhor se integrou com a eólica foi a fotovoltaica, apresentando os melhores resultados dentre todas.

A análise dos resultados das simulações indicou que a integração de tecnologias distintas, com uso de recursos solares e eólicos, em uma mesma configuração híbrida e em locais onde haja a complementaridade de recursos meteorológicos, pode ser uma boa opção, a nível de custos e flexibilidade, para manter o regime diário, contínuo e mais linear de geração de energia elétrica, sem necessidade de armazenamento térmico ou em baterias.

Uma análise comparativa entre a linearidade de geração obtida pela Configuração 8 e a linearidade proporcionada por uma outra configuração com um único tipo de tecnologia, porém com armazenamento de energia (térmico ou em baterias), pode ser um outro aspecto interessante a ser estudado no futuro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACORDO DE PARIS SOBRE O CLIMA - <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima> - 2015.

ABDUL HAI ALAMI et al. Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis - International Journal of Thermofluids – 2023.

AHMAD, A. et al. Parabolic trough solar collectors: A sustainable and efficient energy source. Materials Science for Energy Technologies, v. 7, p. 99–106, 1 Jan. 2024.

ASERI, T. K.; SHARMA, C.; KANDPAL, T. C. A techno-economic appraisal of parabolic trough collector and central tower receiver based solar thermal power plants in India: Effect of nominal capacity and hours of thermal energy storage. Journal of Energy Storage, v. 48, p. 103976, abr. 2022.

BRAVO, R.; FRIEDRICH, D. Integration of energy storage with hybrid solar power plants. Energy Procedia, v. 151, p. 182–186, out. 2018.

CHEN, H. H.; KANG, H.-Y.; LEE, A. H. I. Strategic selection of suitable projects for hybrid solar-wind power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 1, p. 413–421, Jan. 2010.

COUTO, A.; ESTANQUEIRO, A. Wind power plants hybridised with solar power: A generation forecast perspective. Journal of Cleaner Production, v. 423, p. 138793–138793, 1 out. 2023.

DE JONG, P. et al. Complementaridade das energias eólica e solar na Bahia. repositorio.ufba.br, 22 nov. 2017.

DING, Z. et al. Performance analysis of a wind-solar hybrid power generation system. Energy Conversion and Management, v. 181, p. 223–234, fev. 2019.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética - <https://www.epe.gov.br/>

FERRAZ DE ANDRADE SANTOS, J. A. et al. Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil. Utilities Policy, v. 67, p. 101084, 1 Dez. 2020.

GEDLE, Y. et al. Analysis of an integrated CSP-PV hybrid power plant. NASA ADS, v. 2445, p. 030009, 01 Maio 2022.

HAKIMI, M.; BANIASADI, E.; AFSHARI, E. Thermo-economic analysis of photovoltaic, central tower receiver and parabolic trough power plants for Herat city in Afghanistan. Renewable Energy, v. 150, p. 840–853, Maio 2020.

HASSAN, Q. et al. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. Results in Engineering, p. 101621, 23 Nov. 2023.

IEA – International Energy Agency – Disponível em <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/outlook-for-electricity>

IRENA - International Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook 2023. Disponível em www.irena.org.

NOAA - Average Wind Speeds - Map Viewer - Disponível em: <https://www.climate.gov/maps-data/dataset/average-wind-speeds-map-viewer>.

NOAA Solar Calculator - <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/>.

NREL – National Renewable Energy Laboratory – Disponível em: <https://www.nrel.gov/>.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico – Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>.

PRASHANTH, B. N.; PRAMOD, R.; KUMAR, G. B. V. Design and Development of Hybrid Wind and Solar Energy System for Power Generation. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 5, p. 11415–11422, 2018.

STANLEY, A. P. J.; KING, J. Optimizing the physical design and layout of a resilient wind, solar, and storage hybrid power plant. Applied Energy, v. 317, p. 119139, Jul. 2022.

SUMAYLI, H. et al. Integrated CSP-PV hybrid solar power plant for two cities in Saudi Arabia. Case Studies in Thermal Engineering, v. 44, p. 102835, 1 abr. 2023.

UNITED NATIONS – Acordo de Paris sobre o Clima - <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima> - 2015.

WEF – World Economic Forum – Disponível em

<https://www.weforum.org/agenda/2023/03/electricity-generation-renewables-power-ia/>

WIND RESOURCE MAPS AND DATA Disponível em: <<https://www.nrel.gov/gis/wind-resource-maps.html>>.

XIAO, G. et al. Performance analysis of a solar power tower plant integrated with trough collectors. *Applied Thermal Engineering*, v. 214, p. 118853–118853, 1 Set. 2022.

YANG, H.; WEI, Z.; CHENGZHI, L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. *Applied Energy*, v. 86, n. 2, p. 163–169, Fev. 2009.

YANG, Y. et al. Operation optimization strategy for wind-concentrated solar power hybrid power generation system. *Energy Conversion and Management*, v. 160, p. 243–250, Mar. 2018.