



Comparativo da análise de desempenho energético em usinas fotovoltaicas de solo com estrutura *tracker* e fixa

Sandro Roriz Coelho^a <https://orcid.org/0009-0001-3950-2927>

Beatriz Barbosa Franco Ramos^a <https://orcid.org/0009-0009-1713-8069>

Márcio Zamboti Fortes^a <https://orcid.org/0000-0003-4040-8126>

Gustavo de Moraes Azeredo^b <https://orcid.org/0009-0004-5466-7860>

^a Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

^b Universidade Federal Fluminense - UFF, Mestrado Profissional em Montagem Industrial, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: A integração de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, particularmente a energia solar fotovoltaica, tem sido fundamental para atender à crescente demanda energética nacional. Esta transição, apesar de impulsionada pelos benefícios ambientais e econômicos da energia solar, ainda enfrenta desafios para sua consolidação como uma alternativa confiável devido às incertezas e variáveis estocásticas observadas no comportamento do recurso solar, influenciado diretamente por fatores meteorológicos. Além disso, a rápida evolução das tecnologias no setor dificulta a avaliação precisa do desempenho dos sistemas e das perdas associadas. Este artigo propõe soluções para tais desafios ao analisar e comparar o desempenho energético de duas usinas pertencentes a um mesmo complexo fotovoltaico no interior do estado do Rio de Janeiro. Essas usinas possuem topologias distintas para captar a irradiação solar: uma com estrutura fixa e módulos monofaciais, e outra com estrutura *tracker* e módulos bifaciais. Utilizando dados de projeto e de geração mensal durante o primeiro semestre de operação do complexo, foram realizadas simulações por meio do software PVSyst e comparações com dados reais levantados em campo. Os resultados indicaram um discreto aumento na geração de energia, aproximadamente 2% maior ao empregar o sistema *tracker* em comparação com o sistema de estrutura fixa. No entanto, observou-se ganhos consideráveis na eficiência da conversão fotovoltaica e no dimensionamento da instalação ao aplicar este tipo de tecnologia de rastreamento solar, o que contribui para a compreensão do desempenho e eficiência das diferentes tecnologias em usinas fotovoltaicas e permite a otimização de futuros projetos e operações no campo da energia solar.

Palavras-chave: geração distribuída, sistema *tracker*, eficiência energética.

Abstract: Integrating renewable sources into Brazil's electrical grid, particularly photovoltaic solar energy, has been fundamental in meeting the nation's growing energy demand. Despite being driven by solar energy's environmental and economic benefits, this transition still faces challenges in consolidating itself as a reliable alternative due to uncertainties and stochastic variables observed in solar resource behavior directly influenced by meteorological factors. Furthermore, the rapid evolution of technologies in the sector makes it difficult to assess system performance and associated losses precisely. This article proposes solutions to these challenges by analyzing and comparing the energy performance of two plants within the same photovoltaic complex in the interior of Rio de Janeiro, Brazil. These plants have distinct topologies for capturing solar irradiation: one with a fixed structure and monofacial modules and another with a tracker structure and bifacial modules. Using project data and monthly generation data during the complex's first semester of operation, simulations were conducted using the PVSyst software and compared with field-gathered actual data. The results indicated a discreet increase in energy generation, approximately 2% higher when employing the tracker system than the fixed structure system. However, considerable gains were observed in photovoltaic conversion efficiency and installation sizing when applying this type of solar tracking technology. This contributes to understanding the performance and efficiency of different technologies in photovoltaic plants, enabling the optimization of future solar energy projects and operations.

Keywords: distributed generation, tracker systems, energy efficiency.

Como citar: COELHO, S. R., AZEREDO, G.M., FORTES, M.Z., RAMOS, B. B. F. **Comparativo da análise de desempenho energético em usinas fotovoltaicas de solo com estrutura *tracker* e fixa.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

Autor para contato: Sandro Coelho. E-mail: srcoelho@id.uff.br

Financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Conflito de interesse: Nada a declarar.

1 INTRODUÇÃO

Embora os dados mais recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL/2023) indiquem a predominância de fontes renováveis na matriz energética brasileira, o uso de combustíveis fósseis ainda é amplamente predominante no país. O emprego de petróleo, carvão e gás natural acarreta impactos ambientais e sociais significativos. Esses combustíveis são responsáveis pelas mudanças climáticas devido às emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), além de contribuírem para o aquecimento global e aumentarem a dependência econômica, em virtude da vulnerabilidade aos preços do petróleo e gás natural. Tais fatores geram consequências importantes para a economia global e instabilidade em regiões produtoras desses recursos.

Diante desse cenário, é cada vez mais necessário reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, a fim de mitigar os impactos ambientais e diversificar a matriz energética brasileira, devido à crescente demanda por energia. Uma solução encontrada é a promoção das fontes de energia renovável, sendo a energia solar fotovoltaica uma das mais promissoras e que apresentou maior crescimento no mercado nacional durante os últimos anos (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica/ABSOLAR, 2023). Isso se deve, em grande parte, às vantagens significativas apresentadas, como a localização geográfica privilegiada do Brasil (Global Solar Atlas/GSA, 2023), próximo à linha do Equador, permitindo altos níveis de radiação solar durante todo o ano, e às extensas áreas de terra disponíveis, o que o torna um local propício para o desenvolvimento de projetos de energia solar fotovoltaica.

