

# Statistical Analysis of Solar Position Calculation Algorithms: SPA and Grena 1-5

Karen Barbosa de Melo, *Member, IEEE*, Lucas Ramos Tavares, and Marcelo Gradella Villalva, *Member, IEEE*

**Abstract**—Photovoltaic systems have been explored as a solution to meet the growing demand for electricity from a clean and renewable source. To improve the performance of photovoltaic systems, a widely used alternative is the implementation of solar trackers. The strategy of sun-tracking most used in photovoltaic power plants with solar trackers applies algorithms to calculate the sun position. This work presents a statistical analysis of six solar position calculation algorithms: Solar Position Algorithm (SPA) and Grena 1-5. The algorithm with the lowest solar vector error was the SPA.

**Index Terms**—Photovoltaic systems, solar trackers, solar position calculation algorithms, SPA, Grena, accuracy.

## I. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica (FV) é uma das fontes renováveis de energia mais promissoras. Porém, uma desvantagem atribuída à geração fotovoltaica é a baixa eficiência de conversão energética. Para melhorar a geração de energia de um sistema fotovoltaico, a comunidade científica normalmente estuda três métodos [1]:

- 1) Melhorar a eficiência das células fotovoltaicas [2];
- 2) Diferentes métodos de rastreamento do ponto de máxima potência da curva I-V dos módulos fotovoltaicos para garantir que os sistemas operem na máxima potência mesmo em condições de sombreamento [3];
- 3) Diferentes estratégias de rastreamento de seguidores solares.

Os seguidores solares proporcionam um aumento de geração de energia elétrica ao manter a superfície dos painéis FV perpendiculares à irradiância direta na maior parte do tempo, captando, portanto, uma maior quantidade de irradiância [4]. Vários autores estudam esses sistemas. Seme *et al.* [5] implementaram um seguidor solar de dois eixos que utiliza quatro resistores dependentes de luz (LDR) e produziu um ganho de geração de energia elétrica de 27% comparado a um sistema fixo. Mereddy *et al.* [6] desenvolveram um seguidor solar de dois eixos que utiliza LDRs para detectar a posição do Sol, exceto em dias nublados, quando utilizam-se algoritmos baseados em data e hora para calcular a posição solar. Li *et al.* [7] desenvolveram um estudo a fim de verificar o desempenho de um seguidor solar de eixo único horizontal na China por meio de uma análise matemática que estima a irradiância diária coletável em sistemas fixos, com seguidor solar de eixo duplo e com seguidor solar de eixo único

horizontal, onde o último apresentou ganhos de geração de energia de 8-24% quando comparado a um sistema fixo. Sidek *et al.* [8] apresentaram um estudo sobre o seguidor solar de dois eixos, utilizando motores de corrente contínua para movimentar os painéis, onde constatou-se ganhos de geração de energia de 26,9% e 12,8% em dias ensolarados e nublados, respectivamente, quando comparado a um sistema fixo. Díaz-Dorado *et al.* [9] apresentaram uma metodologia que considera o sombreamento entre linhas no cálculo do rastreamento solar, e seus resultados mostraram que a seleção apropriada de conexões elétricas, arranjo em série, orientação dos módulos, distância entre linhas, entre outras coisas, pode reduzir em aproximadamente 40% as perdas devido a sombreamento entre seguidores solares.

A Fig. 1 mostra as curvas de energia gerada por um sistema fotovoltaico fixo e um sistema com seguidor solar de um eixo de mesma potência em um dia de céu limpo. É possível observar que o seguidor solar permite captar maior irradiância nas primeiras e últimas horas do dia, nas quais o ângulo de incidência de um sistema com seguidor solar é menor do que o de um sistema fixo.

Os seguidores solares variam em grau de liberdade e tecnologia de rastreamento. Uma tecnologia de rastreamento muito utilizada em usinas fotovoltaicas devido ao baixo custo e facilidade de implementação é a baseada em data e hora, que utiliza controle em malha aberta e algoritmos que calculam a posição do Sol para manter a superfície dos painéis aproximadamente perpendiculares à irradiância direta [10].

O movimento aparente do Sol a partir de um ponto de observação está submetido a um grande número de perturbações, tais como precessão e nutação do eixo da Terra, perturbações causadas pela Lua e outros planetas, aberração, paralaxe, refração atmosférica, entre outras. Essas perturbações tornam o cálculo da posição solar uma tarefa complexa [11].

O cálculo da posição solar deve prever a rotação irregular da Terra ao redor do Sol usando observações históricas, levando os pesquisadores a desenvolver diferentes algoritmos com diferentes coeficientes para cada número de dias específicos [12]. Em consequência disso, a comunidade científica tem vários algoritmos que calculam a posição do Sol [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], e eles variam em complexidade, precisão e tempo de validade. Alguns deles já estão obsoletos ou não funcionam apropriadamente para o hemisfério sul. Quanto à precisão, variam de erros máximos de 0,0003° a unidades de graus.

O que dita a necessidade de algoritmos com maior ou menor precisão é a aplicação. Sistemas Fotovoltaicos de Concentração (SFC) necessitam de algoritmos com precisão

Karen Barbosa de Melo, University of Campinas (UNICAMP), Campinas, SãoPaulo, Brasil, e-mail: karen.bmelo@gmail.com.

Lucas Ramos Tavares, University of Campinas (UNICAMP), Campinas, SãoPaulo, Brasil, e-mail: lucasrtavares92@gmail.com.

