

AVALIANDO O IMPACTO DAS VARIAÇÕES DO TERRENO NA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO, BRASIL

João Antonio Fernandes Gonçalves da Silva – j237409@dac.unicamp.br

Isabelle Ferreira Silva Nunes

Isaac Manoel da Silva Barros

Luiz Fernando Pinto de Oliveira

Denis Gustavo Fantinato

Tárcio André dos Santos Barros

Universidade Estadual de Campinas, Laboratório de Energia e Sistemas Fotovoltaicos - Marcelo Villalva (LESF-MV)

1.1. Recurso solar e meteorologia da radiação solar

Resumo. O setor fotovoltaico brasileiro busca suprir as necessidades de gerar energia limpa para amenizar os efeitos negativos emitidos por combustíveis fósseis. Embora haja muitos locais que possuem alta cobertura de radiação solar no Brasil, nem sempre são explorados por estarem em locais com terrenos que possuem grandes variações de relevos. O uso de software permite modelar diferentes componentes de um sistema fotovoltaico, como módulos, inversores, rastreadores solares, e calcular a geração de energia do sistema em diferentes condições. Tendo em vista que terrenos e relevos, mesmo em locais mais complexos, podem ser parametrizados via software para posicionar uma planta fotovoltaica, há uma tendência em aplicar tais projetos em simuladores. Desta forma, o objetivo deste trabalho é simular via PVsyst, uma planta fotovoltaica fictícia, com base de dados solarimétricos Meteororm, localizada no estado do Rio de Janeiro que possui vales e relevos para explorar os impactos na geração energética causadas pelas variações de posicionamento do terreno. Para isto, foram realizadas onze simulações, considerando dez possíveis variações de terreno e comparando-os com a versão simulada em uma superfície plana. A partir da análise dos dados gerados pelo PVsyst foi possível verificar que ao inserir os dados do relevo os resultados de geração energética, as perdas por sombreamento e ângulos de posicionamento dos módulos, sofrem alterações significativas. Dentre os subconjuntos de simulações analisados foi possível obter ganhos de até 2,75% assim como situações negativas com perdas de até 10,26%. Portanto, os resultados deste trabalho evidenciam a importância de se considerar as características do relevo durante a realização das simulações.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Relevos, PVsyst.

1. INTRODUÇÃO

A troca de setor energético para fontes alternativas busca mitigar os efeitos negativos que a energia não renovável causa no meio ambiente. Pesquisas recentes trazem os impactos que combustíveis fósseis causam no ecossistema, isto ocorre durante a transferência de sua fonte para a energia consumível, como a combustão de petróleo e a queima de carvão que geram o aquecimento global por meio da liberação de gases de efeito estufa (Bose, 2010). Em (Pata, 2021) é mencionado que o aumento do consumo energético está conectado com a globalização e impacta na emissão de CO₂. Essa pesquisa enfatiza esse efeito em países emergentes, como Brasil, Rússia, Índia e China (BRIC). Ao relatar que em 2019 foi emitido pelos países BRIC cerca de 14.234 Mt de CO₂, o equivalente a 42% do CO₂ mundial (BP, 2019), foi demonstrada uma preocupação de metade de concentração estar em quatro países. Como estratégia de reduzir estes resultados negativos, torna-se fundamental a ampliação do uso de energia limpa.

Entre os anos de 2012 até 2022 houve um aumento de 8,6% de geração de eletricidade por energias renováveis (REN21, 2023), das quais constata-se que a energia renovável engloba aspectos naturais presentes no ecossistema, tais como, água dos rios para energia hidrelétrica, radiação solar para energia fotovoltaica, velocidade dos ventos para energia eólica, temperatura para energia geotérmica (Villalva, 2015). Em todos esses casos, não é necessário aplicar processos de combustão para extrair a energia. Estes potenciais energéticos “limpos” podem ser coletados através de usinas que possuem infraestrutura específica e devem estar numa localização favorável para que a sua fonte energética seja absorvida com maior efetividade, ou seja, consiga reter o máximo de energia que é naturalmente disponibilizado. Um exemplo que indica o uso de energia renovável como promissor é o relato de (IEA-PVPS, 2023) que apresenta resultados estatísticos do setor energético. Esse relatório mostra que em 2022 deixou de emitir cerca de 1339 Mt de CO₂, isto com a utilização de sistemas fotovoltaicos, cujas suas instalações globais totalizam cerca de 240 GW de potência. Nesta estatística, o Brasil seria responsável por quase 4% desta contribuição, com o equivalente a 9,9 GW.

Neste trabalho, o foco se trata da energia Fotovoltaica (FV), que é uma fonte de energia renovável dependente da radiação solar que chega na atmosfera terrestre. Em um cenário ideal o mesmo valor de radiação solar que atinge a superfície atmosférica poderia ser aproveitada integralmente ao chegar no solo. No entanto, a radiação vai se alterando com a interferência de elementos presentes entre as camadas da atmosfera, como nuvens, poeira, gases poluentes, ar e

obstáculos na trajetória dos raios solares. Em (Villalva, 2015) é apresentado o termo Massa de Ar (AM) como um fator que deve ser levado em considerações em equacionamento, como uma constante, que varia conforme as coordenadas e altitude. No setor FV há diversas nomenclaturas que definem cada componente da radiação, que são conhecidas como irradiação, podendo ser global, direta ou difusa. Esses e outros parâmetros meteorológicos que podem interagir com o sistema são encontrados em bases de dados, que podem ser gerados por estações FV ou por base de dados estimadas com auxílios de satélites e algoritmos de modelagens.