Nesse contexto, um elemento importante no desenvolvimento de usinas solares é a adoção de tecnologias que visem melhorar a eficiência e o desempenho dos sistemas. Uma dessas tecnologias é a utilização de rastreadores solares, também conhecidos como *trackers*. Esses sistemas automatizados permitem que os módulos solares fotovoltaicos acompanhem o movimento do sol ao longo do dia, aumentando a eficiência global de geração, mantendo os painéis perpendicularmente à radiação direta na maior parte do tempo e, conseqüentemente, captando uma maior quantidade de irradiação, resultando em uma maior produção de eletricidade. Isso se traduz em um aproveitamento mais eficiente da área ocupada pela usina, tornando-a mais competitiva no mercado de energia.

No entanto, também existem usinas solares que empregam módulos solares fotovoltaicos fixos em uma única posição. Embora não ofereçam o mesmo nível de eficiência que as usinas com *tracker*, elas são mais simples e menos dispendiosas de serem instaladas e operadas. Além disso, os módulos fixos têm uma manutenção mais fácil e requerem menos componentes móveis, o que reduz o risco de falhas mecânicas e aumenta a vida útil do sistema (Verma *et al.*, 2020).

A Figura 1 ilustra as curvas de irradiância global incidente em um módulo fotovoltaico fixo e em um módulo com seguidor solar *tracker*, em condição de céu limpo, ou seja, sem nuvens. A análise desta Figura permite constatar que o seguidor solar possibilita a captação de uma maior irradiância nas primeiras e últimas horas do dia, momentos em que o ângulo de incidência de um sistema com seguidor solar é menor em comparação a um sistema fixo.

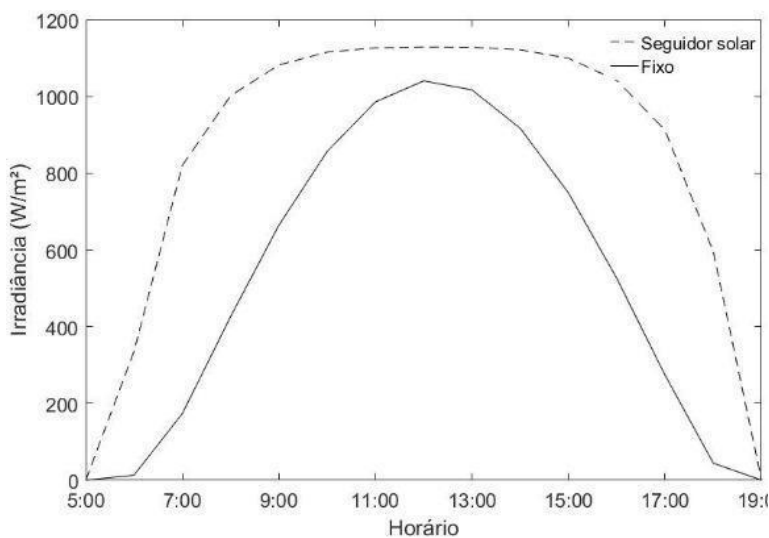


Figura 1. Curvas de irradiância globais incidentes em um painel fotovoltaico fixo e com seguidor solar em condição de céu limpo.

Fonte: o autor.

A utilização de seguidores de um eixo pode resultar em um aumento de até 25% na produção de energia, enquanto seguidores de dois eixos podem proporcionar um acréscimo de até 35%, dependendo das condições geográficas do local de instalação e da configuração do sistema (Singh *et al.*, 2018). No entanto, é importante ressaltar que os custos dos equipamentos e da manutenção do sistema também se elevam. Diante dessa consideração, torna-se

imprescindível realizar uma análise comparativa entre sistemas fotovoltaicos com estrutura fixa e sistemas com seguidores solares.

Desse modo, este artigo tem como principal objetivo comparar o desempenho energético de duas usinas solares fotovoltaicas localizadas no interior do estado do Rio de Janeiro. Ambas possuem a mesma potência instalada, distinguindo a topologia adotada entre elas, onde a primeira possui módulos bifaciais e estrutura com *tracker* e a segunda módulos monofaciais e estrutura fixa.

Ao longo deste artigo, serão apresentados os estudos de casos mostrando a localização dos sistemas, assim como alguns dados meteorológicos relevantes, informações elétricas dos sistemas, dados simulados de geração, obtidos através do *software* fotovoltaico *PVSyst* e informações sobre o desempenho real das usinas solares com e sem *tracker*. A análise comparativa dessas abordagens permitirá avaliar aquela que possui melhor eficiência, considerando aspectos técnicos e ambientais.

2 METODOLOGIA

2.1 Características climáticas da região

Como o presente artigo propõe comparar o desempenho de dois sistemas fotovoltaicos (PV) distintos, como referido anteriormente, o primeiro com estrutura solar fixa e módulos monofaciais, e o outro com mecanismo de seguidor solar utilizando a estratégia de seguimento azimutal de mobilidade de um eixo, para a direção Leste-Oeste e módulos bifaciais. Então, é fundamental conhecer primeiramente a região onde esses sistemas foram instalados. Sendo assim, procurou-se fontes de informações especializadas em dados meteorológicos, a fim de se obter informações a respeito da região em estudo. Escolheu-se a base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023) utilizando como critérios: a densidade da rede de medição, a homogeneidade dos sensores, séries temporais relativamente mais longas e poucas falhas nas séries temporais. De todas as estações do INMET, selecionaram-se 39 localizadas no Estado do Rio de Janeiro e adjacências, ou seja, alguns municípios dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo para prover a continuidade física da irradiação solar no processo de interpolação e mapeamento.