Marcelo Gradella Villalva, University of Campinas (UNICAMP), Campinas, SãoPaulo, Brasil, e-mail: villalva@unicamp.br

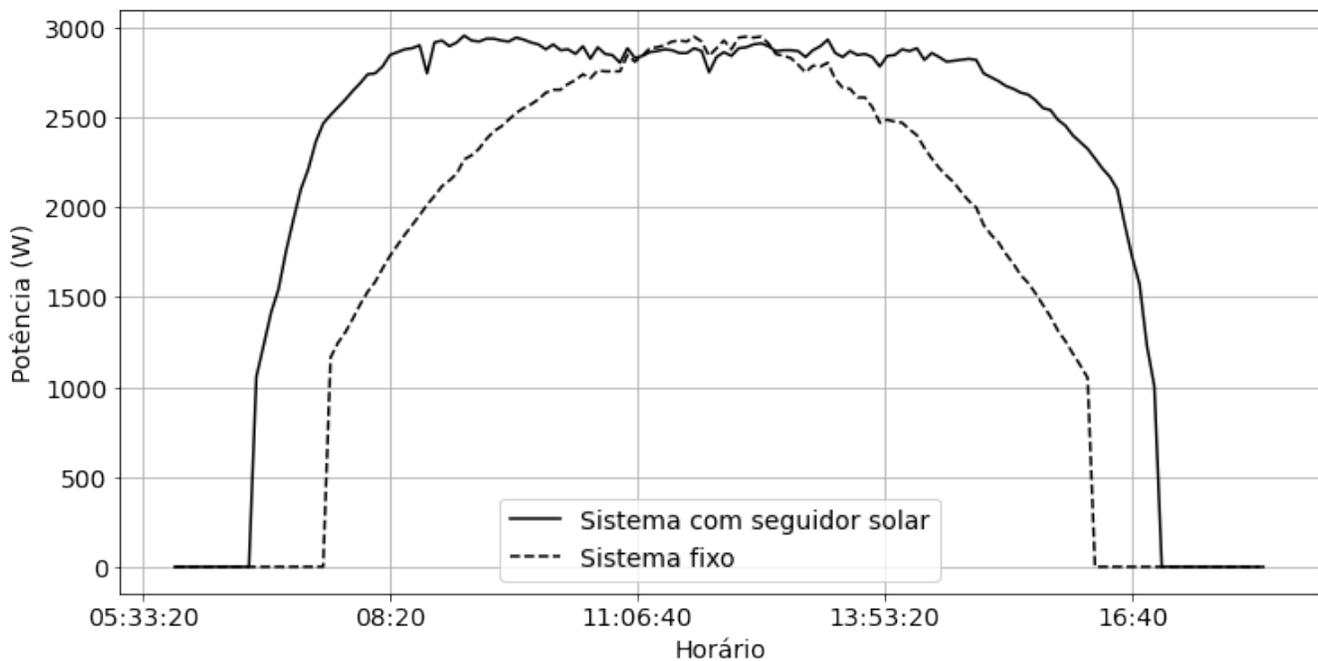


Fig. 1. Energia gerada por sistemas fotovoltaicos fixo e com seguidor solar de mesma potência em um dia de céu limpo.

da ordem de  $0,01^\circ$ , enquanto instrumentos de medição, como pireliômetros, necessitam de algoritmos de precisão maior ainda. Os sistemas de geração fotovoltaica toleram erros de alguns graus sem perdas significativas de geração de energia [11].

A fim de analisar a precisão de algoritmos de cálculo da posição solar que podem ser aplicados em seguidores solares de usinas fotovoltaicas, foi realizada uma análise estatística com o intuito de avaliar a precisão de 6 algoritmos, que no presente trabalho foram chamados de *Solar Position Algorithm* (SPA) [12], Grena 1, Grena 2, Grena 3, Grena 4 e Grena 5 [11].

## II. SEGUIDORES SOLARES

Os sistemas fotovoltaicos com estruturas fixas são instalados com uma certa inclinação, pois isso permite maior captação de irradiância incidente na superfície do painel. A inclinação ótima depende, principalmente, da localização geográfica [19]. Porém, o aproveitamento da irradiância que atinge a superfície dos painéis é maior quando a normal da superfície do painel está alinhada com a direção do feixe de irradiância solar, o que pode ser obtido com a utilização de seguidores solares [20].

Os seguidores solares são normalmente classificados de acordo com seu grau de liberdade e sua tecnologia de rastreamento. Quanto ao grau de liberdade, os seguidores solares podem ser classificados como seguidores de eixo único e de eixo duplo. Os seguidores solares de eixo único possuem somente um eixo de rotação, enquanto os seguidores solares de eixo duplo possuem dois eixos de rotação [21]. Ganhos de geração de energia de aproximadamente 25% e 35% podem ser obtidos com a utilização de seguidores solares de eixo único e de eixo duplo, respectivamente [22].

Quanto à tecnologia de rastreamento, os seguidores solares podem ser passivos ou ativos. Os seguidores solares passivos são projetados para rastrear o Sol sem a utilização de dispositivos eletrônicos, usufruindo principalmente do efeito térmico. Esses tipos de seguidores solares não consomem energia elétrica no seu funcionamento, porém produzem um ganho baixo de energia quando comparados aos seguidores solares ativos [22]. Os seguidores solares ativos utilizam motores elétricos ou mecanismos de engrenagens no rastreamento solar. Esses dispositivos consomem energia elétrica, porém proporcionam maior ganho de geração de energia [10]. As estratégias de rastreamento podem ser baseadas em microprocessadores e sensores eletro-ópticos, algoritmos baseados em data e hora, ou uma combinação de ambos. Sensores eletro-ópticos são frequentemente utilizados para o rastreamento solar, porém podem ser facilmente afetados pelas condições climáticas — em dias nublados dificilmente conseguem localizar o Sol [23]. A tecnologia de rastreamento baseada em data e hora utiliza algoritmos que determinam a posição solar para determinada localidade. Essa tecnologia utiliza controle em malha aberta e um processador para calcular a posição solar e mandar sinais para o motor movimentar as estruturas de forma que os painéis fotovoltaicos fiquem voltados para a direção calculada [24].

## III. ALGORITMOS DE CÁLCULO DA POSIÇÃO SOLAR

Os algoritmos calculam a posição solar a partir de observações históricas da posição do Sol e alguns deles baseiam-se em simplificações do *The Astronomical Algorithms* [25] (como [12, 13, 16, 17, 18]). Ao simplificar as equações, pode-se adotar as seguintes estratégias: reduzir o tempo de validade e manter a precisão [18] ou manter um longo período de validade e reduzir a precisão [16].

