

Mapeamento da trajetória solar para aplicação em rastreadores solares

Fausto Batista Felix Silva (UTFPR) - fausto_batista@hotmail.com

Jair Urbanetz Junior (UTFPR) - urbanetz@utfpr.edu.br

Resumo:

Este trabalho apresenta uma metodologia para mapear a trajetória do sol, tanto em sua variação do ângulo azimutal, no qual descreve uma trajetória no sentido leste oeste e também a variação do ângulo de inclinação solar descrevendo a trajetória norte sul. O mapeamento foi feito através de softwares com aplicação em trajetória solar apresentando o ângulo de posicionamento do sol em relação ao norte geográfico. O mapeamento foi aplicado em um seguidor solar de dois eixos na cidade de Curitiba-PR e os índices de mérito do seguidor foram comparados a um módulo fotovoltaico fixo com as mesmas características elétricas do módulo utilizado no rastreador. O trabalho apresenta a comparação dos índices de mérito e o ganho na energia gerada do seguidor desenvolvido a partir do mapeamento feito e do módulo fixo. O trabalho busca mostrar também que uma vantagem que um seguidor solar operado por mapeamento pode apresentar em relação aos seguidores que utilizam sensores para buscar a melhor irradiância, é que essa movimentação ocorre somente uma vez por hora em movimentos discretos, por outro lado seguidores que utilizam sensores, possuem movimentação contínua toda vez que o sol sai da posição correta, assim exige maior movimentação podendo ocorrer maior desgaste em sua estrutura mecânica.

Palavras-chave: *Trajетória Solar, Seguidor Solar, Energia solar*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Concentração e rastreamento para conversão fotovoltaica*

MAPEAMENTO DA TRAJETÓRIA SOLAR PARA APLICAÇÃO EM RASTREADORES SOLARES

Fausto Batista Felix Silva – faustosilva@unibrasil.com.br

Centro Universitário UniBrasill

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação de Sistemas de Energia

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia para mapear a trajetória do sol, tanto em sua variação do ângulo azimutal, no qual descreve uma trajetória no sentido leste oeste e também a variação do ângulo de inclinação solar descrevendo a trajetória norte sul. O mapeamento foi feito através de softwares com aplicação em trajetória solar apresentando o ângulo de posicionamento do sol em relação ao norte geográfico. O mapeamento foi aplicado em um seguidor solar de dois eixos na cidade de Curitiba-PR e os índices de mérito do seguidor foram comparados a um módulo fotovoltaico fixo com as mesmas características elétricas do módulo utilizado no rastreador. O trabalho apresenta a comparação dos índices de mérito e o ganho na energia gerada do seguidor desenvolvido a partir do mapeamento feito e do módulo fixo. O trabalho busca mostrar também que uma vantagem que um seguidor solar operado por mapeamento pode apresentar em relação aos seguidores que utilizam sensores para buscar a melhor irradiância, é que essa movimentação ocorre somente uma vez por hora em movimentos discretos, por outro lado seguidores que utilizam sensores, possuem movimentação contínua toda vez que o sol sai da posição correta, assim exige maior movimentação podendo ocorrer maior desgaste em sua estrutura mecânica.

Palavras-chave: Trajetória Solar, Seguidor Solar, Energia solar

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as questões climáticas e energéticas têm ganho cada vez mais destaque, por isso é importante estudar e desenvolver alternativas energéticas limpas e renováveis, que possam atender as necessidades atuais de forma rentável e economicamente competitiva (CORTEZ, 2013).

A energia produzida por sistemas fotovoltaicos, limita-se em sua eficiência energética em função do quanto de luz cada módulo fotovoltaico é capaz de captar pelo fato de ser instalado em ângulo fixo, com isso não se consegue maximizar a captação dos raios solares em todos os dias ou meses do ano nem ao longo do dia, fazendo-se necessário adotar um ângulo que possibilite uma produção média de energia em todas as estações do ano, pois com a escolha incorreta de inclinação, reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico (Villalva e Gazoli, 2012).

Devido à existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano. No movimento de rotação a terra gira ao redor de um eixo Leste-Oeste caracterizada pelo ângulo azimutal, que passa por seus polos, originando o dia e a noite. O movimento de translação da terra é feito no eixo Norte-Sul determinando as quatro diferentes estações do ano, onde para cada uma o sol tem uma movimentação característica como o solstício que é a época em que o sol passa pela sua maior declinação boreal ou austral, e durante a qual cessa de afastar-se do equador e também o Equinócio que é o ponto da órbita da terra em que se registra uma igual duração do dia e da noite (PINHO; GALDINO, 2014). Esses eventos ocorrem em função das estações do ano conforme a Tab. 1.