Para análises de viabilidade energética e econômica, um estudo prévio do projeto de uma usina FV pode ser realizado juntamente com uma base de dados que considere seus atributos com base nas suas coordenadas. Em (Lima *et al.*, 2020) são destacadas que algumas informações podem ser inicialmente obtidas por modelos e combinações de fórmulas através de meios manuais, como planilhas. Entretanto, fatores externos quando considerados, aumentam a complexidade dos projetos, tais como a análise de sombreamento e perdas devido a cabeamento. Por outro lado, isto leva à maior credibilidade em projetos criados com o uso de *software*, pois o suporte de tais complexidades aumentam a acurácia em relação a energia prevista no projeto (de Souza Silva *et al.*, 2020).

Este trabalho concentra a análise ramificação das complexidades possíveis no sistema FV que conecta com a variação dos ângulos no terreno da planta fotovoltaica conforme o não nivelamento do terreno em que foi posicionado. Destacam-se os ângulos de incidência da luz solar que são pertinentes para a retenção de energia pelas placas fotovoltaicas (da Silva *et al.*, 2018), isto é, ângulos de azimute, zênite e o ângulo entre o solo e a célula fotovoltaica (*tilt*). Em (Lorenzo, 2010) foi mencionado que nem sempre é necessário criar alterações no terreno físico escolhido para o posicionamento da usina FV, pois o papel das simulações é o de criar um projeto considerado ótimo para o terreno. Todavia, é usual encontrar plantas em terrenos planos, seja pela característica da região, ou por nivelamentos no terreno.

Com isso, o objetivo deste artigo é fornecer uma análise quantitativa ao considerar um estudo de caso pré-definido, puramente computacional, para analisar a absorção de irradiância pelos módulos, aproveitamento da energia e avaliar outros possíveis comportamentos dentro de uma planta fotovoltaica pela consideração topográfica original, isto é, sem intervenções na alteração do terreno, o que pode representar, inclusive, uma redução de custo na implementação do sistema FV.

Este trabalho foi subdividido em cinco seções. A Seção 2 descreve as características do sistema, do *software*, da base de dados e outras definições que foram aplicadas durante as simulações. A Seção 3 apresenta a metodologia aplicada, a Seção 4 descreve as análises e resultados obtidos, enquanto na Seção 5 são feitas as considerações finais.

2. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

Um sistema fotovoltaico pode ser diferenciado pelo seu modo de distribuição da energia e pelo seu propósito. A Fig. 1 mostra as principais classificações reconhecidas pelo mercado fotovoltaico (Whitaker *et al.*, 2010). Sistemas *off-grid* são sistemas que não são conectados ao sistema nacional, ou *grid*, e não tem a capacidade de atenderem a demanda de carga caso não exista geração constante ou sistema de armazenamento, sendo então reconhecidos como sistemas isolados. Já os sistemas *on-grid*, são sistemas conectados à *grid*, podendo contribuir para atender a demanda de carga do sistema ao gerar energia como uma usina, ou atender a demanda local, porém não prejudica o atendimento caso não haja geração, devido a energia presente no sistema nacional.

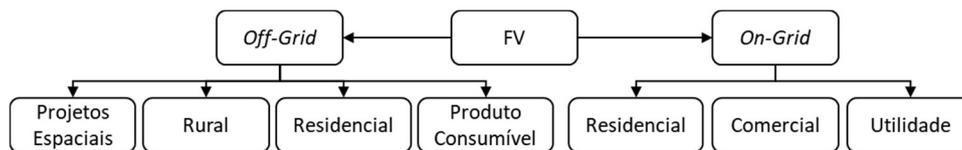


Figura 1 – Topologias de sistemas FVs, baseado em (Whitaker *et al.*, 2010).

Alguns componentes de um sistema FV podem ser iguais, como os módulos fotovoltaicos, e a infraestrutura pode ser semelhante, com isso, alguns projetos podem ter classificações além da estrutura já mencionada na Fig. 1. Neste caso, ela é diferenciada pela dimensão ao considerar a energia que pode ser gerada. A Fig. 2 representa visualmente a classificação conforme a Lei Nº 14.300 (Brasil, 2022). Os projetos específicos costumam ser de propósito único como projetos espaciais e produtos consumíveis da Fig. 1. Ao considerar as estruturas para geração energética há uma subdivisão de regulamentos, taxas e tipos de manutenção que diferenciam entre si.

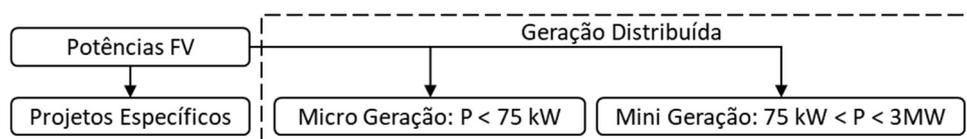


Figura 2 - Classificação de sistemas FV no cenário brasileiro, baseado em (Brasil, 2022).

Como mencionado no parágrafo anterior, a estrutura dos sistemas é semelhante, diferenciando a área de módulos necessária para cada potência. Segundo a norma IEC 61215-1, as dimensões de placas fotovoltaicas com 2,2 m x 1,5 m são consideradas grandes (British Standards Institution, 2021), logo, a versão comercial padronizada não ultrapassa tal dimensão, mas a sua coleta de irradiância varia desde o material no qual foi projetado até ao modo como o módulo foi

posicionado no terreno. Ao considerar que a quantidade de placas está diretamente ligada à potência gerada de uma usina, se um terreno não possui uma superfície com ângulos suaves de inclinação, podem trazer distúrbios entre os posicionamentos de cada placa, de modo que os seus respectivos *pitches*, distâncias entre *strings*, devem ser ajustados.