Michalsky [16] implementou um algoritmo adaptado do *The Astronomical Almanac* (1986). Esse algoritmo tem precisão de  $0,01^\circ$  entre os anos 1950-2050. Calcula declinação, ascensão direta, ângulo horário, azimute, elevação, equação do tempo, ângulo de incidência do Sol em uma superfície plana e faz a correção da refração atmosférica. É importante ressaltar que em sua forma original esse algoritmo não funciona apropriadamente para o hemisfério Sul.

Blanco-Muriel *et al.* [18] desenvolveram um algoritmo com validade entre os anos 1999-2015 com uma precisão de 0,5 minuto de arco. O algoritmo foi desenvolvido para ser aplicado em sistemas fotovoltaicos de alta concentração térmica que utilizam microprocessadores de baixo custo, portanto combina precisão e simplicidade, características necessárias.

Blanc e Wald [13] desenvolveram um algoritmo chamado SG2, válido entre os anos 1980-2030, que apresenta um erro máximo de vetor solar na ordem de 10 segundos, com a proposta de ser mais rápido do que outros algoritmos que apresentam o mesmo nível de precisão. Esse algoritmo consiste em uma aproximação das equações originais do SPA [12], com uma redução do número de operações. A motivação para o seu desenvolvimento foi a necessidade de um algoritmo com velocidade computacional para calcular um milhão de posições do Sol em menos de um minuto, para a implementação de uma base de dados de irradiância derivada de satélite, chamada HelioClim.

Os algoritmos utilizados nas simulações deste trabalho são o SPA proposto por Reda e Andreas [12] e os cinco algoritmos propostos por Grena [11].

#### A. Solar Position Algorithm (SPA)

O SPA [12] é proveniente de uma adaptação das equações contidas no livro escrito por Meeus [25], *The Astronomical Algorithms*. Foram realizadas algumas modificações para atender aplicações de energia solar. Por exemplo, no livro, o ângulo de azimute é medido em direção ao oeste a partir do Sul, enquanto no SPA é em direção ao leste a partir do Norte. Além disso, no livro a longitude é considerada positiva a oeste de Greenwich, enquanto para aplicações de energia solar é considerada positiva ao leste de Greenwich.

Esse algoritmo utiliza o Dia Juliano como escala de tempo. Além disso, calcula algumas variáveis intermediárias, como declinação, ascensão direta e ângulo horário. A partir dessas variáveis são calculados os dados de saída: ângulos de zênite e azimute, ângulo de incidência da superfície, hora local do nascer do Sol, tempo local de trânsito solar e horário local do pôr do Sol. Tanto as saídas intermediárias quanto as saídas finais estão disponíveis no *site* SPA Calculator [26]. O SPA possui validade entre os anos -2000 e 6000 [27].

Para avaliação dos resultados foram utilizados dados do *Astronomical Almanac* (AA) [28] como valores de referência. Foram comparados os valores de latitude e longitude eclíptica, ascensão direta aparente e declinação aparente de 00:00 hora do segundo dia de cada mês nos anos 1994-1996 e 2004, por ser a única disponibilidade do AA. Portanto, a análise foi feita levando em consideração apenas 48 amostras e não foram comparados diretamente os ângulos de zênite e azimute. A

diferença máxima dos valores comparados entre o SPA e o AA foi  $-0,00015^\circ$ , levando a uma diferença máxima de  $0,00003^\circ$  e  $0,00008^\circ$  no zênite e no azimute, respectivamente.

#### B. Grena

Grena [11] propôs cinco algoritmos, válidos entre os anos 2010-2110, portanto podem ser utilizados em usinas de geração fotovoltaica que ainda serão construídas. Os cinco algoritmos variam em precisão e complexidade computacional, porém os parâmetros de entrada e de saída são os mesmos.

Em sua publicação, Grena [11] comparou os dados de saída dos cinco algoritmos com os do Michalsky [16], de Blanco-Muriel *et al.* [18] e um algoritmo publicado pelo Grena [14] anteriormente. A comparação é realizada utilizando 20 milhões de amostras randômicas, por meio do cálculo dos erros máximos e mínimos e do desvio padrão, tendo como valores de referência os obtidos pelo SPA [12]. O custo computacional e o tempo de validade também são comparados. Os erros máximos apresentados pelos cinco algoritmos são  $0,2^\circ$ ,  $0,04^\circ$ ,  $0,01^\circ$ ,  $0,01^\circ$  e  $0,0027^\circ$ , respectivamente. O Grena 5 possui melhor precisão e apesar de ser o algoritmo mais complexo dos cinco propostos, quando comparado com o SPA, tem uma complexidade computacional baixa.

Cada algoritmo possui duas versões, a curta e a completa. O algoritmo curto tem como dados de saída apenas a ascensão direta, a declinação e o ângulo horário. A versão completa tem como dados de saída, além dos ângulos calculados pelos algoritmos curtos, os ângulos de zênite, de azimute e elevação solar. É impossível calcular a refração atmosférica nos algoritmos curtos, pois esse cálculo requer dados de elevação solar, que não são calculados nos algoritmos curtos. Portanto, a versão curta só pode ser utilizada quando a refração atmosférica pode ser desconsiderada. Um outro problema relacionado à utilização dos algoritmos curtos é que eles só calculam as coordenadas geocêntricas, ou seja, coordenadas que possuem como ponto de observação o centro da Terra, e do ponto de vista de aplicações em engenharia solar, é conveniente utilizar um sistema de coordenadas topocêntricas, que tem como ponto de observação a superfície terrestre, visto que os sistemas são instalados na superfície terrestre [11].

Nas subseções seguintes o passo a passo dos cinco algoritmos propostos por Grena [11] é apresentado, de forma geral, sem entrar em detalhes no equacionamento.

1) *Primeiro Passo*: O primeiro passo consiste no cálculo do tempo, onde calcula-se um tempo  $t$  correspondente ao número de dias a partir do início do ano 2060 (aproximadamente o ponto médio do intervalo 2010–2110), de acordo com o *Universal Time*. Esse passo é uma simples conversão da data e horas na escala de tempo  $t$ .