Tabela 1 – Solstícios e Equinócios

Data	Denominação
21 de março	Equinócio de outono
21 de setembro	Equinócio de primavera
21 de junho	Solstício de inverno
21 de dezembro	Solstício de verão

Um sistema de rastreamento solar a partir do mapeamento da posição do sol pode otimizar o ângulo de incidência de raios solares automaticamente ao longo do dia e ao longo dos meses do ano, levando em consideração que devido à existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano.

2. OBJETIVO

Partindo do princípio que a trajetória solar influencia diretamente na incidência de raios solares nos módulos fotovoltaicos e como consequência afeta a geração de energia do sistema como um todo, esse trabalho tem como objetivo demonstrar a metodologia de mapeamento da trajetória solar para que possa ser aplicado em um rastreador solar de um ou dois eixos. Também tem como objetivo comparar a eficiência energética de um módulo instalado em ângulos fixos com um módulo instalado com rastreador de dois eixos que se movimenta a partir do mapeamento da trajetória solar feita.

3. DESENVOLVIMENTO

O mapeamento foi feito em duas etapas, primeiramente mapeando a trajetória solar no ângulo azimutal e posteriormente a trajetória solar durante o ano de acordo com a variação da inclinação solar.

3.1 Mapeamento do ângulo azimutal

Através de um simulador de projeção da trajetória solar, que explora as relações entre diferentes tipos de diagrama do caminho do Sol e suas projeções de altitude, foi simulado a trajetória do sol inserindo a localidade de estudo no mapa do simulador no qual é possível observar os ângulos de inclinação ao longo do dia e o sombreamento como mostram as Fig. 1, 2, 3, 4 e 5. O mapeamento foi feito na virada de cada estação (20 de março, 21 de junho, 22 de setembro e 21 de dezembro), assim foi possível ajustar o ângulo do seguidor com maior exatidão de acordo com a inclinação do sol. O simulador *Sun Path* foi projetado pelo Dr. Andrew Marsh, arquiteto, consultor de design, acadêmico e desenvolvedor de *software*. Andrew trabalhou em muitos projetos de construção orientados para o desempenho em todo o mundo e criou uma ampla gama de *softwares* de projeto técnico e analítico que agora são usados internacionalmente tanto na educação quanto na prática (MARSH, 2018).