A usina simulada neste artigo é uma usina FV com topologia *on-grid*, classificada como de Utilidade pela Fig. 1 e com capacidade energética de minigeração, cuja infraestrutura técnica foi definida como sendo:

- 5000 Módulos FV monofaciais monocristalinos de 600 Wp;
- 15 Inversores de 160 kW.

Essa infraestrutura principal da usina FV totaliza em uma área de aproximados 14.000 m², sendo a composição para uma planta FV, com potência instalada de 3 MWp, que está no limiar para ser considerada como uma usina de Geração Distribuída (GD), segundo a legislação vigente Lei N° 14.300 (Brasil, 2022).

2.1 Software

Em (de Souza Silva *et al.*, 2020), é realizado um estudo comparativo de performance de três diferentes *softwares* destinados para simulações fotovoltaicas, isto já selecionando o conjunto de sistemas utilizando tanto na literatura quanto no mercado no setor fotovoltaico. Dentre as opções que foram apresentadas, um deles será utilizado neste artigo por haver uma ênfase no *software* que reconhece e simula construções e modelagens em 3D, para que possa estimar por meio de modelagens matemáticas a irradiância e a energia a ser absorvida pelo sistema. Os artigos (de Souza Silva *et al.*, 2020), (da Silva *et al.*, 2018) e (Vieira Machado *et al.*, 2021) destacam a confiabilidade no uso do PVsyst (PVsyst, 2023a), por meio de análises comparativas entre os resultados simulados validando com os resultados obtidos em uma usina real. Outro ponto a ser considerado no PVsyst é a sua comunidade ativa (PVsyst, 2023b) que continua fomentando as usabilidades do *software*. Visto isto, definiu-se o PVsyst, com versão 7.4.2, como o *software* a ser utilizado neste trabalho.

2.2 Banco de Dados

O uso de *software* para análise indica a necessidade de aplicar entradas para obter um resultado após o processamento de tais dados. Visto isso, no contexto do setor fotovoltaico, há a necessidade de utilizar as informações sobre o ambiente ao qual será extraído a energia fornecida pelo sol. Deve-se destacar que para estabelecer boas estimativas providas por modelos matemáticos com viés meteorológico é necessário o uso de mais variáveis além da irradiação direta, tais como irradiação difusa, umidade do ar e temperatura, além de maior resolução das amostras, dados com valores horários, ou de partições de horas (30 min, 15 min, 5 min). Em (da Silva *et al.*, 2018) destaca-se o uso da base de dados Meteororm (Meteotest, 2023) para regiões que possuem clima tropical, como em São Paulo - Brasil. Portanto, ao levar em consideração que o local escolhido para a simulação possui características do sudeste brasileiro, e por tal banco de dados já estar incluso no conjunto de dados do PVsyst, optou-se pela utilização do Meteororm, versão 8.1.

2.3 Localização

Levando em consideração o foco das simulações que tem intuito de avaliar diferentes tipos de relevo no mesmo perímetro para instalação da usina FV, foi realizada uma busca por terrenos com tais aspectos. A Fig. 3, mostra o mapa do relevo da região sudeste, obtidos através de dados presentes em (Tessa DEM, 2023).

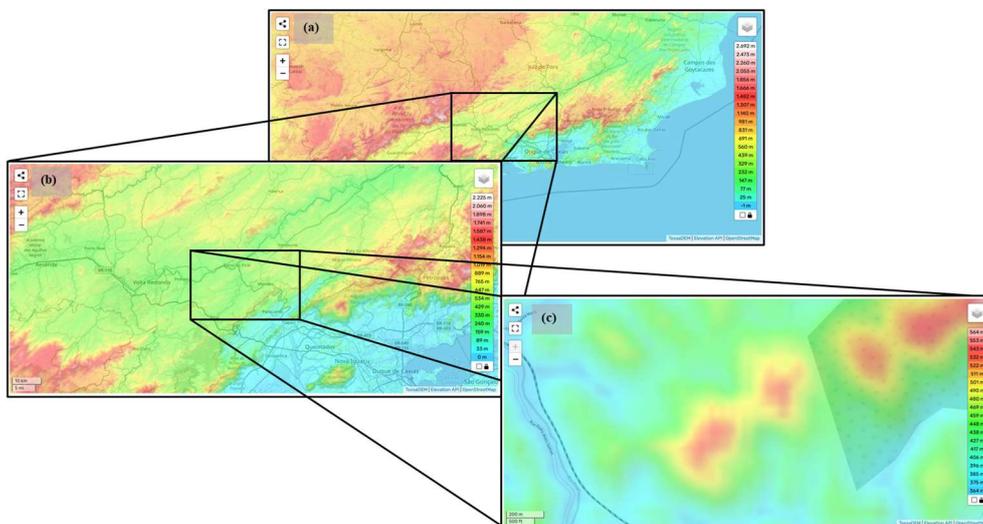


Figura 3 - Mapa de relevo da localização: (a) Sudeste brasileiro, (b) Estado do Rio de Janeiro e (c) Região escolhida.

A Fig. 3 apresenta três representações do local escolhido por diferentes escalas. Concentrou-se a análise para a região sudeste por considerar o clima já testado para a base de dados Meteonorm (da Silva *et al.*, 2018). A Fig. 3a está na resolução 1:50 km e possui o foco na região sudeste litorânea, mostrando altitudes entre -1 e 2692 m acima do nível do mar. Optou-se pela escolha de um ambiente sem aglomerados de relevos para não envolver perdas provenientes de sombras externas de maiores altitudes, conforme visto na Fig. 3b, com a resolução 1:10 km e altitudes entre 0 e 2225 m. Por fim, a Fig. 3c, com escala 1:200 m, exibe a localização que possui altitudes entre 364 m e 564 m, atentando-se ao tamanho da usina, este local foi selecionado e realizado simulações para avaliar os possíveis impactos.