Observou-se nesses dados o índice de irradiação solar, que define a exposição de radiação solar por unidade de área durante uma quantidade de tempo. Tal exposição é medida por Wh/m². De acordo com dados do INMET (2023), O Brasil é um dos países com maior incidência de raios solares ao ano, especialmente os estados da região Nordeste, que apresentam os maiores valores de irradiação solar global (relação entre maior média e menor variabilidade). A média no país fica entre 4.500 Wh/m² e 6.300 Wh/m².

O mapa solar apresentado na Figura 2 mostra a estimacão da irradiação solar em comparacão à média mensal dos valores típicos diários no estado do Rio de Janeiro, também chamada de média diária mensal. Para se obter esses valores, foi observado o comportamento típico dos fenômenos ao longo do ano. Um dos parâmetros mensurados pelo INMET nas suas estações e adotado nesse artigo é a irradiação solar global. Na Figura 2 é possível observar a imagem do índice de irradiação solar global média anual no estado do RJ.

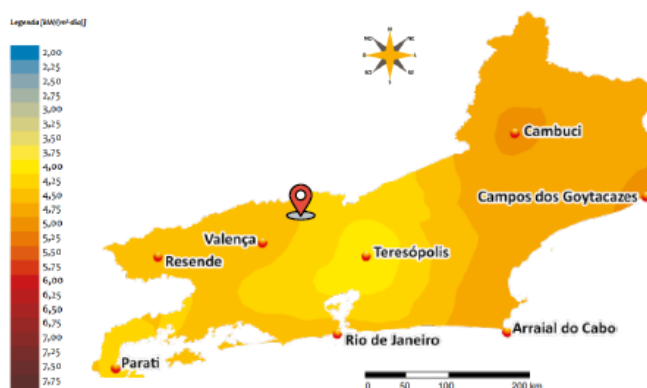


Figura 2. Irradiação solar global média no estado do Rio de Janeiro e a localização do complexo fotovoltaico cenário deste trabalho.

Fonte: o autor.

O marcador geográfico na Figura 2 está localizado próximo ao município de Vassouras, denominado Andrade Pinto (localização definida pelas coordenadas geográficas: -21.7824, -43.3504), região onde as usinas foram instaladas. Devido à região de baixa latitude e, portanto, à proximidade do equador, não há grandes mudanças na posição do sol ao longo do ano, ou horas de sol por dia.

Interpretando a Figura 2, é possível observar, de acordo com a escala de cores, que a irradiação solar global (*Global Horizontal Irradiation*, GHI) na região é elevada na maior parte do ano (entre 3,75 e 4,50 kW/(m²·dia)), tornando o local propício para a instalação de usinas solares, considerando altos níveis de irradiação ao longo do ano.

Como o estudo deste artigo será a longo prazo, é importante observar outras previsões temporais característica da região relacionadas ao índice de irradiação solar. Uma delas é a irradiação global inclinada em ângulo ideal (GTI - *Global Tilted Irradiation*), que representa a soma média anual de irradiação global inclinada para módulos fotovoltaicos montados em ângulo ideal. A irradiação direta normal (DNI - *Direct Normal Irradiation*) é aquela que não sofre alteração em sua trajetória ao atingir a superfície do planeta. E por último, a irradiação difusa horizontal (DIF - *Diffuse Irradiance*) é aquela que chega à superfície da Terra, mas que sofreu alteração em sua trajetória por processo de reflexão ou espalhamento. Ela pode chegar à superfície em qualquer direção. A Tabela 1 representa os resultados encontrados para as previsões temporais na região de Vassouras (RJ).

Tabela 1. Dados de irradiação em (Wh/m²) para o município de Vassouras, estado do Rio de Janeiro.

Mês	GHI	GTI	DNI	DIF
<i>Jan</i>	5792	5226	4432	2469
<i>Fev</i>	6082	5819	5386	2190
<i>Mar</i>	4983	5168	4068	2102
<i>Abr</i>	4383	4989	4273	1752
<i>Mai</i>	3596	4399	3854	1465
<i>Jun</i>	3388	4340	4131	1302
<i>Jul</i>	3484	4379	4058	1339
<i>Ago</i>	4290	5063	4787	1572
<i>Set</i>	4544	5063	3828	1896
<i>Out</i>	4963	4851	3603	2253
<i>Nov</i>	5071	4683	3155	2544
<i>Dez</i>	5745	5120	4077	2611

A efeito comparativo, a Alemanha, que é o país que mais explora a energia fotovoltaica em todo o mundo, recebe aproximadamente 40% menos luz solar em sua região de maior potencial, em comparação com a incidência solar brasileira (ABSOLAR, 2023). Apesar das variações regionais de irradiação, a região Sul do Brasil, que se encontra como a região de

menor captação solar, ainda sim recebe a média de 5,0 kWh/m² por ano de incidência solar, valor acima do registrado em países como a Alemanha (Souza, 2013).

2. 2 Características climáticas da região

Para dar continuidade ao artigo, foi observado um complexo fotovoltaico recém-instalado na região mencionada anteriormente, no município de Vassouras. Esse complexo é subdividido em miniusinas de geração de energia e possuem no mesmo território topologias distintas para cada usina. Dentro das unidades instaladas no complexo, foi priorizado unidades que apresentassem maior proximidade, para conservar valores meteorológicos e de irradiação solar e potências instaladas semelhantes. Diante disso, foram observadas duas usinas com topologias distintas. A usina fotovoltaica A possui módulos monofaciais e estrutura fixa, com potência nominal instalada de 200kW e 760 módulos monocristalinos de 345Wp cada, totalizando 262,20 kWp. A usina foi instalada em terreno nivelado sobre estrutura de aço galvanizado a 0,9m do solo e inclinados a 20° em relação ao plano horizontal, com face voltada ao norte verdadeiro. Estes módulos são agrupados em 38 arranjos ligados em série, denominados *strings*, e distribuídos entre dois inversores centralizados de potência 100kW, nos quais a energia gerada é convertida para corrente alternada e transmitida ao transformador geral da Planta.