2) *Corpo Central*:

**a. Grena 1** O corpo central do Grena 1 utiliza somente duas funções trigonométricas para calcular a ascensão direta e a declinação, usando a frequência angular fundamental  $\omega = 0,017202786 \times dia^{-1}$  até a segunda harmônica. Nesse passo o ângulo horário também é calculado.

O algoritmo curto termina aqui. Para o algoritmo completo é necessário calcular o último passo dos algoritmos, descrito na seção III-B3.

### b. Grena 2

O Grena 2 é uma melhoria do algoritmo anterior, utilizando a mesma frequência angular fundamental até a quarta harmônica, de forma a reduzir o erro máximo angular para  $0,034^\circ$ , de acordo com Grena [11]. Assim como no Grena 1, calcula-se a ascensão direta, declinação e ângulo horário.

O algoritmo curto termina aqui. Para o algoritmo completo é necessário calcular o último passo dos algoritmos, descrito na seção III-B3.

### c. Grena 3

No Grena 3, calcula-se a longitude eclíptica do Sol e depois converte-se em ascensão direta e declinação, com o intuito de obter um erro angular máximo abaixo de  $0,01^\circ$ . Tais fórmulas são mais compactas, porém mais pesadas computacionalmente devido às transformações trigonométricas necessárias para converter a longitude eclíptica em ascensão direta e declinação [11].

Após calcular a longitude eclíptica do Sol e o eixo de inclinação, é possível calcular a ascensão direta, a declinação e o ângulo horário.

O algoritmo curto termina aqui. Para o algoritmo completo é necessário calcular o último passo dos algoritmos, descrito na seção III-B3.

### d. Grena 4

O Grena 4 é muito parecido com o Grena 3, com a adição da correção de nutação, o que reduz aproximadamente 30% do erro máximo das coordenadas globais, porém não afeta as coordenadas locais de forma considerável. Portanto, é improvável que esse algoritmo seja utilizado em aplicações de engenharia solar, onde somente as coordenadas locais são utilizadas.

### e. Grena 5

No Grena 5, além da correção de nutação, outras perturbações são levadas em consideração, como o efeito da Lua, de Vênus, de Júpiter e de outros planetas mais distantes, com intuito de reduzir o erro abaixo de  $0,01^\circ$ . De acordo com Meeus [25], quando se deseja uma precisão de até  $0,01^\circ$ , a posição do Sol pode ser calculada assumindo um movimento terrestre puramente elíptico, ou seja, as perturbações da Lua e de outros planetas podem ser desconsideradas. Como no algoritmo 5 deseja-se manter esse erro abaixo de  $0,01^\circ$ , é essencial levar em consideração todos esses efeitos.

3) *Último Passo*: O último passo, que é ignorado nos algoritmos curtos, trata de transformações geográficas que permitem calcular os ângulos de zênite e de azimute, juntamente com a correção de paralaxe e a correção de refração atmosférica, onde a equação para correção da refração atmosférica é equivalente à utilizada no SPA [12].

São calculados os ângulos de elevação, azimute e zênite. Somente os ângulos de zênite e elevação sofrem correção de paralaxe e de refração atmosférica, pois os efeitos no ângulo de azimute são insignificantes.

O cálculo dos algoritmos termina aqui. Equações otimizadas computacionalmente podem ser encontradas em [11].

## C. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

O *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) é uma agência do Departamento de Comércio dos

Estados Unidos cuja missão é prever mudanças climáticas, monitorar costas e oceanos e compartilhar esse conhecimento, além de conservar e monitorar ecossistemas marinhos e costeiros. O *website* do NOAA fornece o NOAA *Solar Calculator* [29], que permite calcular a posição do sol. Esse algoritmo é baseado nas equações do *Astronomical Algorithms* [25].

## IV. METODOLOGIA

Quando se trata do cálculo da posição do Sol, uma preocupação a ser levada em consideração é a precisão dos algoritmos. A precisão necessária depende da aplicação. Equipamentos de medição precisam de algoritmos de erros consideravelmente pequenos, enquanto sistemas de geração fotovoltaica suportam erros de alguns graus sem perdas significativas de geração de energia [11].

Para avaliar a precisão dos algoritmos que calculam a posição do Sol que podem ser aplicados em usinas fotovoltaicas, foi realizada uma análise estatística dos erros dos parâmetros de saída que os mesmos apresentam. Os algoritmos utilizados na análise estatística deste trabalho, SPA [12] e Grena 1-5 [11], foram escolhidos porque são os únicos que permanecerão válidos por um tempo aceitável para serem implementados na construção de uma usina de geração fotovoltaica e funcionam apropriadamente em ambos os hemisférios. Além desses, existem mais dois algoritmos que ainda estão válidos: o Michalsky [16], com validade entre os anos 1950-2050, porém não funciona apropriadamente para o hemisfério Sul; o algoritmo proposto pelo mesmo autor dos Grena 1-5 em 2008 [14] e o algoritmo proposto por Blanc e Wald [13], porém, esses algoritmos expiram no ano 2023 e no ano 2030, respectivamente, inviabilizando sua aplicação em projetos futuros.

A análise estatística foi feita por meio do cálculo do desvio padrão, do erro máximo e dos quantis dos seis algoritmos.

Para a realização das análises estatísticas, foram coletados dados horários dos ângulos de zênite e azimute no período de 2018 a 2027, de todos os seis algoritmos analisados. Portanto, foram coletadas 87.648 amostras de cada algoritmo. Os dados do SPA foram coletados no *site* do NREL [26], enquanto os dados dos Grenas 1-5 [11] foram coletados por meio da compilação do próprio algoritmo disponibilizado pelo autor em [30].

Os dados de entrada inseridos nos algoritmos foram referentes à localização de Campinas, mais precisamente, do bloco E da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), cujas coordenadas geográficas são latitude:  $22,821812^\circ$  S e longitude:  $47,065129^\circ$  O. A temperatura anual média e a pressão anual média consideradas foram  $20^\circ\text{C}$  e  $1018\text{ hPa}$ , respectivamente.