A Fig. 4 apresenta o local escolhido para análise, posicionado nas coordenadas decimais $-22,53^{\circ}$ S, $-43,79^{\circ}$ W. Este local não possui interferência de sombras providas por prédios ou construções mais elevadas no seu contorno que aumentariam perdas. Embora este terreno possua diversos vales, eles não ultrapassam cerca de 130 m de diferença entre as elevações.

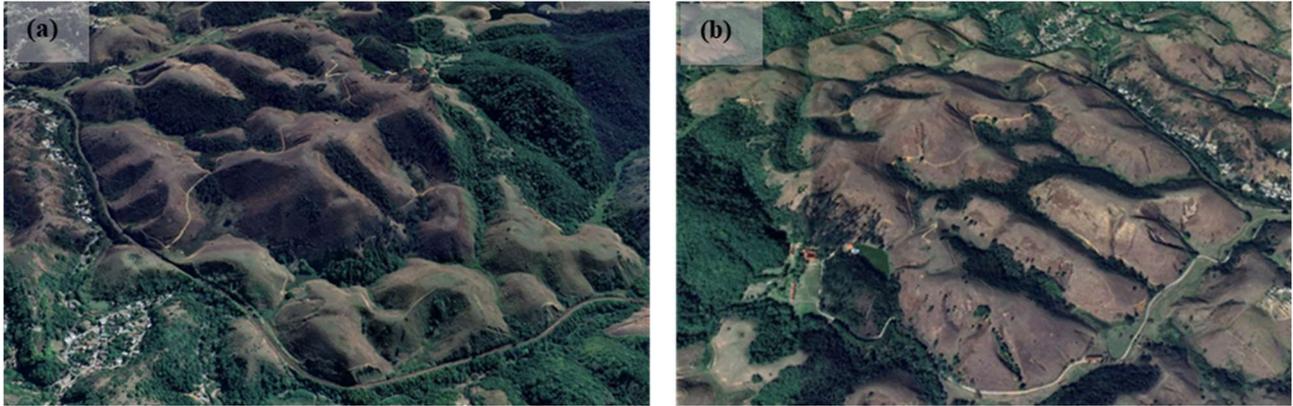


Figura 4 - Local das simulações: (a) Visão do Sul ao Norte, (b) Visão do Norte ao Sul.

Com isto, é possível selecionar subespaços de 14.000 m² para o posicionamento da usina no terreno definido, com o objetivo de testar diferentes relevos. Na Fig. 5 estão presentes os posicionamentos da usina simulada na região selecionada.



Figura 5 - Posições escolhidas para as variantes.

3. METODOLOGIA

O primeiro passo realizado durante este estudo foi a escolha do sistema a ser analisado e o *software* para computar tais execuções. Com a definição do objeto de estudo, o foco foi alterado para a aplicação deste objeto no simulador. A Fig. 6 apresenta o fluxograma seguido dentro do *software* PVsyst. São seis etapas mostradas, sendo a quinta etapa opcional, a depender do objetivo do projetista. Esta opção está diretamente interligada às principais análises deste artigo, que se trata de analisar o impacto do relevo do terreno em simulações computacionais. Nas três primeiras etapas são realizados a inserção de características que foram descritas na Seção 2, tais como as coordenadas, seleção da base de dados (neste caso Meteonorm), potência de módulos e inversores, e o restante das características pertinentes. Ao se tratar de infraestrutura, um aspecto significativo em projetos FV é a preocupação com o retorno financeiro ao longo prazo (*payback*) e ao fixar esse valor o projeto fica susceptível a alterações na infraestrutura conforme as opções de marcas, famílias e compatibilidade entre componentes que estejam dentro do orçamento (Verissimo *et al.*, 2020). A

adequação do sistema de acordo com o *payback* se encontra na etapa 3, no entanto, as simulações seguiram as definições pré-estabelecidas na Seção 2, sem considerar ajustes tendo em vista que o foco é nas variações possíveis de um sistema em diferentes posicionamentos no relevo.

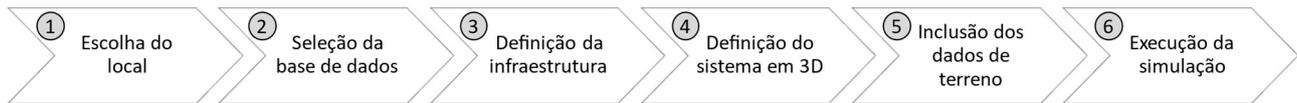


Figura 6 - Fluxograma da simulação no PVsyst.

Com os parâmetros elétricos já definidos, existem as configurações das possíveis perdas que podem surgir no sistema. Para que a simulação se aproxime dos resultados experimentais encontrados em campo, as perdas foram ajustadas de acordo com as recomendações presentes no *software*. Com todas as perdas definidas, o sistema pode ser reproduzido em perspectiva 3D através da construção de cena de sombreamento. Na quarta etapa, os módulos são dispostos de acordo com a distribuição física da usina real.

No quinto passo, os dados de terreno são incluídos, e com tais dados o sistema pode ser adaptado para que a mesma distribuição de módulos do passo anterior preencha a superfície mesmo que não seja plana. Na Fig. 7a, a visão 3D de um sistema fotovoltaico no terreno plano pode ser observada. A distribuição plana seria uma simulação padrão, não levando em conta nenhum dado topográfico. Enquanto a Fig. 7b mostra as variações de altitude que são informadas por um arquivo externo e inserido no PVsyst, nele há uma “nuvem de pontos” que cria a respectiva malha, também conhecida por *mesh*, do terreno físico.

