

## Otimização por enxame de partículas para a obtenção do ângulo ótimo de instalação de módulos solares fotovoltaicos através da radiação solar extraterrestre.

Matheus M. Cabral (PQ)<sup>1</sup>, Hugo X. Rocha (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Goiás, *Campus* Itumbiara.

**Área do Conhecimento: Engenharias.**

### Resumo

A matriz energética dos países do globo vem constantemente se modificando ao longo dos anos. As fontes renováveis de energia como hidroelétrica, eólica e solar, se destacam como as principais e mais utilizadas. A geração de energia elétrica através de módulos solares fotovoltaicos se destaca como a fonte que chega as mãos do consumidor e, portanto, começa a ser explorada em forma de usinas solares. Para aumentar a eficiência destas, este trabalho constrói um *software* que retorna o melhor ângulo de instalação de módulos solares fotovoltaicos a partir do valor de latitude. Finalmente, mostra a eficiência da utilização do método de otimização por enxame de partículas para problemas que exigem um grande tempo computacional e discute sobre os valores de ângulo retornados pelo *software*, que utiliza as equações de radiação extraterrestre, mostrando que a precisão não representa um ganho tão alto em relação a geração de energia elétrica a longo prazo.

**Palavras-chave:** fontes renováveis; fotovoltaicos; otimização; software; radiação solar extraterrestre;

### Introdução

Os recursos não-renováveis como petróleo, carvão mineral e gás natural, ainda são os principais materiais utilizados como base da matriz energética dos países do globo, a utilização desenfreada destes, desde o tempo da primeira revolução industrial acarreta em impactos na vida da sociedade atual e das futuras. O aumento da quantidade de gases de efeito estufa (metano, dióxido de carbono, perfluorcarbonetos, dentre outros) na atmosfera, acarretando no aquecimento global e o impacto na vida marinha através de vazamentos de petróleo, são exemplos recorrentes.

Contudo, estão ocorrendo mudanças nas matrizes para que estas utilizem recursos que se renovem através dos anos. As principais fontes renováveis como hidrelétricas, eólicas e solares, inserem uma nova perspectiva de geração de energia elétrica que tem como base uma diminuição do impacto ao meio ambiente. A que gradualmente se destacou, pelo custo e acessibilidade do mercado, é a instalação de módulos solares fotovoltaicos para a geração de energia na própria residência do consumidor.

Ainda dentro desse escopo, há a possibilidade de se construir usinas solares utilizando conjuntos maiores de módulos com o intuito de aumentar a potência gerada e vendê-la no mercado de energia. Para esta situação, qualquer melhoria de eficiência de geração possível, representa um ativo a mais no longo prazo.

Com isto, ficam em evidência variáveis como sombreamento, eficiência do módulo e do inversor, modo de conexão dentre os painéis, limpeza e melhor ângulo de instalação. Que podem representar a diferença entre uma usina solar que possa gerar mais potência média durante o ano se comparada a uma que tais variáveis não foram bem escolhidas.

A fim de se estudar uma dessas variáveis, este projeto tem como objetivo a construção de um *software* que retorne o melhor ângulo de instalação ( $\beta$ ) dos módulos solares a partir do valor

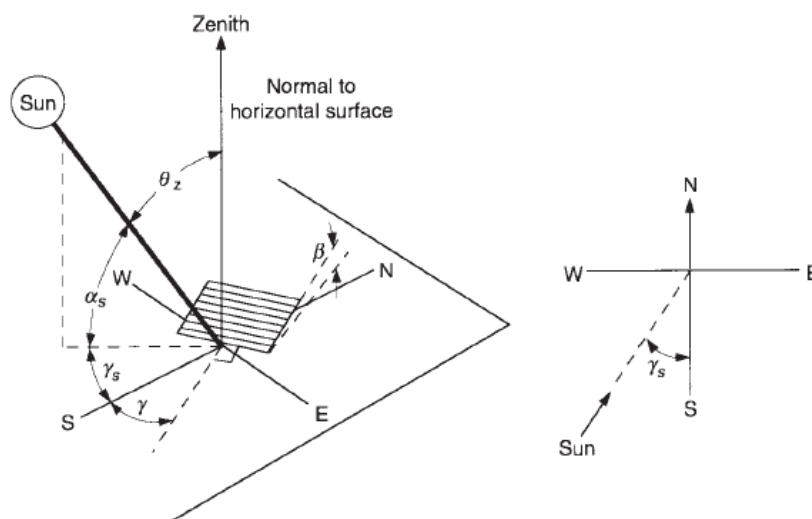
de latitude da localização. Através de uma otimização por enxame de partículas, será encontrado o valor  $\beta$  que maximize a radiação solar extraterrestre média nos módulos durante o ano.