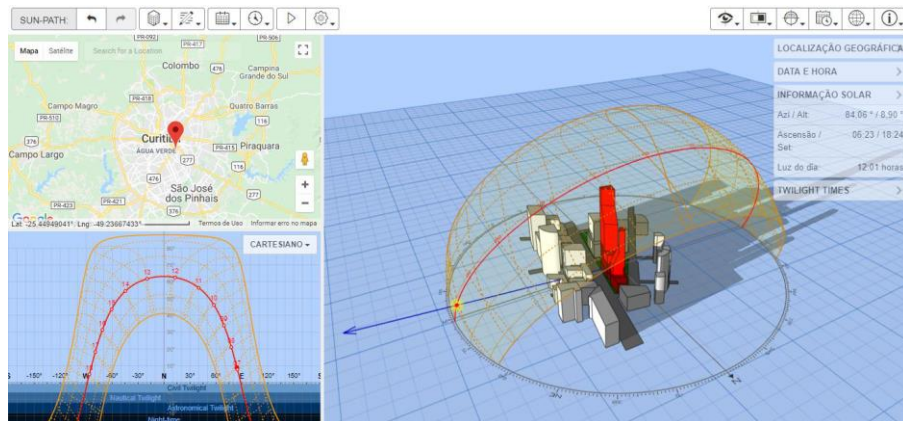


Figura 1 - Trajetória do Sol - 07h

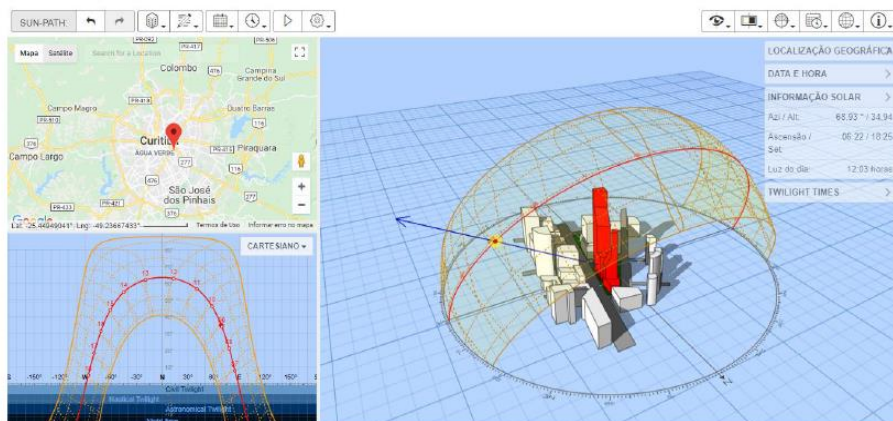


Figura 2 - Trajetória do Sol - 10h

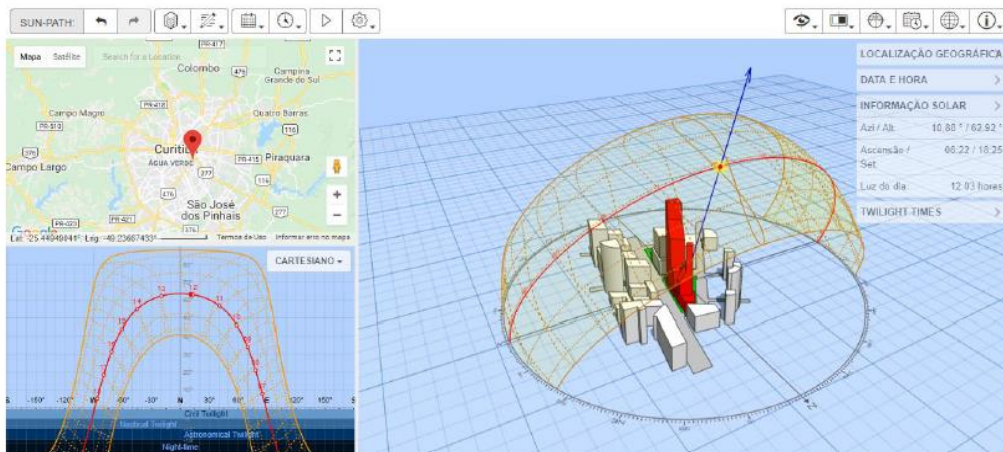


Figura 3 - Trajetória do Sol - 12h

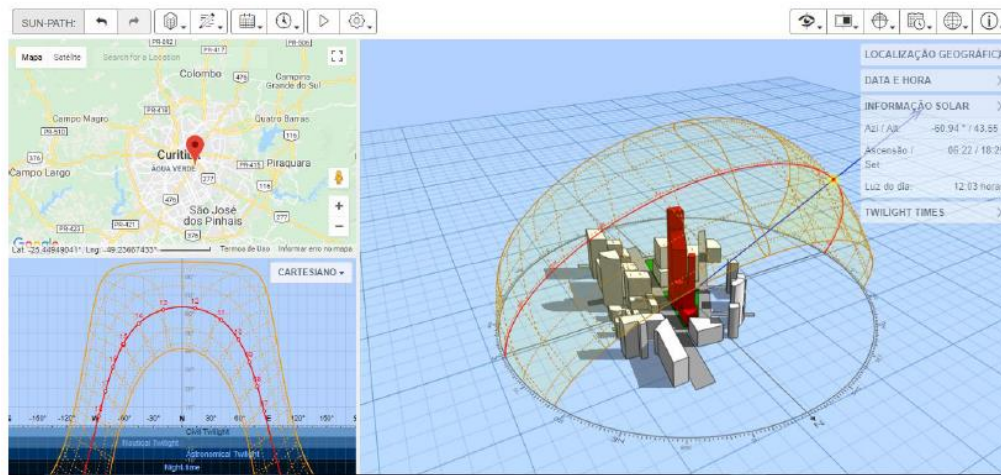


Figura 4 - Trajetória do Sol - 15h

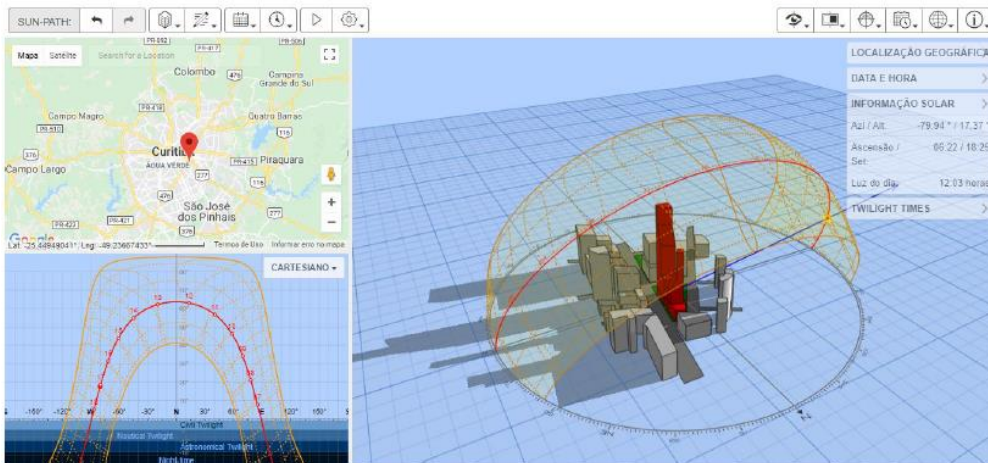


Figura 5 - Trajetória do Sol - 17h

Analisando a trajetória do sol no *software* foi possível realizar o mapeamento a cada hora e em diferentes estações do ano. A Tab. 2 mostra que a partir das 07h00 da manhã no outono, o ângulo azimutal estará deslocado 87° a Leste em relação ao norte geográfico, no qual diminui para 80° na hora seguinte (08h00) e assim sucessivamente. A tabela mostra também que o mapeamento da variação do ângulo azimutal, foi feito em cada estação do ano, visto que a variação do ângulo de inclinação solar também influencia na trajetória do sol. Assim na mudança de estação do ano, não altera somente a variação do ângulo azimutal, mas também o ângulo de inclinação solar.

Tabela 2 - Variação do ângulo azimutal (°)

Hora	Variação do Ângulo Azimutal			
	Outono	Inverno	Primavera	Verão