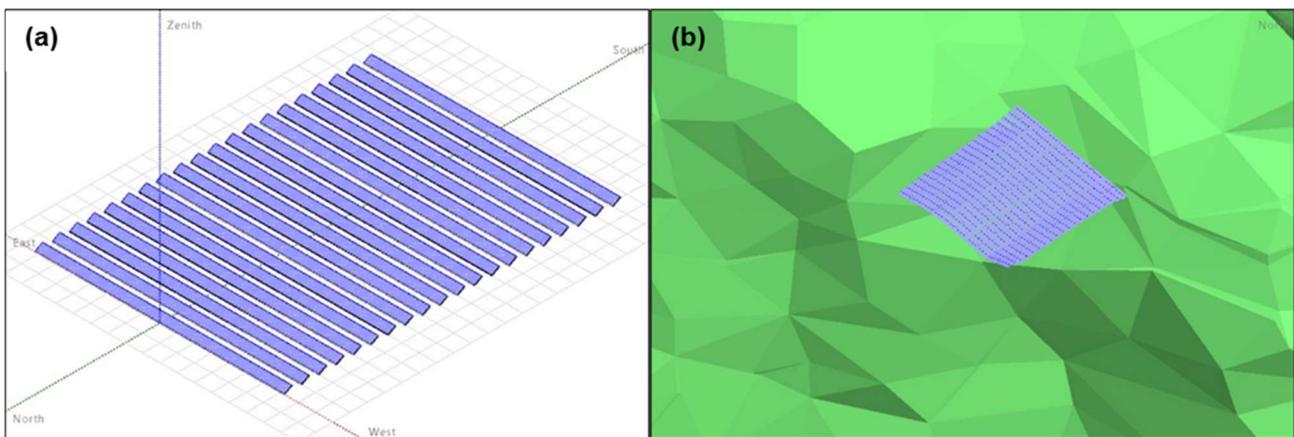


Figura 7 - Visão 3D: (a) sistema em terreno plano, (b) sistema incluindo terreno, variante 1.

Com os dados do terreno inclusos, a última etapa do fluxograma condiz com a execução da simulação dentro do PVsyst. Neste momento, o *software* implementa todas as abordagens de modelos matemáticos conectados às bases de dados correspondente e computa em tempo real conforme todas entradas fornecidas. Nesta etapa, o *software* realiza uma simulação com dados sintéticos de irradiância a se esperar de um ano padrão. Além dos dados de irradiância, dados climáticos também são considerados na simulação, resultando em expectativa de geração anual.

A análise do impacto da variação do relevo do terreno na geração esperada através do *software* de simulação PVsyst foi realizada por meio de 10 simulações, nomeadas de Variantes (V) de terrenos, além da simulação do terreno plano. Conforme visto na Fig. 8, cada simulação foi realizada em posicionamentos diferentes visando cobrir a área completa do terreno através de uma divisão de 10 partes para simular condições distintas. A simulação foi realizada para todos os diferentes posicionamentos, com o fim de obter a geração em cada caso, com todos os parâmetros constantes com exceção do terreno.

Com os dados da simulação do terreno plano e das 10 simulações, como visto na Fig. 8, considerando o relevo com posicionamentos distintos, as análises podem ser conduzidas por meio da comparação desses dados. Após cada simulação, os dados de geração anual foram obtidos através do relatório gerado pelo *software* PVsyst, tanto dados de geração, quanto dados de perdas e o comportamento geral do sistema.