Localizada a poucos metros de distância e apresentando mesma potência instalada, a usina fotovoltaica B, possui 380 módulos bifaciais com potência de 540Wp cada, distribuídos entre 24 *strings* para conexão em 4 inversores centralizados de 50kW, permitindo o aproveitamento do albedo do terreno, totalizando 205,20 kWp instalado. A Figura 3 representa uma imagem retirada do *software Google Earth* do local onde se encontra o complexo das usinas Vassouras, próximo ao Rio Paraíba do Sul.



Figura 3. Imagem aérea do complexo de Usinas em Vassouras (RJ).

Fonte: Google Earth (2023).

Localizada a poucos metros de distância e apresentando mesma potência instalada, a usina fotovoltaica B, possui 380 módulos bifaciais com potência de 540Wp cada, distribuídos entre 24 *strings* para conexão em 4 inversores centralizados de 50kW, permitindo o aproveitamento do albedo do terreno, totalizando 205,20 kWp instalado. A Figura 3 representa uma imagem retirada do software Google Earth do local onde se encontra o complexo das usinas Vassouras, próximo ao Rio Paraíba do Sul.

Considerando o fato de que a Terra gira ao redor de seu eixo e orbita o Sol, se um módulo fotovoltaico estiver imóvel, a eficiência energética de absorção será significativamente menor em determinados momentos do dia e do ano. O uso de um sistema de rastreamento para manter o módulo perpendicular à incidência solar pode aumentar a energia coletada. Os resultados de experimentos apontam que a potência gerada pelo sistema com rastreamento é no total cerca de 10% a 40% a mais do que o sistema de ângulo fixo em geral (Hoffman *et al.*, 2018). Conseqüentemente, esse acréscimo de potência na saída do módulo solar aumenta a eficiência do sistema.

A Tabela 2 apresenta o resumo do levantamento de dados realizado nas usinas de ambas as configurações, fornecendo seus respectivos dimensionamentos e especificação dos equipamentos utilizados.

Tabela 2. Resumo das informações elétricas das usinas fotovoltaicas analisadas.

Configuração	Usina A	Usina B
Estrutura	Fixa	<i>Tracker</i>
Potência instalada (kW)	200	200
Potência-pico instalada (kWp)	265,2	205,2
Modelo do inversor	Canadian CSI-100K-T480	Canadian CSI-50K-T500
Potência do inversor (kW)	100	50
Quantidade de inversores instalados	2	5
Modelo dos módulos	Trina TSM- PE15H-345	Canadian CS6W- 540MB-AG
Potência dos módulos	345	540
Quantidade de módulos instalados	760	380
Configuração de arranjos (n° de arranjos x n° de painéis série)	38x20	20x16 + 4x15

A tecnologia de rastreamento solar aplicada à Usina B consiste na utilização de um *tracker* de modelo eixo único, com ângulo azimutal fixo, que possibilita a movimentação em sentido Norte-Sul dos arranjos fotovoltaicos instalados, permitindo o acompanhamento da trajetória Leste-Oeste realizada pelo Sol ao longo do dia. A movimentação das estruturas de suporte, denominadas mesas, é promovida a partir da operação de atuadores lineares elétricos, os quais garantem um ângulo de rastreamento total de $110^\circ (\pm 55^\circ)$.

O sistema *tracker* pode funcionar por meio de motores elétricos ou por sistemas de aproveitamento de gravidade, ambos métodos têm de ser aliados a um algoritmo de rastreamento de incidência solar para movimentar uma estrutura metálica que suporta os módulos fotovoltaicos. Não importando o tipo de *tracker*, os componentes essenciais para o seu funcionamento são: Um sistema de detecção solar, seja por sensores ou por controladores programados, e motores elétricos, que são responsáveis pela movimentação das estruturas e/ou dos módulos.

Sendo assim, na usina B, foram acoplados um motor elétrico a um atuador. Esse, por último, são dispositivos eletromecânicos gerais que capazes de converter o movimento rotacional de um motor elétrico em um movimento linear a partir de uma combinação de engrenagens e a aplicação em um eixo principal (Martins, 2017).

A Figura 4 representa, de forma geral, o esquema dos componentes do atuador utilizados na usina B. Os atuadores lineares são alimentados e controlados através de uma rede cabeada mista, incluindo circuito de força e comunicação via cabo RS485, a partir da qual recebem sinais de comando de um painel de comando centralizado, denominado *Control Box*, que pode executar o controle de até 10 atuadores distintos.

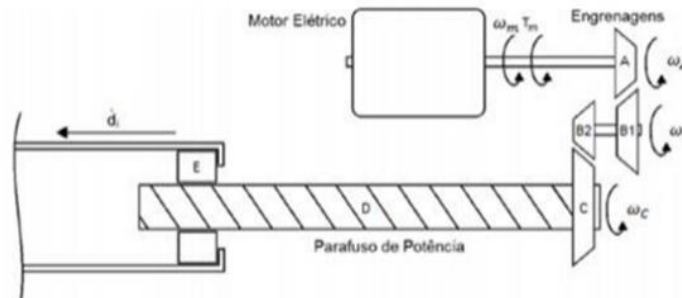


Figura 4. Esquema dos componentes do atuador linear acoplado ao motor.
Fonte: o autor.