Os parâmetros analisados são os erros dos ângulos de zênite ( $\Delta z$ ) e azimute ( $\Delta Az$ ). Para obtenção desses valores, são subtraídos os ângulos de zênite e azimute computados dos valores de referência, para cada data e hora. Como não existem dados de medição da posição do Sol, os valores de referência dos ângulos de zênite e azimute considerados neste trabalho foram computados no *site* do NOAA [29].

Um outro parâmetro analisado é o erro angular absoluto local, que neste trabalho é chamado de erro do vetor solar (*EVS*). Trata-se da distância entre a posição real (que neste trabalho, por falta de dados de medição, é obtida do NOAA [29]) do Sol e a posição calculada, sendo obtido por meio da Equação 1.

$$EVS = \sqrt{(\Delta Az \sin z)^2 + \Delta z^2} \quad (1)$$

A Equação 1 é uma aproximação. O produto escalar completo é muito trabalhoso e essa fórmula é válida para pequenos ângulos. A aproximação está no fato de que o arco subtendido pelos dois vetores é calculado considerando a diferença no ângulo de zênite (um arco  $dz$ ), a diferença no azimute (um arco  $\sin z \times dAz$ ), e usando o teorema de Pitágoras para obter o arco total, como se os três arcos fossem o componente de um triângulo plano. A aproximação é suficiente para pequenos erros e, de qualquer forma, é uma superestimação, portanto é aceitável para cálculo de erros [11].

O erro do vetor solar é o fator mais relevante na análise da precisão de um algoritmo, uma vez que ele leva em consideração a posição do Sol completa e não apenas valores de ângulo de zênite e azimute separadamente [11].

É importante ressaltar que, como o azimute é indefinido quando o Sol está exatamente no zênite, seus erros podem se tornar muito elevados conforme o ângulo de zênite se aproxima de zero. Porém, o erro do vetor solar não sofre muita influência disso, uma vez que em sua equação o erro do azimute é multiplicado pelo seno do zênite [11].

Foram calculados o valor máximo e o desvio padrão dos erros dos ângulos de zênite e azimute. Para o erro do vetor solar, foram calculados o valor máximo, o desvio padrão, os quartis e os quantis 95 e 99%. Primeiramente, foi realizada uma análise considerando todas as amostras e posteriormente foi realizada uma análise considerando apenas as amostras com zênite inferior a  $90^\circ$ , levando em consideração que, quando o zênite é maior que  $90^\circ$ , não é possível gerar energia, pois o Sol já se pôs.

## V. RESULTADOS

Nas seguintes subseções serão apresentados os resultados obtidos considerando todas as amostras e os resultados obtidos considerando somente as amostras de zênite menor que  $90^\circ$ .

### A. Considerando Todas as Amostras

Na Tabela I podem ser vistos os valores máximos e o desvio padrão dos erros do ângulo de azimute, do ângulo de zênite e do vetor solar, considerando todas as amostras.

Observando a Tabela I, é possível constatar que os valores máximos dos erros de azimute são maiores do que os valores dos demais parâmetros. Isso se deve à indefinição do azimute quando o ângulo de zênite está próximo de zero, resultando em erros elevados. Apesar disso, o erro no vetor solar é atenuado, pois em sua equação o erro do azimute é multiplicado pelo seno do zênite.

O algoritmo que apresentou menor valor máximo de erro de azimute foi o Grena 4, com erro equivalente a  $2,23151^\circ$ .

O SPA apresentou menor valor de erro máximo de ângulo de zênite e de erro máximo de vetor solar, equivalente a  $0,40461^\circ$  e  $0,5367^\circ$ , respectivamente.

Observou-se uma proximidade dos desvios padrões e valores máximos dos erros de vetor solar dos algoritmos Grena 3, Grena 4 e Grena 5. A proximidade entre os erros dos algoritmos 3 e 4 acontece porque eles diferem apenas pela adição da correção de nutação no algoritmo 4, o que influencia principalmente na precisão das coordenadas globais e muito pouco na precisão das coordenadas locais, as quais estão sendo analisadas. Porém, Grena [11] afirma que a complexidade do algoritmo 5 foi aumentada para permitir um ganho de precisão maior, com erro inferior a  $0,01^\circ$ , o que não foi observado nos resultados apresentados na Tabela I, uma vez que os resultados do algoritmo Grena 5 foram muito próximos dos resultados dos algoritmos Grena 3 e 4.

Na Tabela II, é possível observar os valores dos quantis 25, 50, 75, 95 e 99% do erro do vetor solar, levando em consideração todas as amostras. Lembrando que o quantil de ordem 99 indica que 99% das amostras estão abaixo do valor referente a esse quantil e os quantis de ordem 25, 50 e 75 são chamados de quartis. A análise dos quantis é importante, pois permite observar como os erros dos algoritmos se comportam como um todo, visto que o algoritmo pode ter um erro de vetor solar máximo elevado, referente a uma amostra isolada, e ter erros de vetor solar baixos em todas as demais amostras.

A partir da Tabela II observa-se que, dentre os métodos analisados, o mais preciso é o SPA, pois em 99% das amostras os erros de vetor solar encontram-se abaixo de  $0,171007^\circ$ . Seguindo do Grena 3, com quantil 99 igual a  $0,207045^\circ$ .

Para melhor análise dos quartis, foram plotados os gráficos de *box plot* do erro do vetor solar, que constam nas Figs. 2 e 3, onde o gráfico da Fig. 2 considera todas as amostras, e o gráfico da Fig. 3 considera somente as amostras inclusas no quantil 95 para permitir melhor visualização. O segundo gráfico também desconsidera o Grena 1, pois no primeiro gráfico já é possível perceber que esse tem um desempenho inferior aos dos demais, devido à sua grande quantidade de *outliers*.