## Material e Métodos

Segundo [1], o Sol é, de fato, um reator de fissão com seus gases constituintes contidos pela força gravitacional. A energia contida nele é transferida para todos os corpos ao redor de sua região. O espectro dos raios solares é enviado, constantemente durante os dias do ano, para todos os continentes do planeta Terra e tal energia deve ser aproveitada.

Para uma superfície plana instalada na Terra, a posição do Sol em relação a este plano, pode ser descrita em termos de vários ângulos [2]. Portanto, traduz-se matematicamente o comportamento da trajetória do Sol, seguindo a nomenclatura de ângulos dada na Figura 1.

**Figura 1** – Posição do sol em termos de vários ângulos.



Fonte: [1].

A equação 1 mostra o cálculo para a declinação solar [3].

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(360 \cdot \frac{284 + \text{JDN}}{365}\right) \quad (1)$$

No qual, JDN é o Dia Juliano, com o valor de 1 para 1º de janeiro e 365 para 31 de dezembro.

O ângulo de incidência ( $\theta$ ) é mostrado pela equação 2 [4].

$$\cos \theta = \operatorname{sen} \delta \cos \Phi \cos \beta - \operatorname{sen} \delta \cos \Phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma + \operatorname{cos} \delta \cos \Phi \cos \beta \cos w + \operatorname{cos} \delta \cos \beta \cos \gamma \cos w + \operatorname{cos} \delta \cos \beta \operatorname{sen} \gamma \cos w \quad (2)$$

Onde,  $\Phi$  é a latitude do local,  $\delta$  a declinação solar que varia durante o dia,  $\beta$  é inclinação do módulo em relação à terra,  $w$  o ângulo horário e  $\gamma$  o ângulo azimutal da superfície.

Para limitar os pontos iniciais e finais do Sol durante o dia, calcula-se o ângulo de nascer e pôr do Sol, seguindo as equações 3 e 4 [4].

$$ws = \cos^{-1}(-\tan \Phi \tan \delta) \quad (3)$$

$$w_r = -\cos^{-1}(-\tan\Phi \tan\delta) \quad (4)$$

No qual,  $w_s$  é o ângulo de pôr do Sol e  $w_r$  o ângulo de nascer do Sol.

Esta radiação está presente em toda a área externa à atmosfera terrestre, neste caso, são desconsiderados efeitos como a difusão da luz por nuvens, ou a radiação refletida no solo [5].

A radiação solar extraterrestre é definida em (5) [4].

$$I = \left(\frac{24 * 3600}{\pi}\right) 1367 \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 * JDN}{365}\right)\right) \cos\Phi \cos\delta \sin w_s + \frac{2\pi w_s}{360} \sin\Phi \cos\delta \quad (5)$$

Para encontrar esta radiação em um dia, utiliza-se a integral da radiação solar extraterrestre com a devida declinação solar durante o dia, indo do ângulo do nascer até o ângulo do pôr do sol, e é mostrada em (6) [4].

$$I_d = \left(\frac{24 * 3600}{2\pi}\right) \int_{w_r}^{w_s} I \cos\theta dw \quad (6)$$

E, fazendo a média em (7), retira-se a média mensal de radiação solar extraterrestre em uma superfície plana [4].

$$I_m = \sum_{i=n_1}^{n_2} \frac{I_{di}}{(n_2 - n_1 + 1)} \quad (7)$$

Onde,  $n_1$  é o primeiro dia deste mês e  $n_2$  o último dia deste mês (ex. Março  $n_1=1$  e  $n_2=31$ ).