Na usina B especificada, 14 atuadores são responsáveis pela movimentação das mesas com comando distribuído entre 2 *Control Boxes*. As *Control Boxes* são responsáveis pelo rastreamento solar das usinas *tracker* do complexo, e consistem em um sistema autoconfigurável baseado em um relógio astronômico, que dispensa a utilização de sensores e realiza comunicação com um sistema GPS integrado, o qual atualiza em tempo real dados horários e meteorológicos da localização onde a planta está instalada.

A comunicação de todas as *Control Boxes* da planta é controlada e supervisionada a partir de um painel central de comunicação, denominado *Master Boxes*, que ainda possibilita o acompanhamento em tempo real do funcionamento dos atuadores e permite a execução de comandos via protocolo *Modbus*. Esse protocolo é capaz de definir uma estrutura de mensagens compostas por *bytes*, reconhecida por diversos dispositivos no mercado, e estabelecer uma relação mestre-escravo entre os componentes (Nascimento, 2003)

Toda a estrutura responsável pela execução do rastreamento solar da planta foi desenvolvida e projetada pela fabricante Valmont Solar, garantindo um erro máximo de $\pm 2^\circ$ no ângulo *tracker* calculado em tempo real e um consumo médio de 10kWh/ano para cada atuador linear implementado.

Estando em fase final de implementação, o complexo ainda não possui sistema de monitoramento remoto para consulta à geração da usina, tanto para acesso a dados históricos quanto para acompanhamento em tempo real. Assim, para levantamento dos valores de energia gerada foram realizadas visitas mensais ao complexo, sendo registrados os dados medidos pelos inversores de ambas as usinas, que possuem memória interna capaz de armazenar dados de geração por até 12 meses.

As Tabelas 3 e 4 apresentam a relação de dados registrados durante os primeiros 6 meses de operação da usina, divididos por cada inversor consultado e apresentando um valor consolidado mensal por usina durante o ano de 2023.

Tabela 3. Dados levantados de geração mensal (kWh) da usina fixa A.

Mês	Inversor 1 (kWh)	Inversor 2 (kWh)	Total
<i>Jan</i>	2565	2400	4965
<i>Fev</i>	15874	12952	28826
<i>Mar</i>	18544	16917	35461
<i>Abr</i>	14902	12982	27884
<i>Mai</i>	15472	13511	28983
<i>Jun</i>	15188	12982	28170

Tabela 4. Dados levantados de geração mensal (kWh) da usina *tracker* B.

Mês	Inversor 3 (kWh)	Inversor 4 (kWh)	Inversor 5 (kWh)	Inversor 6 (kWh)	Total
<i>Jan</i>	1268	1343	1235	1215	5061
<i>Fev</i>	6210	10009	9221	4419	29859
<i>Mar</i>	4830	11307	8770	10968	35875
<i>Abr</i>	7295	7814	7380	6868	29357
<i>Mai</i>	7145	7018	7140, 0	7035	28338
<i>Jun</i>	6933	7563	6882	7552	28930

A partir dos dados de projeto coletados em campo durante as visitas mensais à planta, foi possível dar início à segunda parte da análise prevista pelo artigo, que consiste na comparação entre os valores de energia gerada e a geração prevista para ambas as configurações de usina presentes no complexo.

2.3 Simulações PVsyst

O *PVsyst* é um dos programas computacionais mais populares para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos do mercado. O programa é comercializado pela *PVsyst S.A.* com sede na Suíça, cuja especialidade é o desenvolvimento e distribuição de programas computacionais comerciais para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados. O programa dispõe de várias funcionalidades e ferramentas, tais como: simulação de produção de energia, avaliação econômica, pré-dimensionamentos, efeitos de sombreamentos, importação de dados meteorológicos e outras facilidades (Irwan *et al.*, 2015).

Devido à diversidade de programas computacionais que abrangem os sistemas fotovoltaicos nas suas diferentes configurações, este artigo irá se limitar a desenvolver simulações das usinas analisadas através do software fotovoltaico *PVsyst* para estimar a geração de energia. Além disso, será utilizado a base de dados solarimétricos *Meteonorm* que é um banco de dados, que contém valores para a radiação solar, temperatura e outras grandezas medidas. Os valores medidos são baseados em medições de longo prazo (por mais de 10 anos), realizadas pelos serviços de meteorologia oficial de cada país. Em todo o mundo, para cada local selecionado, o *Meteonorm* realiza uma interpolação espacial entre os valores medidos nas estações de medição mais próximas.

A interpolação leva em conta a altitude do local específico e a topografia do terreno. Para o Brasil, esta avaliação é baseada em dados de radiação do período de 1986 a 2005. Vale ressaltar que esta é uma das bases de dados disponíveis no *PVsyst*, sendo assim será adotada no desenvolvimento das simulações.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para iniciar a simulação da previsão de geração de energia das usinas, foram inseridos os dados levantados conforme solicitação pré-programada pelo *software*. O principal deles são as coordenadas geográficas do local onde as usinas estão localizadas para importar os dados meteorológicos necessários aos cálculos, além de solicitar as especificações dos equipamentos, como inversores e módulos fotovoltaicos utilizados. Atualmente, o programa

utiliza o banco de dados da versão 7.3 do software *Meteonorm*, que possui uma extensa quantidade de dados climáticos e de irradiância global.

Posteriormente, é necessário inserir os dados aplicados ao software, relacionados à configuração das usinas *tracker* e fixa, conforme especificado na Tabela 2. É levado em consideração dados relevantes ao projeto, como modo de ligação à rede externa, distribuição das mesas, especificação dos equipamentos utilizados e dados especiais, como a configuração bifacial dos módulos instalados em uma das usinas.