7:00	87	65	84	107
8:00	80	58	77	103
9:00	71	49	68	98
10:00	59	37	56	93
11:00	42	23	38	87
12:00	14	6	5	59
13:00	340	339	332	279
14:00	314	325	309	269
15:00	298	313	295	264
16:00	288	303	285	260
17:00	280	298	278	255
18:00	273	293	271	250
19:00	266	288	264	244

3.2 Mapeamento do ângulo azimutal

Assim como para o mapeamento da trajetória solar ao longo do dia, também foi utilizando um *software* para mapear a variação do ângulo da trajetória solar em função das estações do ano. Foi utilizado o *software* Sunpath 1.0 para obter o movimento do sol aparente e o *software* SOL-AR 6.2 para determinar o diagrama solar em Curitiba. Em ambos os *softwares* são inseridos os dados relacionados a região e também a latitude para se obter os diagramas. A Fig. 6 mostra a carta solar da cidade de Curitiba indicando a latitude de 25,51° e as variações existentes em diferentes períodos.

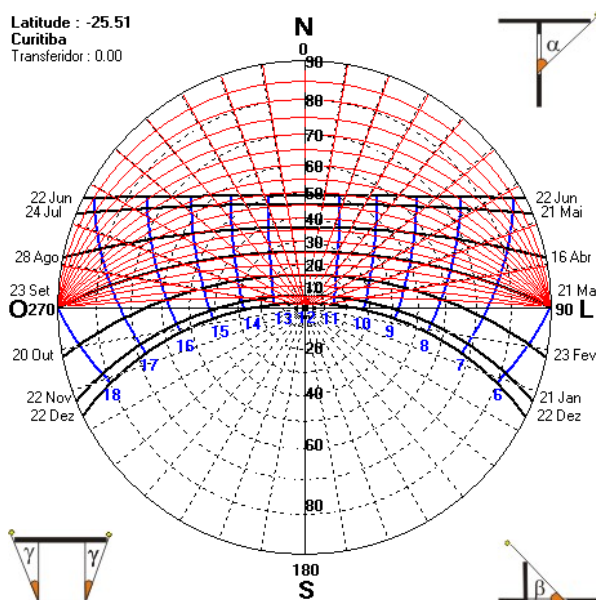


Figura 6 - Diagrama Solar de Curitiba

Para uma melhor visualização da trajetória solar na cidade de Curitiba, a Fig. 7 apresenta um diagrama da movimentação aparente do sol com uma latitude de 25,5° obtida através da figura anterior.