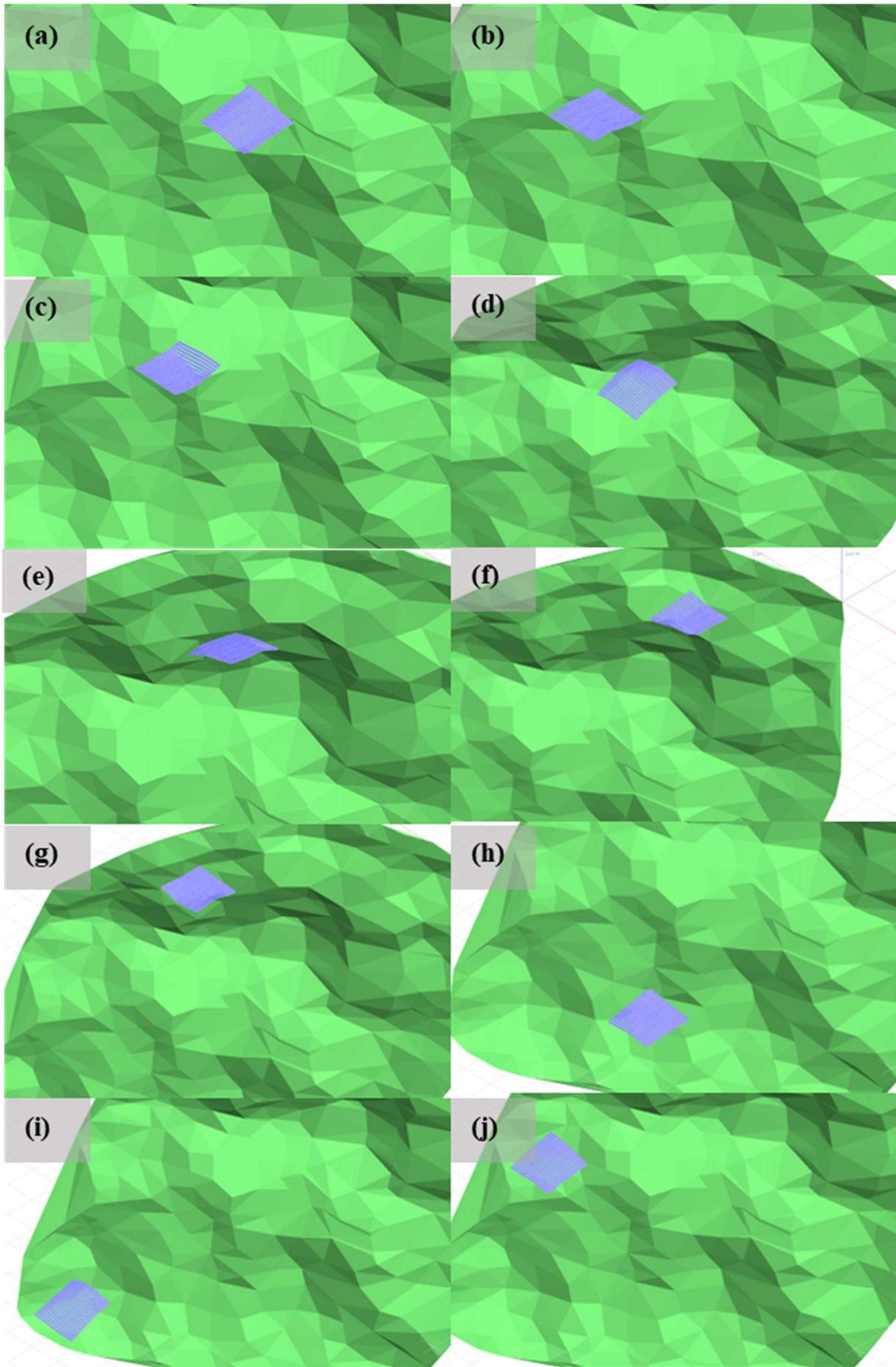


Figura 8 - Visão 3D do sistema considerando o terreno e as variantes de posicionamentos nas simulações: (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4, (e) V5, (f) V6, (g) V7, (h) V8, (i) V9 e (j) V10.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados de geração energética anual e produção normalizada são apresentados resumidamente pela Tab. 1, no qual consta informações sobre o valor de geração energética final no ano e diário pelas colunas “Geração Energética” e “Produção Normalizada”, seguido pelas colunas “Diferença Percentual Total” e “Diferença Percentual Normalizada”, com as porcentagens de geração em relação a referência.

Tabela 1 - Tabela de geração por variação de terreno.

Simulações	Geração Energética [MWh]	Produção Normalizada [kWh/kWp/dia]	Diferença Percentual Total [%]	Diferença Percentual Normalizada [%]
Plano	4246,755	3,878	-	-
V1	4243,878	3,876	-0,07	-0,05
V2	4068,466	3,715	-4,20	-4,39
V3	4118,388	3,761	-3,02	-3,11
V4	4296,104	3,923	1,16	1,15
V5	3810,857	3,480	-10,26	-11,44
V6	3995,764	3,649	-5,91	-6,28
V7	4078,684	3,725	-3,96	-4,11
V8	4251,842	3,883	0,12	0,13
V9	4363,689	3,985	2,75	2,69
V10	4282,104	3,911	0,83	0,84

As colunas de “Diferença Percentual Total” e “Diferença Percentual Normalizada” foram criadas com base na energia obtida pela simulação que não aplica os dados do relevo, isto é, a linha “Plano” como referencial, tanto para o caso de geração anual quanto o caso de produção normalizada por dia. Ambas as colunas possuem valores percentuais aproximados e seus comportamentos coincidem em todas as variantes, visto isto, as análises destacadas mencionarão a “Diferença Percentual Total”.

Inicialmente, pode-se notar que em todos os casos houve uma variação mesmo que em porcentagens decimais, como em V1, V8 e V10. Os casos que mais destacaram pela sua maior diferença foram as variantes V5 e V9, isto ao comparar com o terreno planificado. A variante V5 poderia ser classificada como pior caso, neste conjunto de testes, em que a usina tem uma geração 10% menor, ou seja, não geraria o equivalente de 435 MWh de energia ao ano. Enquanto a V9, poderia ser considerada como o melhor caso, neste conjunto de teste, pois com este posicionamento seria possível obter um ganho de 2,75%, equivalente a 117 MWh.

A Tab. 2 apresenta os tipos de perdas associadas ao sombreamento que afetam a saída gerada, sendo elas perdas por componentes de irradiância como: sombreamento global horizontal (GlobShd), total linear (ShdLoss), direta (ShdBLss), circumsolar (ShdCLss) e difusa (ShdDLss). Também foi considerado perda por sombreamento elétrico (ShdElec), neste caso já considerando as perdas envolvidas pela própria infraestrutura da planta FV, visto que alguns módulos podem criar as próprias sombras a depender do layout aplicado. Cada coluna da tabela possui uma coloração independente para destacar as diferenças abruptas das perdas de irradiância, sendo assim, as cores do branco ao azul representam o mínimo e o máximo valor, respectivamente.

Tabela 2 - Tabela de diferenças percentuais de perdas por sombreamento de acordo com a variação de terreno.

Simulações	GlobShd	ShdLoss	ShdBLss	ShdCLss	ShdDLss	ShdElec
V1	-0,50%	-5,62%	188,12%	179,32%	-12,11%	-47,03%
V2	-2,83%	108,49%	775,98%	696,43%	103,40%	129,61%
V3	-1,89%	70,54%	634,08%	569,70%	64,26%	105,39%
V4	0,50%	-37,67%	184,02%	173,08%	-45,74%	-63,98%
V5	-7,15%	214,75%	2036,31%	1819,79%	156,68%	300,93%
V6	-4,16%	154,72%	1493,30%	1406,60%	104,26%	175,34%
V7	-2,22%	76,52%	549,53%	508,38%	70,78%	173,05%
V8	-0,28%	-6,73%	144,02%	135,83%	-9,73%	-46,18%
V9	1,89%	-84,35%	-24,43%	-21,21%	-87,51%	-93,90%
V10	0,11%	-43,40%	146,85%	139,22%	-52,03%	-75,59%

A partir da Tab. 2 é possível notar os impactos do sombreamento na geração energética da planta FV, pois ela apresenta uma comparação entre os valores obtidos pela simulação nomeada por “Plano” e seu respectivo posicionamento do terreno. Nota-se que os valores não são derivados dos valores apresentados na Tab. 1. Logo, confirma-se que a V5 possui os maiores valores de perdas em cinco das seis diferentes classificações de perdas

mencionadas. Por outro lado, a V9 possui os menores impactos de sombreamento. Portanto, pelas informações apresentadas, percebe-se que em todas as variações possuem perdas por sombreamento, entretanto, como mostrado na Tab. 3 a depender de seus valores absolutos, as perdas podem causar uma interferência maior no sistema.