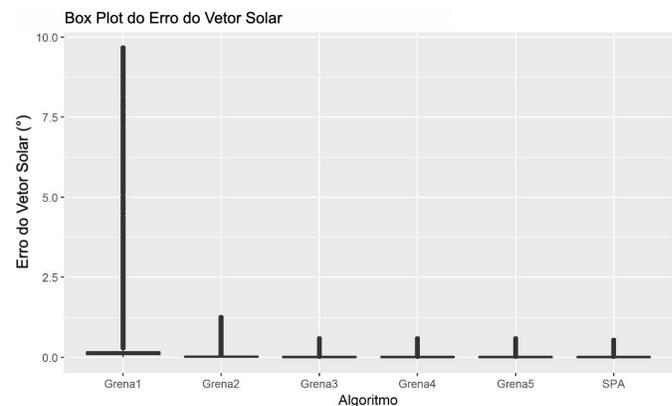


Fig. 2. Gráfico de *box plot* dos algoritmos considerando todas as amostras. Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 3 é possível visualizar que o SPA possui quartis ( $Q_1 = 0,0032^\circ$ ;  $Q_2 = 0,0067^\circ$ ;  $Q_3 = 0,0115^\circ$ ) mais baixos

TABELA I

VALORES MÁXIMOS E DESVIO PADRÃO DOS ERROS DOS ÂNGULOS DE ZÊNITE, AZIMUTE E DO VETOR SOLAR. OS VALORES ESTÃO TODOS EM GRAUS ( $^{\circ}$ ). FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Parâmetro: Estatística	Grena 1	Grena 2	Grena 3	Grena 4	Grena 5	SPA
Azimute: Desvio padrão	0,80105	0,11611	0,0316	0,03087	0,03873	0,03705
Azimute: Valor máximo	29,1179	8,54214	2,40518	2,23151	3,22397	3,35268
Zênite: Desvio padrão	0,09974	0,04236	0,04041	0,04038	0,04044	0,02999
Zênite: Valor máximo	0,62886	0,57671	0,58296	0,58266	0,58216	0,40461
Vetor solar: Desvio padrão	0,45759	0,04926	0,04087	0,04087	0,04143	0,03109
Vetor solar: Valor máximo	9,66423	1,24668	0,58296	0,58267	0,58216	0,53667

TABELA II

QUANTIS DO ERRO DO VETOR SOLAR CONSIDERANDO TODAS AS AMOSTRAS. OS VALORES ESTÃO TODOS EM  $^{\circ}$ . FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Quantil	25	50	75	95	99
Grena 1	0,08665	0,13054	0,17089	0,34599	1,184614
Grena 2	0,0088	0,01609	0,027385	0,066761	0,270371
Grena 3	0,00425	0,008269	0,008269	0,055102	0,207045
Grena 4	0,00389	0,007851	0,014463	0,055469	0,209012
Grena 5	0,00431	0,008281	0,015012	0,054724	0,214784
SPA	0,00338	0,007127	0,012792	0,052354	0,171007

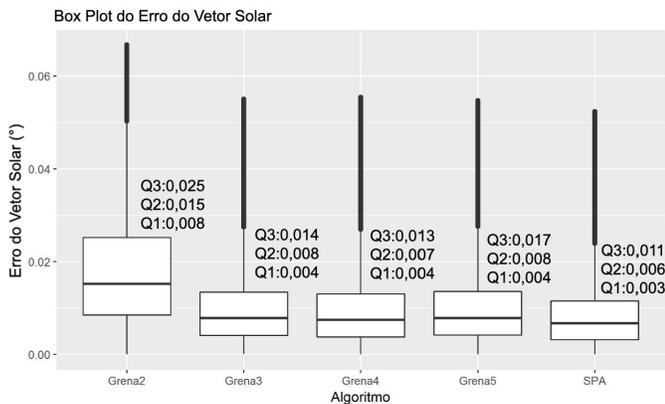


Fig. 3. Gráfico de *box plot* dos algoritmos desconsiderando as amostras acima do quantil 95. Fonte: Autoria própria.

que os demais. Da mesma forma, é possível observar que o Grena 2 possui maiores valores de quartis ( $Q_1 = 0,0086^{\circ}$ ;  $Q_2 = 0,0153^{\circ}$ ;  $Q_3 = 0,0257^{\circ}$ ) e, portanto, maior variabilidade. Os quartis dos algoritmos Grena 3, 4 e 5 são próximos, porém é possível constatar que os valores do Grena 4 ( $Q_1 = 0,004^{\circ}$ ;  $Q_2 = 0,0077^{\circ}$ ;  $Q_3 = 0,0137^{\circ}$ ) são menores.

### B. Considerando Amostras de Ângulo de Zênite Menor que $90^{\circ}$

Um ângulo de zênite superior a  $90^{\circ}$  significa que o Sol está atrás da superfície [31], ou seja, que está de noite. Portanto, analisar amostras de ângulo zênite menor que  $90^{\circ}$  significa analisar resultados de posição do Sol somente durante o dia, sendo esse o período em que os sistemas de geração fotovoltaica geram energia.

Os valores dos quantis 25, 50, 75, 95 e 99% do erro do vetor solar levando em consideração somente as amostras de

ângulo de zênite menor que  $90^{\circ}$  constam na Tabela III.

TABELA III

QUANTIS 25, 50, 75, 95 E 99 DO ERRO DO VETOR SOLAR CONSIDERANDO SOMENTE AS AMOSTRAS DE ÂNGULO DE ZÊNITE  $\leq 90^{\circ}$ . OS VALORES ESTÃO TODOS EM  $^{\circ}$ . FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Quantil	25	50	75	95	99
Grena 1	0,08755	0,128199	0,163874	0,357018	1,237425
Grena 2	0,00738	0,014011	0,023584	0,041531	0,121087
Grena 3	0,00294	0,005496	0,010366	0,026657	0,057414
Grena 4	0,00298	0,005324	0,010077	0,026533	0,06937
Grena 5	0,00321	0,005735	0,010403	0,026256	0,065056
SPA	0,00211	0,004273	0,007447	0,01384	0,040514

Comparando os valores da Tabela II com os da Tabela III é possível verificar uma redução nos erros do vetor solar ao desconsiderar amostras de ângulo de zênite maior que  $90^{\circ}$ . Para o quantil 99 do SPA, por exemplo, essa redução foi de  $0,130493^{\circ}$ . Portanto, se pode concluir que esses algoritmos têm erros maiores ao calcular a posição solar à noite, o que não influencia a geração de energia elétrica. A única exceção está no algoritmo Grena 1, que possui maiores valores de erros dos quantis 25, 95 e 99 quando as amostras de ângulo de zênite maior que  $90^{\circ}$  são desconsideradas, ou seja, apresenta maiores erros durante o dia. Para o quantil 99, essa diferença é de  $0,052811^{\circ}$ .