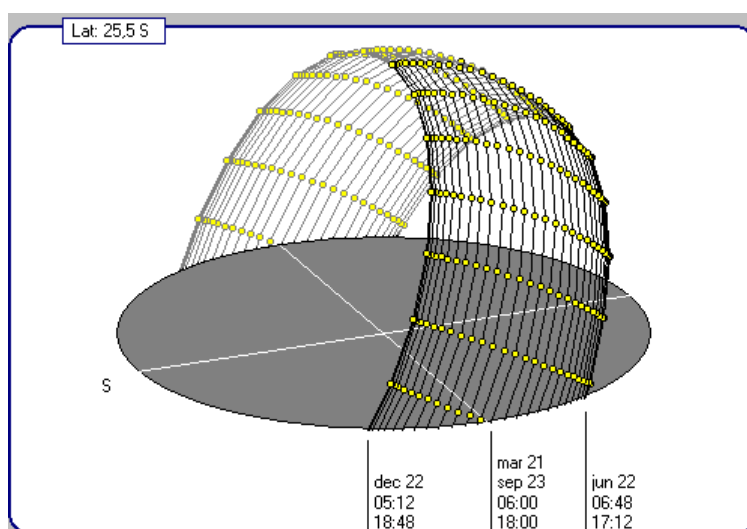


Figura 7 - Movimento aparente do sol

Com o diagrama e a determinação do movimento solar é possível visualizar a inclinação da trajetória do sol em todas as estações. A Tab. 3 apresenta a variação do ângulo de inclinação solar (correspondentes ao ângulo zenital ao meio dia solar) em cada estação do ano. É possível verificar que nas estações da primavera e outono, o ângulo segue a média para cidade de Curitiba que é de 25°, porém no inverno e verão a diferença é bastante significativa tendo um impacto bastante relevante na incidência solar nos módulos fotovoltaicos.

Tabela 3- Variação de ângulo de inclinação solar em diferentes estações do ano

Estação	Ângulo (90°- Altura Solar)
Verão	10°
Outono	25°
Inverno	43°
Primavera	25°

3.3 Implementação de mapeamento em seguidor de dois eixos

O mapeamento da trajetória do sol (dos ângulos azimutal e de inclinação solar) foi implementado em um seguidor solar de dois eixos, instalado na cidade de Curitiba-PR onde foram analisadas a energia gerada e a produtividade entre julho de 2018 e junho de 2019, dessa forma foi possível observar esses índices de mérito em todas as estações do ano. Para verificar a eficiência do sistema mapeado, esses índices foram comparados com os valores de um módulo fotovoltaico com as mesmas características elétricas instalado em ângulo fixo de 25° e com orientação a 0° ao norte.

A movimentação do ângulo azimutal foi feita de forma automática, no qual na estrutura mecânica foi acoplado um motor de passo controlado por um Arduino. No Arduino foi feita uma programação no qual era enviado ao motor sinais elétricos que, movimentavam o módulo fotovoltaico nas posições correspondentes a trajetória solar de acordo com o mapeamento feito. A variação do ângulo de inclinação solar foi feita de forma manual, devido essa variação ocorrer somente uma vez a cada mudança de estação. Dessa forma foi acoplado na estrutura mecânica uma manivela para que o ângulo pudesse ser variado manualmente. Afim de coletar dados de medições de tensão de circuito aberto (V_{OC}) e corrente de curto circuito (I_{SC}) para o cálculo dos índices de mérito, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados trabalhando em conjunto com o Arduino para realizar a aquisição das grandezas necessárias para os cálculos. A Fig. 8 mostra as estruturas do seguidor solar e do módulo fotovoltaico fixo ambos do modelo KC130TM, no local onde foram feitas as análises (Silva, 2019).



Figura 8 - Instalação do módulo fixo ao lado do seguidor

4. RESULTADOS

A comparação da geração de energia entre seguidor de dois eixos e o módulo fotovoltaico fixo, tem como objetivo apresentar o ganho em relação a diferentes estações do ano, mostrando que não só a mudança do ângulo azimutal, mas também a variação do ângulo de inclinação do sol em cada estação também contribui no ganho.

Os experimentos se deram nos meses de agosto, setembro, outubro de 2018 e março, abril e maio de 2019, demonstrando assim uma comparação entre o seguidor solar e o módulo fixo em diferentes estações do ano. O módulo do seguidor solar movimentou-se em um intervalo de uma em uma hora, pois verificou-se que a variação no ganho de energia com o módulo movimentando-se a cada 30 minutos era quase que desprezível.