Tabela 3 - Tabela de valores bases para o terreno plano.

GlobShd	ShdLoss	ShdBLss	ShdCLss	ShdDLss	ShdElec
1803 kWh/m ²	46,64 kWh/m ²	2,68 kWh/m ²	0,561 kWh/m ²	25,6 kWh/m ²	48500 kWh

Embora na Tab. 2, o ShdBLss apresente o maior percentual, ao comparar com seu valor absoluto pela Tab. 3, de 561Wh/m², percebe-se que ele não é tão relevante quanto o ShdElec, com o equivalente a 48,50 MWh, de modo que este parâmetro foi considerado para a próxima análise.

A Fig. 9 ilustra as diferentes variações de energia, gerada e perdida por sombreamento, de acordo com os ângulos de azimute estimados computacionalmente.

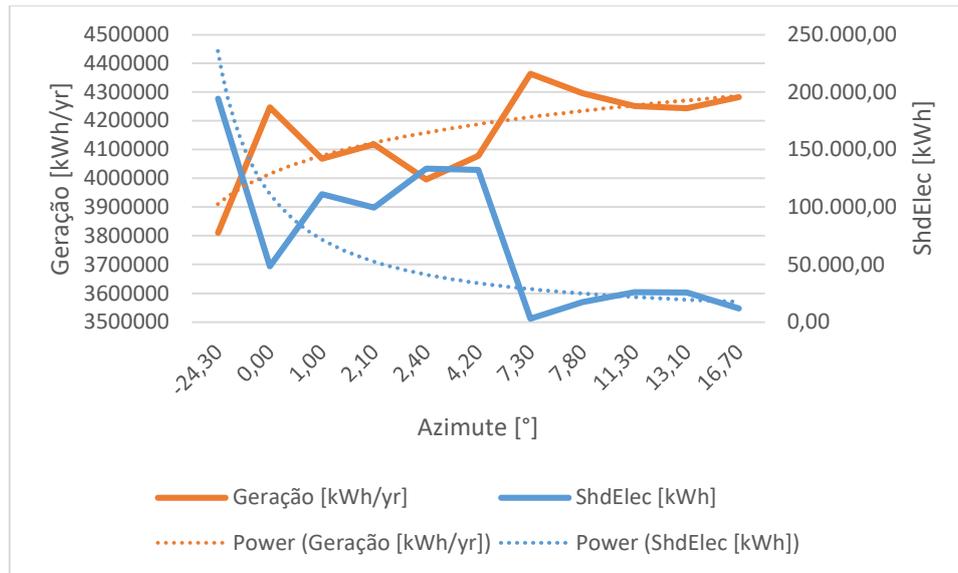


Figura 9 – Curvas de energia gerada e perdas por sombreamento.

A cada variação de posicionamento do terreno o PVSyst calculou o valor mais otimizado para adequar ao relevo. As curvas pontilhadas representam as linhas de tendência de ambas as variáveis de energia, com relação ao ângulo de azimute. Desse modo é possível se verificar que nas variantes simuladas, o aumento gradativo do azimute pode causar diminuições nas perdas por sombreamento, o ShdElec, e aumentos na energia gerada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando analisar o impacto dos dados de relevo do terreno na geração energética de uma usina fotovoltaica, neste trabalho foi realizado simulações de uma planta FV no software PVSyst. Para isto, um conjunto de onze simulações foram realizadas, dez variantes aplicadas no terreno e uma sem a consideração do relevo do terreno. Nota-se que esta funcionalidade de inserção do terreno é opcional no *software* definido para este estudo, no entanto os resultados obtidos e apresentados na Seção 4 revelam a importância de estimar a energia considerando esta variável.

Presumindo que não é todo terreno que pode ser planejado, seja por questões ambientais ou financeiras, uma simulação computacional que suporte modelos 3D evidencia o impacto do terreno na geração. Embora as variações possam ser em décimos de porcentagens, como foi evidenciado na Tab. 1 pelas variantes V1, V8 e V10, para sistemas de grande porte de Geração Centralizada com potências maiores de 5 MWp seu valor bruto equivalente não deve ser ignorado. Visto isso, é aconselhável aplicar tais dados pontuais de coordenadas com sua respectiva altitude de forma a caracterizar o relevo local para aumentar a confiabilidade entre a energia desejada e a obtida pela usina FV real, algo que pode ser significativo, principalmente ao se tratar de *payback*. Como futuras linhas de pesquisa pode-se destacar: simplificar a usabilidade desta funcionalidade para fomentar a aplicação em projetos comerciais; abordar outros simuladores conhecidos pela literatura na indústria considerando os mesmos métodos deste trabalho; validar resultados obtidos por simulações com plantas FV reais que já foram instalados em locais não planejados; flexibilizar outras variáveis que foram definidas como constantes; e criar *benchmarks* para avaliar vantagens e desvantagens de flexibilizar parâmetros de simulação.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossa gratidão à TotalEnergies pelo apoio financeiro. Além disso, somos gratos a todos os colaboradores da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Reconhecemos o apoio da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) através do regulamento de fomento à pesquisa e desenvolvimento (P&D). Agradecimentos são estendidos ao Centro de Estudos de Energia e Petróleo (CEPETRO) e à Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC).