Considerando amostras de ângulo de zênite menor que  $90^{\circ}$ , o SPA apresentou menor erro, onde 99% das amostras apresentam erro de vetor solar menor que  $0,040514^{\circ}$ . Seguindo do Grena 5, com quantil 99 igual a  $0,065056^{\circ}$ .

Para melhor visualização, foram plotados os gráficos de *box plot* nas Figs. 4 e 5. A Fig 4 considera todas as amostras de zênite menor que  $90^{\circ}$ , enquanto a Fig. 5 desconsidera, além das amostras de zênite maior que  $90^{\circ}$ , as amostras que não estão inclusas no quantil 95 para permitir melhor visualização. Pelo mesmo motivo da análise do item V-A, o *box plot* do algoritmo Grena 1 também foi excluído na Fig. 5.

É possível constatar que ao desconsiderar amostras de ângulo de zênite maior que  $90^{\circ}$ , há uma diminuição nos valores dos quartis, das medianas, dos *outliers* e na variabilidade dos algoritmos Grena 2, 3, 4, 5 e SPA, enfatizando um melhor desempenho dos algoritmos durante o período diurno.

Assim, como na análise anterior, o SPA possui menores valores de quartis ( $Q_1 = 0,0021^{\circ}$ ;  $Q_2 = 0,0042^{\circ}$ ;  $Q_3 = 0,0073^{\circ}$ ) e variabilidade, seguido do Grena 4 ( $Q_1 = 0,0033^{\circ}$ ;  $Q_2 = 0,0057^{\circ}$ ;  $Q_3 = 0,0107^{\circ}$ ). O Grena 3 e o Grena 5 têm

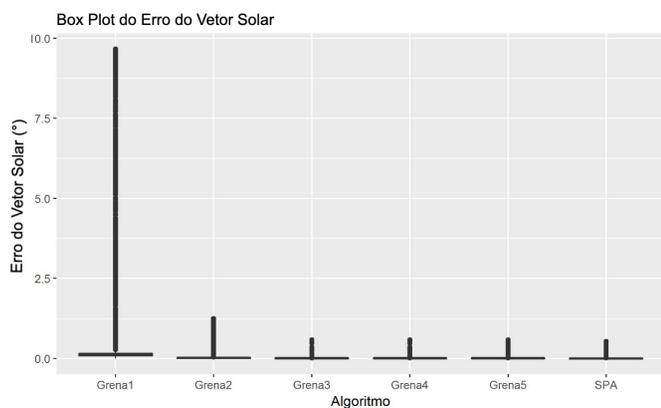


Fig. 4. Gráfico de *box plot* dos algoritmos considerando as amostras de ângulo de zênite menor que  $90^\circ$ . Fonte: Autoria própria.

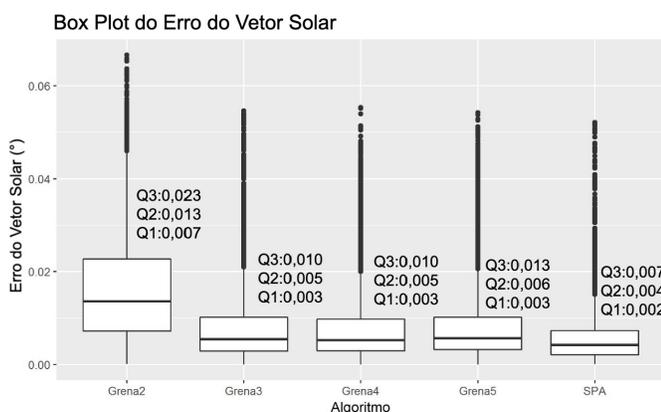


Fig. 5. Gráfico de *box plot* dos algoritmos desconsiderando as amostras de zênite maior que  $90^\circ$  e que não estão no quantil 95. Fonte: Autoria própria.

valores próximos aos do Gren 4, porém, possuem quartis e variabilidade maiores.

A partir das análises realizadas é possível ranquear os algoritmos, conforme a ordem decrescente de desempenho, para a localidade de Campinas, como segue: SPA, Gren 3, Gren 5, Gren 4, Gren 2 e Gren 1.

## VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise estatística da precisão dos algoritmos de cálculo da posição solar Gren 1-5 e SPA. A partir dessa análise, constatou-se que o SPA obteve melhor desempenho, tanto considerando todas as amostras quanto considerando apenas as amostras diurnas.

Na análise que considerava somente amostras de ângulo de zênite menor que  $90^\circ$ , 99% das amostras do SPA apresentavam erro de vetor solar menor que  $0,040514^\circ$ . Esse resultado é superior ao apresentado por Reda e Andreas [12], sendo necessário enfatizar que em sua análise estatística, foram consideradas apenas 48 amostras referentes à 00:00 hora do segundo dia de cada mês dos anos 1994-1996 e 2004, enquanto a análise apresentada neste trabalho levou em consideração 87.648 amostras entre os anos 2018-2027.

Da mesma forma, é importante ressaltar que a análise estatística realizada por Gren [11] considerava 20 milhões

de amostras, porém utilizando resultados do SPA como parâmetro de referência. Neste trabalho os dados de referência utilizados foram os disponibilizados pelo NOAA [29], cujas equações são baseadas nas equações de Meeus [25]. A maioria dos algoritmos de cálculo da posição solar é resultante de simplificações desse algoritmo, inclusive o próprio SPA.

Além disso, nas demais análises de erro apresentadas na literatura, foram levados em consideração apenas os erros máximos e mínimos e o desvio padrão. Enquanto neste trabalho os quantis também foram analisados, o que permite analisar como os erros de um algoritmo se comportam como um todo, pois eles podem ter erros de vetor solar máximo muito altos referentes a uma amostra isolada, e ter erros de vetor solar baixos em todas as demais amostras.