Para o cálculo da energia gerada, os valores coletados de V_{OC} e I_{SC} são multiplicados pelos coeficientes de tensão ($CoefV$) e de corrente ($CoefI$) obtidos a partir do levantamento das características elétricas do módulo fotovoltaico pela curva I-V.

A seguir, serão demonstrados os resultados das comparações feitas da geração de energia entre, o seguidor solar e o módulo fotovoltaico fixo. As experiências apresentadas são de casos específicos mostrando o comportamento em diferentes situações, como dias ensolarados, parcialmente nublados e dias chuvosos. Assim é possível comparar os dois sistemas (seguidor solar e módulo fixo) em todas as situações possíveis avaliando, ou não a utilização desse sistema.

4.1 Análise de desempenho no inverno

A análise do desempenho no inverno, foi realizado no dia 18 de julho de 2018 com o dia ensolarado, onde foram feitas as primeiras medições, variando tanto o ângulo azimutal como o ângulo de inclinação de acordo com o mapeamento feito para essa estação do ano (inverno). Desta forma o ângulo de inclinação foi ajustado em 43° enquanto o módulo fixo estava em 25° (ângulo ideal para Curitiba). Assim como é possível observar na Fig. 9, houve um ganho maior do seguidor solar na geração de energia que correspondeu a 22% em relação ao módulo fixo.

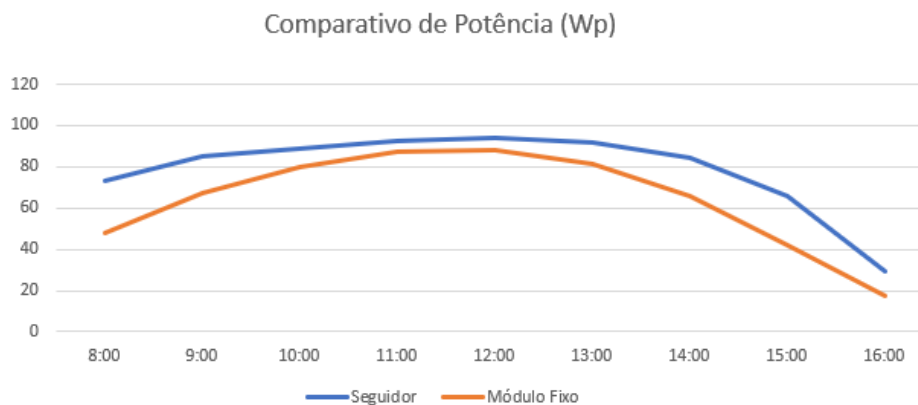


Figura 9 - Comparativo de Potência (17/07/18)

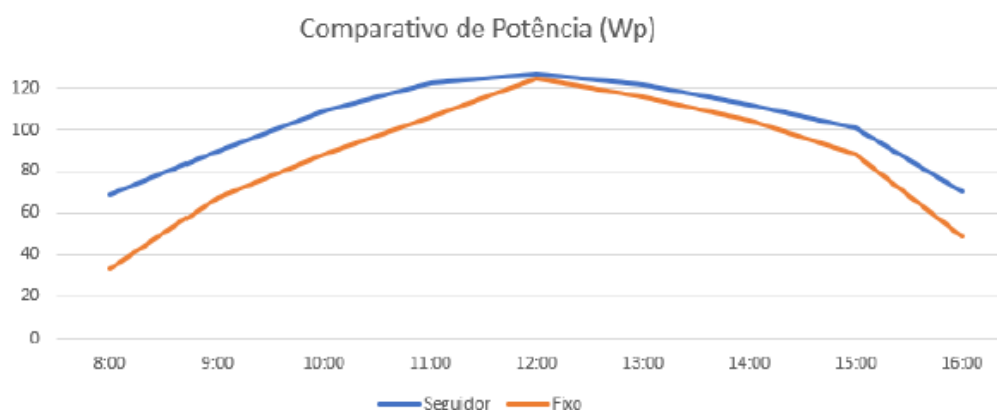
Para essa experiência foram calculados os índices de mérito tanto do seguidor solar quanto do módulo fixo, assim é possível observar os elementos de índice de mérito como energia gerada, produtividade e a variação de energia gerada entre os módulos fotovoltaicos conforme é apresentado na Tab. 4.

Tabela 4 - Índices de mérito (17/07/18)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	705 Wh	576 Wh
Produtividade	5 kWh/kWp	4 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	22%	-

4.2 Análise de desempenho na primavera

Em setembro de 2018 também em um dia ensolarado, foram feitas medições onde o ângulo da altitude solar segue a média de inclinação para a cidade de Curitiba que é de 25°. A média de energia gerada na primavera foi maior que a energia gerada no inverno, conforme é esperado de acordo com média da geração anual de energia na região onde foi feito o estudo. A Fig. 10 mostra o ganho na potência média do seguidor solar em relação ao módulo fotovoltaico fixo, onde o mesmo apresenta um ganho médio de 19%.