Para se encontrar o melhor ângulo de instalação dos módulos, deve-se encontrar o valor de  $\beta$  que retorne o valor máximo da somatória das radiações médias mensais durante o ano. Para este trabalho foi escolhida uma precisão de 4 casas decimais, se aproximando à precisão de goniômetros eletrônicos de alta precisão disponíveis no mercado. Os valores de  $\beta$  estarão limitados entre os valores de  $0,0001^\circ$  e  $89,9999^\circ$ . O ângulo Azimutal ( $\gamma$ ) é considerado  $0^\circ$  para módulos no hemisfério Norte e  $180^\circ$  para o hemisfério Sul.

Em uma dada latitude, com este nível de precisão, o *software* deveria então analisar todos os 900 mil valores de  $\beta$  e para cada um destes fazer operações de integral contidas na equação (6) para os 365 dias de um ano (não bissexto).

A análise totalizaria 32 milhões de integrais, que tem um peso computacional alto, para se encontrar o valor de  $\beta$  que retornasse o maior valor de irradiação solar média no ano para um valor de latitude. Além disto, caso o usuário necessitasse de valores de  $\beta$  para cada uma das latitudes, indo de  $-90^\circ$  até  $90^\circ$  subindo um grau a cada vez, o *software* concluiria um total de aproximadamente 59 bilhões de análises.

Isto acarreta em um tempo computacional alto, portanto inviabilizaria o propósito deste trabalho. Para resolver este problema, é utilizada uma metodologia de otimização por enxame de partículas, em inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO). Esta tem como função convergir ao valor de  $\beta$  que maximize a equação (7), com a precisão de 4 casas decimais, em um menor tempo.

A metodologia do PSO tem como base o comportamento de grupos de aves e peixes [6]. A representação computacional dos indivíduos contidos nestes grupos se dá através de partículas, que contém um valor de posição e velocidade. Além disto, cada uma destas receberão um valor qualitativo baseado no valor retornado da função de avaliação.

A aplicação neste trabalho é para a maximização da equação (7), logo esta é a função de avaliação para este problema. Na primeira iteração, os valores de posição de uma quantidade  $n$

de partículas receberão valores randômicos entre 0,0001 e 89,9999, cada uma destas começarão com velocidade 0.

Os valores de posição das partículas são testados na função de avaliação e cada uma recebe um valor qualitativo de melhor pessoal (Pbest). Os valores de Pbest são comparados uns aos outros e o maior é classificado como melhor global (Gbest).

Na próxima iteração, as velocidades e as posições das partículas serão atualizadas seguindo as equações 8 e 9. Estas levam em consideração a velocidade anterior da partícula, um vetor que aponta para a posição onde a partícula teve seu maior Pbest e outro que aponta para o Gbest.

$$v_i(t + 1) = w * v_i(t) + c_1 * (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 * (g_i(t) - x_i(t)) \quad (8)$$

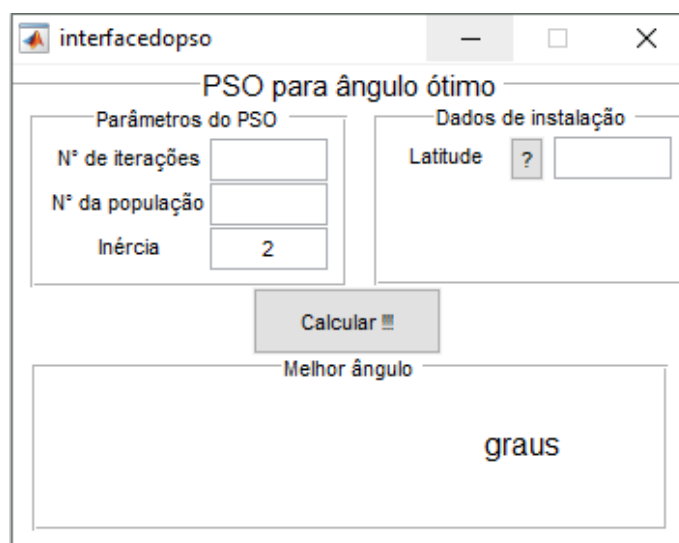
No qual,  $v_i(t+1)$  é a nova velocidade da partícula,  $t$  é o número de iteração,  $w$  é o coeficiente de inércia,  $c_1$  é o coeficiente de aceleração própria,  $c_2$  o coeficiente de aceleração global,  $p_i(t)$  a influência de Pbest e  $g_i(t)$  a influência de Gbest.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (9)$$

Onde,  $x_i(t+1)$  é a nova posição da partícula.