## AGRADECIMENTOS

This work was supported by CNPq, CAPES, FAPESP (2016/08645-9), and SEW Eurodrive-Brazil.

## REFERÊNCIAS

- [1] Z. Zhen, Z. Zengwei, S. Li, W. Jun, P. Wuchun, L. Zhikang, W. Lei, C. Wei, and S. Yunhua, "The effects of inclined angle modification and diffuse radiation on the sun-tracking photovoltaic system," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 5, pp. 1410–1415, 2017.
- [2] B. G. Bhang, W. Lee, G. G. Kim, J. H. Choi, S. Y. Park, and H. Ahn, "Power performance of bifacial c-si pv modules with different shading ratios," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 5, pp. 1413–1420, 2019.
- [3] R. B. Bollipo, S. Mikkili, and P. K. Bonthagorla, "Critical review on pv mppt techniques: Classical, intelligent and optimisation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 9, pp. 1433–1452, 2020.
- [4] R. G. Vieira, F. K. Guerra, M. R. Vale, and M. M. Araújo, "Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 672–681, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.089>
- [5] S. Seme, G. Srpčič, D. Kavšek, S. Božičnik, T. Letnik, Z. Praunseis, B. Štumberger, and M. Hadžiselimović, "Dual-axis photovoltaic tracking system – Design and experimental investigation," *Energy*, vol. 139, pp. 1267–1274, 2017.
- [6] D. Mereddy, V. Vijaya Rama Raju, and T. Sadula, "Smart Dual Axes Solar tracking," *International Conference on Energy Systems and Applications, ICESA 2015*, no. 978, pp. 370–374, 2016.
- [7] Z. Li, X. Liu, and R. Tang, "Optical performance of vertical single-axis tracked solar panels," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 64–68, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.05.020>
- [8] M. H. Sidek, N. Azis, W. Z. Hasan, M. Z. Ab Kadir, S. Shafie, and M. A. Radzi, "Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control," *Energy*, vol. 127, p. 803, 2017.

- [9] E. Díaz-Dorado, J. Cidrás, and C. Carrillo, "A method to estimate the energy production of photovoltaic trackers under shading conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, no. February, pp. 433–450, 2017.
- [10] V. Sumathi, R. Jayapragash, A. Bakshi, and P. Kumar Akella, "Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, no. February, pp. 130–138, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.013>
- [11] R. Grena, "Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110," *Solar Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1323–1337, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.024>
- [12] I. Reda and A. Andreas, "Solar position algorithm for solar radiation applications," *Solar Energy*, vol. 76, no. 5, pp. 577–589, 2004.
- [13] P. Blanc and L. Wald, "The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period," *Solar Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 3072–3083, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.018>
- [14] R. Grena, "An algorithm for the computation of the solar position," *Solar Energy*, vol. 82, no. 5, pp. 462–470, 2008.
- [15] C. L. Pitman and L. L. Vant-Hull, "Errors in locating the Sun and their effect on solar intensity predictions," pp. 701–706, 1978.
- [16] J. J. Michalsky, "The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950 - 2050)," *Solar Energy*, vol. 40, no. 5, pp. 227–235, 1988.
- [17] R. Walraven, "Calculating the position of the sun," *Solar Energy*, vol. 20, no. 5, pp. 393–397, 1978.
- [18] M. Blanco-Muriel, D. C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla, and M. Lara-Coira, "Computing the solar vector," *Solar Energy*, vol. 70, no. 5, pp. 431–441, 2001.
- [19] Shruthi K J, Viswanatha C, Giridhar Kini P, and M. Divekar, "Anomalies in practical solar photovoltaic installations and tilt angle optimization," in *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2016, pp. 1–4.
- [20] S. Seme, G. Štumberger, and J. Voršič, "Maximum efficiency trajectories of a two-axis sun tracking system determined considering tracking system consumption," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1280–1290, 2011.
- [21] W. Nsengiyumva, S. G. Chen, L. Hu, and X. Chen, "Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, no. April 2017, pp. 250–279, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>
- [22] R. Singh, S. Kumar, A. Gehlot, and R. Pachauri, "An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. April 2017, pp. 3263–3278, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.018>
- [23] H. Peng, T. Du, and W. Gu, "Application design of a sun-tracking system," in *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2013, pp. 5094–5098.
- [24] D. C. Huynh, T. M. Nguyen, M. W. Dunnigan, and M. A. Mueller, "Comparison between open- and closed-loop trackers of a solar photovoltaic system," in *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, 2013, pp. 128–133.
- [25] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, 2nd ed. Richmond: Willmann-Bell, Inc., 1998.
- [26] NREL, "MIDC SPA Calculator," 2014. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/midc/solpos/spa.html>
- [27] I. Reda, A. Andreas, and A. A. Nrel, "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised)," *Nrel/Tp-560-34302*, no. January, pp. 1–56, 2008.
- [28] USNO, *Astronomical Almanac*, Norwich, 2004.
- [29] NOAA, "NOAA Solar Calculator," 2018. [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>
- [30] ENEA, "Sun Position," 2012. [Online]. Available: [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php)
- [31] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118671603.ch23>



**Karen Barbosa de Melo** . é Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica na UNICAMP, onde desenvolve pesquisa sobre seguidores solares, algoritmos de cálculo da posição solar e modelagem de irradiância no Laboratório de Energia e Sistemas Fotovoltaicos (LESF).



**Lucas Ramos Tavares** . está cursando Estatística na UNICAMP. Desenvolveu pesquisa sobre banco de dados e análise estatística aplicados a energia solar. Atualmente, também é cientista de dados em uma empresa de TI e consultor de empresas e pesquisadores.



**Marcelo Gradella Villalva** . é professor da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC) da UNICAMP. Doutor e Mestre em Engenharia Elétrica pela UNICAMP. Diretor do Laboratório de Energia e Sistemas Fotovoltaicos (LESF) da UNICAMP.