A partir dos dados apresentados, o *software* é capaz de processar os cálculos necessários para elaborar um diagrama de perdas ligadas à operação das usinas, possibilitando a análise da eficiência energética dos equipamentos utilizados e da própria conversão fotovoltaica realizada pelas usinas.

A Figura 5 ilustra os diagramas de perdas calculados pelo *software* para as usinas fixa e *tracker*. Eles são representados pelo diagrama de *Sankey*, que consiste em um tipo de diagrama de fluxo em que a largura das setas é proporcional à taxa desse mesmo fluxo. Então, as representações das setas na Figura 5 estão condicionadas à sua largura e a quantidade de perdas no sistema e em seus componentes.

A análise dos diagramas de perdas elaborados pelo software evidencia a diferença na eficiência da conversão fotovoltaica entre as configurações fixa e *tracker* uma vez que, salvo o ganho estimado de 0,7% originado a partir da aplicação dos módulos bifaciais, a usina que possui tecnologia de rastreamento solar apresenta ganho médio de 2,93% no aproveitamento da radiação solar incidente em relação à conversão apresentada pela usina fixa.

Esta diferença entre as eficiências de conversão fotovoltaica nas usinas selecionadas também pode ser observada no dimensionamento da relação quilowatt-pico/quilowatt (kWp/kW), onde é evidenciada a necessidade de ampliar a potência-pico instalada na usina fixa para atingir a mesma potência apresentada pela usina *tracker*.

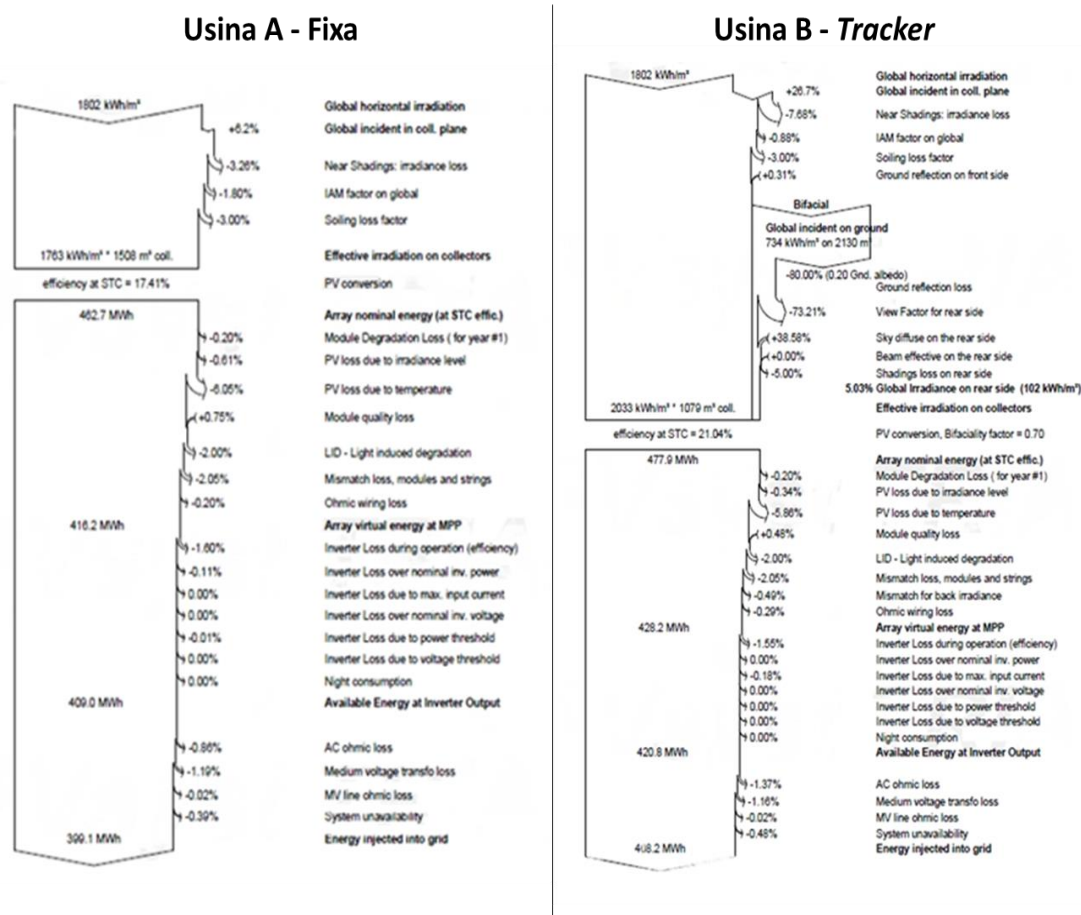


Figura 5. Diagrama de perdas das usinas fixa e tracker.

Fonte: o autor.

O resumo da comparação entre o dimensionamento da potência-pico instalada em ambas as usinas é apresentado a partir da Tabela 5, apresentando ainda sua relação com a eficiência de conversão fotovoltaica calculada através do *software*.

Tabela 5. Comparação entre a eficiência da conversão fotovoltaica entre as usinas de diferentes topologias.

Parâmetros	Usina A	Usina B	Diferença
Configuração	Fixa	Tracker	-
Potência-pico instalada (kWp)	262,2	205,2	-21,74%
Relação kWp/kW	1,31	1,02	-21,74%
Eficiência de conversão fotovoltaica	17,41%	20,34%	+2,9%

A partir do dimensionamento de perdas do sistema, também é possível calcular através do *software* os fatores de degradação atrelados à operação da usina para estimar as perdas de geração anuais dentro de um período pré-estabelecido de 25 anos, considerando que nenhum

dos componentes envolvidos seja substituído. As Figuras 7 e 8 apresentam os gráficos de perdas anuais para ambas as usinas selecionadas.