REFERÊNCIAS

- Bose, B.K., 2010. Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics. *EEE Ind. Electron. Mag.* 4, 6–17. <https://doi.org/10.1109/MIE.2010.935860>
- BP, 2022. Statistical Review of World Energy 2022 (Statistical Review No. 71st edition), of World Energy. BP p.l.c.
- Brasil, 2022. L14300 [WWW Document]. URL https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm (accessed 11.9.23).
- British Standards Institution, 2021. BS EN IEC 61215-1:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements.
- da Silva, M.K., Narvaez, D.I., de Melo, K.B., Villalva, M.G., 2018. Comparative Analysis of Transposition Models Applied to Photovoltaic Systems Using Meteororm and NASA SSE Databases, in: 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). Presented at the 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), pp. 237–241. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627354>
- de Souza Silva, J.L., Costa, T.S., de Melo, K.B., Sakô, E.Y., Moreira, H.S., Villalva, M.G., 2020. A Comparative Performance of PV Power Simulation Software with an Installed PV Plant, in: 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Presented at the 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 531–535. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067138>
- IEA-PVPS, 2023. Snapshot of Global PV Markets - 2023 (Task No. T1- 44:2023), Strategic PV Analysis and Outreach. International Energy Agency.
- Lima, G.P.D., Albuquerque, B.F., Sakô, E.Y., Silva, J.L. de S., Moreira, H.S., Villalva, M.G., 2020. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA USINA FOTOVOLTAICA DE 1 MW_p EM SANTA RITA DO SAPUCAÍ - MG. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS.
- Lorenzo, E., 2010. Energy Collected and Delivered by PV Modules, in: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 984–1042. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch22>
- Meteotest, 2023. Meteororm Version 8 - Meteororm (de) [WWW Document]. Meteororm (en). URL <https://meteororm.com/en/meteororm-version-8> (accessed 10.23.23).
- Pata, U.K., 2021. Linking renewable energy, globalization, agriculture, CO2 emissions and ecological footprint in BRIC countries: A sustainability perspective. *Renewable Energy* 173, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.125>
- PVsyst, 2023a. PVsyst – Photovoltaic software [WWW Document]. URL <https://www.pvsyst.com/> (accessed 11.6.23).
- PVsyst, 2023b. Your questions about PVsyst [WWW Document]. PVsyst forum. URL <https://forum.pvsyst.com/forum/3-your-questions-about-pvsyst/> (accessed 11.23.23).
- REN21, 2023. Renewables 2023 (ENERGY SUPPLY No. 2023 Collection). Renewable Now.
- Tessa DEM, 2023. TessaDEM • Near-global 30-meter Digital Elevation Model (DEM) [WWW Document]. URL <https://tessadem.com/> (accessed 11.27.23).
- Veríssimo, P.H.A., Campos, R.A., Guarnieri, M.V., Veríssimo, J.P.A., do Nascimento, L.R., Rüther, R., 2020. Area and LCOE considerations in utility-scale, single-axis tracking PV power plant topology optimization. *Solar Energy* 211, 433–445. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.070>
- Vieira Machado, G.M., De Souza Silva, J.L., Soeiro Moreira, H., Do Nascimento Vargas, T., Cerbatto Schmitt Prym, G., Pinheiro Lima, G., Gradella Villalva, M., 2021. ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO NO CAMPUS DA UNICAMP EM DIFERENTES SOFTWARES DE SIMULAÇÃO. *RBENS* 11, 124–131. <https://doi.org/10.59627/rbens.2020v11i2.317>
- Villalva, M.G., 2015. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2nd ed. Érica, São Paulo.
- Whitaker, C.M., Townsend, T.U., Razon, A., Hudson, R.M., Vallvé, X., 2010. PV Systems, in: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 841–895. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch19>

EVALUATING THE IMPACT OF TERRAIN VARIATION ON PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION: A CASE STUDY IN RIO DE JANEIRO, BRAZIL

Abstract. *The Brazilian photovoltaic sector aims to meet the needs of generating clean energy to mitigate the negative effects emitted by fossil fuels. Although there are many locations with high solar radiation coverage in Brazil, they are not always exploited due to their presence in areas with significant variations in topography. To overcome these challenges, advanced software solutions have emerged, enabling the simulation of various photovoltaic system components, including modules, inverters, and solar trackers, providing valuable insights into energy generation under diverse conditions. Given the intricate nature of terrains and topography, which pose significant challenges for photovoltaic plant placement, simulation software has become an indispensable tool for project optimization. This study aims to simulate a fictitious photovoltaic plant using PVsyst software, employing solarimetric data from Meteonorm, located in the state of Rio de Janeiro, a region characterized by rough terrain and complex topography. The objective is to investigate the impact of terrain variations on energy generation. Eleven simulations were conducted, encompassing ten potential terrain variations compared to a simulated flat-surface scenario. The analysis of PVsyst-generated data revealed that incorporating terrain data significantly alters energy generation outcomes, shading losses, and module positioning angles. Among the simulated subsets, gains of up to 2.75% were achieved, while negative situations with losses of up to 10.26% were also observed. These findings underscore the critical importance of considering terrain characteristics during simulations to optimize photovoltaic plant performance and maximize energy yield. The ability to accurately model terrain variations empowers project developers to make informed decisions, leading to more efficient and sustainable photovoltaic systems.*

Keywords: *Photovoltaic Energy, Rough Terrain, PVsyst.*