A Tab. 5 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia referente ao gráfico acima. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta ganho em relação ao módulo fixo.

Tabela 5 - Índices de mérito (25/09/2018)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	922 Wh	776 Wh
Produtividade	7 kWh/kWp	6 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	19%	-

4.3 Análise de desempenho no verão

No dia 02 de março de 2019 foram coletadas novas medições onde a Fig. 11 mostra o comparativo da geração dos módulos em um dia ensolarado, onde o ângulo de inclinação está ajustado em 10°. O ganho médio na geração de energia foi de 35% com picos de até 73% no final da tarde. O ganho maior em relação ao inverno, se deve ao fato de que a diferença entre o ângulo de inclinação do seguidor em relação ao módulo fixo é de 15° em relação a uma diferença de apenas 18° no inverno. Assim a diferença de irradiação nas diferentes estações é considerável e relevante na geração de energia.

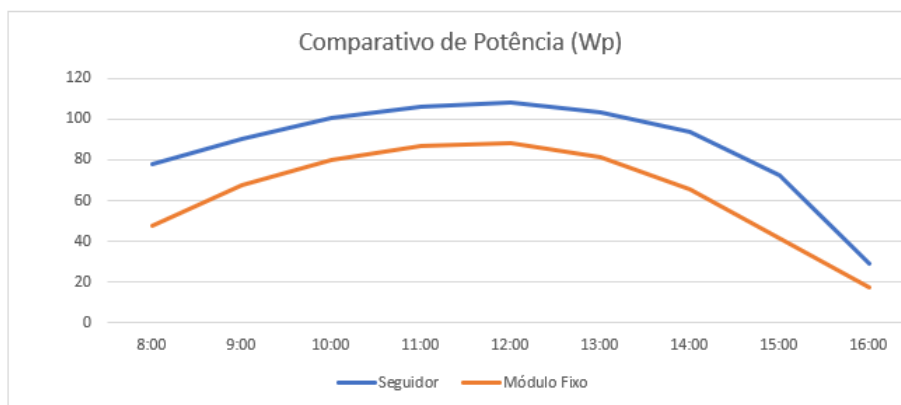


Figura 11 - Comparativo de potência (02/03/2019)

A Tab. 6 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia no verão. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta significativo ganho em relação ao módulo fixo também se comparado com o inverno.

Tabela 6 - Índices de mérito (02/03/2019)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	781 Wh	578 Wh
Produtividade	6 kWh/kWp	4 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	35%	-

4.4 Análise de desempenho no outono

No dia 04 de abril de 2019 foram feitas medições que mostram um ganho de potência inicial de 110% e mantendo essa média alta de aproximadamente no período da manhã na faixa de 50%. Durante o período da tarde, apesar de haver ganho do seguidor do solar em relação ao módulo fixo, é um valor consideravelmente menor na média de 9% com pico de 21% ao final da tarde. No outono o ângulo médio da altitude solar também é de 25°, porém é possíveis ajustes para que aumente um pouco o ganho. A Fig. 12 apresenta a relação entre os dois módulos onde a média do ganho diário foi de 18%.

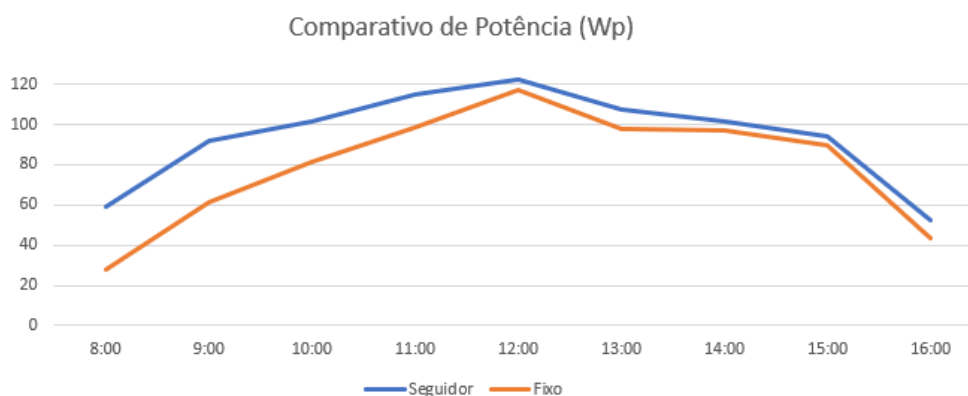


Figura 12 - Comparativo de Potência (30/04/19)

A Tab. 7 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia referente ao gráfico acima. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta ganho em relação ao módulo fixo.