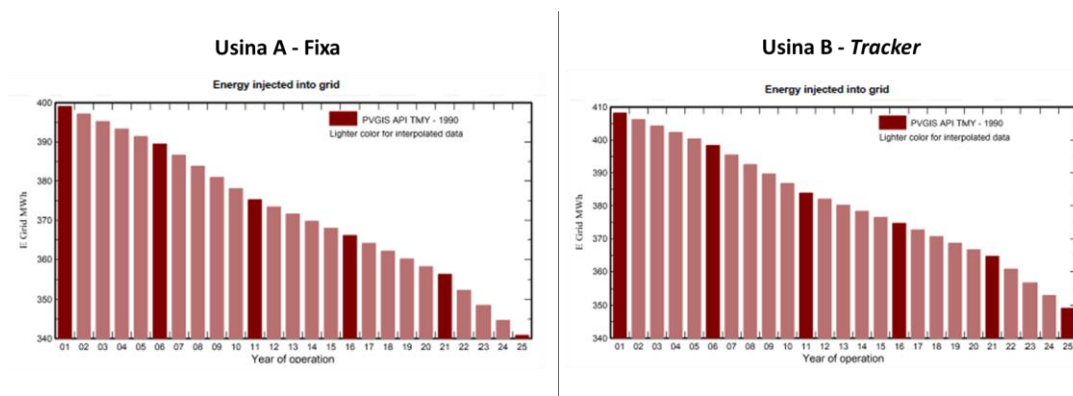


Figura 6. Diagrama de depreciação de energia ao longo de 25 anos para as usinas fixa e *tracker*.

Fonte: o autor.

Apesar de apresentar maiores perdas de eficiência e energia gerada devido à depreciação natural da instalação ao longo de sua vida útil, possivelmente atreladas ao desgaste de um número maior de componentes utilizados nesta configuração, as simulações ainda indicam que a usina *tracker* é capaz de manter uma geração de energia aproximadamente 2,4% maior em relação à entregue pela usina fixa após o período de 25 anos.

Com base no dimensionamento de perdas e eficiência energética apresentado, é possível realizar através do software os cálculos necessários para previsão da geração de energia mensal das usinas selecionadas. A Figura 7 apresenta a estimativa da energia média diária entregue por ambas as configurações, distribuída mensalmente ao longo de um ano de operação.

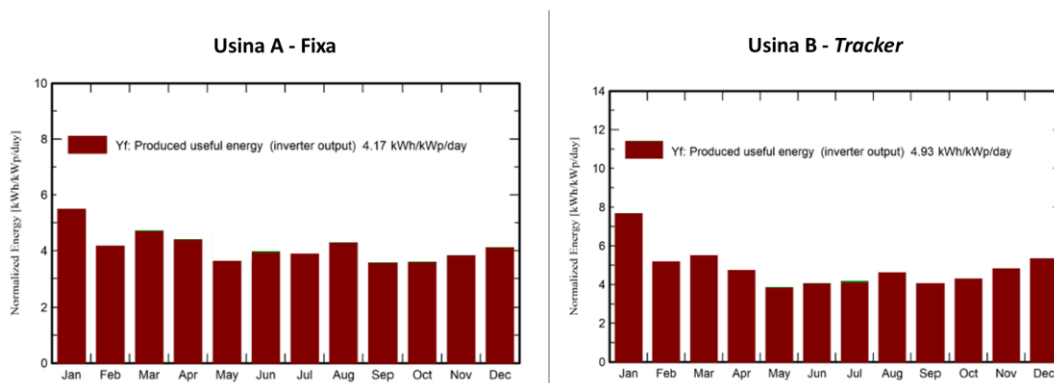


Figura 7. Simulação dos valores de geração prevista para as usinas fixa e *tracker*

Fonte: o autor.

A partir da previsão diária simulada, é possível estimar os valores de geração mensal e anual entregues pelas usinas. As Tabelas 6 e 7 foram elaboradas com base nos valores de energia mensal registrados localmente na planta comparados às estimativas realizadas pelo software, que apresentam índice de probabilidade igual a 95%, com margem de variabilidade de 1MWh/mês.

Tabela 6. Comparação entre valores de geração real e prevista para a usina fixa.

Mês	Geração Real (MWh)	Geração Prevista (MWh)	Diferença
Janeiro	4,97	4,04	19%
Fevereiro	28,83	28,47	1%
Março	35,46	35,41	0%
Abril	27,88	31,93	-14%
Mai	28,98	27,50	5%
Junho	28,17	28,56	-1%
Total	154,29	155,91	-1%

Tabela 7. Comparação entre valores de geração real e prevista para a usina *tracker*.

Mês	Geração Real (MWh)	Geração Prevista (MWh)	Diferença
Janeiro	5,06	4,89	3%
Fevereiro	29,86	31,02	-4%
Março	35,88	36,34	-1%
Abril	29,36	30,31	-3%
Mai	28,34	24,82	12%
Junho	28,93	26,66	8%
Total	157,42	154,05	2%

A comparação proposta possibilita confirmar que ambas as usinas apresentam performance média próxima ao estimado pelas simulações, evidenciando rendimento pouco superior da usina *tracker*, a qual apresentou resultados mais próximos ou superiores aos valores previstos.