Como um dos objetivos desse trabalho, uma interface foi desenvolvida no componente de criação de interfaces contidas no *software* Matlab®, e é apresentada na figura 2.

**Figura 2** – Interface desenvolvida.



Fonte: Autor.

## Resultados e Discussão ou Relato de Caso

Inicialmente, são feitos testes para verificar a robustez do *software*, em relação a seu tempo computacional e precisão dos valores de ângulo. Todos os testes foram realizados em um computador com um Intel® Core™ i5-5200U CPU com 2,20 GHz de *clock*, uma RAM de 8Gb e sistema operacional Windows® 10.

A tabela 1 mostra os dez testes que foram realizados. A latitude utilizada foi de -18° e os parâmetros do PSO, mostrados na figura 2, foram estabelecidos com um número de 20 iterações e uma população de 20 partículas, o número da inércia não foi mudado, mantendo-se em 2.

**Tabela 1** – Resultados retirados do *software*.

Teste	Tempo (s)	Ângulo $\beta$	Radiação média anual (kWh)
1	101,1870	21,5729°	5,31898360
2	73,4104	21,6115°	5,31898359
3	89,5484	21,5943°	5,31898389
4	70,0949	21,6811°	5,31897747
5	69,4955	21,5815°	5,31898380
6	69,6253	21,5647°	5,31898329
7	69,4859	21,6074°	5,31898370
8	69,5272	21,4787°	5,31897348
9	69,7321	21,5178°	5,31897942
10	69,6204	21,5959°	5,31898388
<b>Média</b>	<b>75,1727</b>	<b>21,5806°</b>	<b>5,31898161</b>

Fonte – Autor.

A coluna 4 da tabela 1 demonstra que tamanha rigorosidade com os valores de ângulo não se justifica. Os valores de radiação média anual só terão uma diferença se utilizado uma precisão de 8 casas decimais, um valor irrisório para o longo prazo. Apenas uma casa após a virgula já é o suficiente para se estabelecer um ângulo ótimo, retirando a necessidade da utilização de equipamentos de precisão, fato que poderia encarecer a etapa de instalação dos módulos.

Quanto à robustez dos valores de ângulos retornados e sua eficiência em uma aplicação para um caso real, há a necessidade de testes *in loco* para se retirar conclusões, o que foge do escopo do trabalho. Mas o que é sabido sobre o método dado pela equação 5, é que este se caracteriza pela simplicidade e pelas aproximações. Para uma melhor precisão, outros métodos são estudados na literatura, estes levam em consideração características da difusão da radiação que chega nos módulos, temperatura, clima e outras variáveis [5,7].

## Conclusões

O *software* desenvolvido retorna, através da entrada de parâmetros do PSO e do ângulo de latitude, o valor de melhor ângulo de instalação de módulos fotovoltaicos através do método de radiação solar extraterrestre. A otimização por enxame de partículas (PSO), se mostra útil para situações onde uma grande quantidade de análises e variáveis de problema se apresentam, reduzindo, portanto, o tempo computacional necessário para se convergir ao número que maximize a função de radiação. Quanto aos valores de ângulo e radiação solar, é demonstrado que não se há necessidade de uma grande precisão na instalação, pois a diferença de radiação, e consequentemente, de geração não serão grandes em longo prazo.

## Referências Bibliográficas

- [1] Duffie, J.A.; Beckman, W.A.; Solar Engineering of Thermal Processes: 4. ed. New Jersey: Editora John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [2] Benford, F.; Bock, J. E.; *A Time Analysis of Sunshine*; 1939.
- [3] Cooper, P. I.; *The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills*; Solar Energy, (1969).
- [4] Guo, M. et al.; *Optimal tilt angle and orientation of photovoltaic modules using HS algorithm in different climates of China*; Appl. Sci. 2017.
- [5] Liu, B.Y.H.; Jordan, R.C.; *The long-term average performance of flat-plate solar-energy collector*; University of Minnesota, Minneapolis, 1962;
- [6] Eberhart, R.; Kennedy, J.; *A new optimizer using particle swarm theory*; Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science – 1995, IEEE;
- [7] Yadav, A.K.; Chandel, S.S.; *Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review*; National Institute of Technology, Hamirpur, India, 2013;