Tabela 7 - Índices de mérito (30/04/19)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	845 Wh	715 Wh
Produtividade	7 kWh/kWp	6 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	18%	-

4.5 Desempenho do sistema em diferentes estações

Fazendo uma análise do desempenho do seguidor solar ao longo de um ano, é possível verificar que em todos os períodos o sistema apresenta um ganho na geração de energia em relação ao módulo fixo. É possível observar que no verão e inverno o ganho é maior que na primavera e no outono, isso se deve ao fato que no inverno e verão o ângulo da altitude solar é bem deslocado em relação ao módulo fixo. O ângulo médio para a cidade de Curitiba é de 25°, sendo que nas estações onde apresentam maior ganho, esse ângulo varia para 10° e 43° no verão e inverno respectivamente. A Tab. 8 mostra essa análise onde é possível verificar qual o ângulo de altitude solar que maior obteve ganho em cada estação do ano e também qual foi o percentual desse ganho. Embora também houvesse ganho se somente o ângulo azimutal fosse variado, seria menor do que variando os dois ângulos.

Tabela 8 - Comparação do desempenho em diferentes estações

Estação	Inclinação solar	Ganho (%)
Verão	10°	35%
Outono	25°	18%
Inverno	43°	22%
Primavera	25°	19%

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto do seguidor utilizando mapeamento da trajetória do sol mostrou-se viável, eficiente e com significativos resultados onde em todas estações do ano apresentou ganho médio entre 18% a 35%, em dias ensolarados onde prevalecia a radiação direta. É possível observar que os maiores ganhos que o seguidor solar apresenta é no período da manhã e perto do fim do dia, onde o ângulo azimutal está consideravelmente deslocado do 0° do norte geográfico.

Notou-se no mapeamento feito através do *software* 3D *sun path* a grande variação da trajetória do sol em diferentes dias, assim é possível fazer um mapeamento ainda mais preciso alterando esse mapeamento de mês em mês ou até a cada semana, porém como o objetivo desse trabalho era sua verificação em diferentes estações, o dia escolhido para o mapeamento era sempre os dias de virada de estação, ou seja, nos dias 20 de março (outono), 21 de junho (inverno), 22 de setembro (primavera) e 21 de dezembro (verão).

Um fato bastante relevante quanto a aplicação de seguidores solares, é a análise dos mapas de irradiação difusa e direta normal nos quais são aplicados para apresentar as melhores e piores regiões para instalação de sistemas com rastreadores. Todos os resultados apresentados são de experiências realizadas em dias ensolarados, assim como a grande maioria dos seguidores solares projetados, com isso sua aplicação se torna viável em regiões onde a irradiação direta seja predominante e constante.

REFERÊNCIAS

- CORTEZ, R. J. M., **Sistemas de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**, Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto - Portugal, 2013.
- MARSH, A. J. **Personal Info**. Disponível em: <http://andrewmarsh.com/pages/about/> – Acesso em 25/06/18
- PINHO, T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014. 529 p.
- SILVA, Fausto B. F. **Automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos através do mapeamento da trajetória do sol**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2012

MAPPING OF SOLAR TRAJECTORY FOR APPLICATION IN SOLAR TRACKERS

Abstract. *This work presents a methodology to map the trajectory of the sun, both in its variation of the azimuthal angle, in which it describes a trajectory in the west east direction and also the variation of the angle of solar inclination describing the north south trajectory. The mapping was done through software with application in solar trajectory presenting the angle of positioning of the sun in relation to the geographic north. The mapping was applied in a two-axis solar follower in the city of Curitiba-PR and the follower's merit indexes were compared to a fixed photovoltaic module with the same electrical characteristics of the module used in the tracker. The work also seeks to show that an advantage that a solar follower operated by mapping can present in relation to followers who use sensors to seek the best irradiance, is that this movement occurs only once per hour in movements discrete, on the other hand followers who use sensors, have continuous movement every time the sun comes out of the correct position, thus requires greater movement and greater wear and tear may occur in its mechanical structure.*

Key words: *Solar Trajectory, Solar Follower, Solar Energy*