A análise da geração prevista da usina fixa também indica valores ligeiramente superiores em relação aos apresentados pela usina *tracker* durante o início do outono no mês de abril. Este fato corrobora o dimensionamento do ângulo fixo aplicado às estruturas, seguindo a latitude do local, e aponta uma das desvantagens da ausência de regulagem do ângulo azimutal na usina *tracker*, diminuindo seu rendimento esperado durante as estações do outono e inverno.

Ao comparar diretamente a geração mensal de energia apresentada por ambas as usinas, percebemos valores maiores relacionados à operação da usina *tracker* que, apesar de discretos, seguem a média de 2 a 3% estimados a partir das simulações do fator de depreciação e dos cálculos de eficiência na conversão fotovoltaica. A Tabela 8 apresenta um comparativo final entre ambas as performances analisadas.

Tabela 8. Comparativo final entre usinas.

Parâmetros	Fixa	Tracker	Diferença (Tracker/Fixa)
Potência-pico dimensionada (kWp)	262,2	205,2	- 21,74%
Eficiência de conversão fotovoltaica	17,41%	20,34%	+ 2,9%
Geração anual de energia prevista após 25 anos (MWh)	340,8	349,1	+ 2,4%
Valores de geração de energia registrados no primeiro semestre de operação (MWh)	154,3	157,4	+ 2,0%

4 CONCLUSÕES

A energia solar fotovoltaica conquistou seu espaço na matriz energética brasileira e se tornou uma das fontes de geração de energia que mais cresce no país, dominando o mercado de geração distribuída nacional e incentivando a evolução do próprio setor.

Como produtos da evolução exponencial observada no setor, estão os diversos modelos de componentes disponíveis no mercado, apresentando um vasto leque de tecnologias e

potências disponíveis, e os diferentes métodos de instalação de novas usinas, os quais aperfeiçoam novos projetos a partir da otimização em sua eficiência e dimensionamento.

Ao analisar os resultados de performance do primeiro semestre de operação de um complexo fotovoltaico, que reúne em seu terreno usinas de mesma potência com tecnologias distintas de captação da irradiação solar, este artigo foi capaz de apresentar os principais pontos de melhoria e otimização do desempenho energético de usinas fotovoltaicas com a aplicação de sistemas de rastreamento solar.

A partir das simulações executadas, foi possível identificar diferenças consideráveis entre a eficiência da conversão fotovoltaica e as perdas anuais por depreciação nas usinas analisadas, indicando ganhos positivos no dimensionamento e operação a longo prazo das usinas que possuem tecnologia *tracker*.

Embora os ganhos concretos na geração de energia elétrica ainda se mostrem discretos durante o início de operação do complexo, variando entre 2% e 3% acima dos valores apresentados pela usina fixa selecionada, e distantes das médias comumente citadas pelo mercado, os resultados apresentados pela usina *tracker* durante o primeiro semestre de análise indicam bom desempenho em relação à performance prevista e maior confiabilidade de operação dentro de sua vida útil estimada.

Considerando o recente, e ainda curto, período de operação do complexo, o qual entrou em funcionamento há pouco mais de 6 meses, estudos mais aprofundados podem ser realizados para comparar as simulações realizadas neste artigo a medições de datas futuras, com tempo de operação das usinas superior a 1 ano, para execução de novas análises dos dados obtidos.

Para o aprofundamento da análise dos ganhos energéticos e de desempenho apontados, o estudo de viabilidade financeira da aplicação da tecnologia de rastreamento solar pode ser realizado, considerando custos adicionais intrínsecos, como maior aquisição de componentes e serviços de manutenção mais complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**, São Paulo, p. 1-1, 24 nov. 2023. Disponível em: <http://absolar.org.br/infografico-absolar.html>. Acesso em: 24 nov. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração. Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://bitly.com/ObWtP>. Acesso em: 22 out 2023.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **World Bank Group. PV Potencial Maps**. s.l. 2023. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download>. Acesso em: 27 out 2023.

HOFFMANN, F.; MOLZ, R.; KOTHE, J.; NARA, E.; TEDESCO, L. “Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels.” **Renewable Energy**, v. 115, p. 750-759, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.079>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados Meteorológicos**. S.l. 2023. Disponível em <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em 22 nov 2023.

IRWAN, Y.M.; AMELIA, A.R.; IRWANTO, M.; FAREQ, M., LEOW, W.Z.; GOMESH, N.; SAFWATI, I. “Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software.” **Energy Procedia**, v. 79, p. 596-603, nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.539>.

MARTINS, G. 2016. **Modelagem e Simulação de um Atuador Elétrico Linear**. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29781/29781.PDF>. Acesso em 20 out 2023.

MOREIRA JR., O.; SOUZA, C.C. “Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha.” **INTERAÇÕES**, Campo Grande, MS, v. 21, n. 2, p. 379-387, abr./jun. 2020. <https://doi.org/10.20435/inter.v21i2.1760>.

NASCIMENTO, J.; LUCENA, P. 2003. **Protocolo Modbus**. Disponível em: https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho3/trabalho3_13.pdf. Acesso em 21 nov 2023.

SINGH, R.; KUMAR, S.; GEHLOT, A.; PACHAURI, R. “An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review.” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82(3), p. 3263-3278, fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.018>

VERMA, B.D.; GOUR, A.; PANDEY, M. “A Review Paper on Solar Tracking System for Photovoltaic Power Plant.” **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 9(2), fev. 2020.

Contribuição dos autores: BR: Conceituação e redação inicial; GA: Conceituação e redação inicial; SC: Conceituação, aquisição de dados, análise inicial, redação inicial e final e apresentação do projeto; MF: Supervisão e análise formal.

Editores: Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.