

# Open-source responsive solar tracker performance evaluation: a comparative study

Bruno Massara Rocha<sup>1</sup>, Kevyn Igor Lopes Bortolotti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brazil  
bmassara@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brazil  
kevyn.bortolotti@edu.ufes.br

**Abstract.** Due to the current energy crisis in Brazil and in the world, it is important to explore renewable energy sources, such as photovoltaic systems. Considering this, this research analyzes a responsive capture system called Girassol, which seeks better efficiency in energy production. Tests were performed on the mechanism to assess the advantages and disadvantages of using the solar tracker compared to fixed systems. The tests were carried out using the physical prototype and computational tools to compare the results. The methodology used was Design Science Research, which has to develop and improve affordable solutions, based on experiments and computational simulations. Compared to the physical prototype it was possible observe that there is a greater energy upgrade of the Girassol mainly in the initial and final moments of the daylight hours.

**Keywords:** Parametric Analysis, Solar tracker, Ladybug, Energy efficiency, Responsive system

## 1 Introdução

A atual crise energética que vem se agravando com o passar dos anos e se mostra um grande desafio a ser enfrentado para arquitetos e urbanistas. A energia solar é uma das fontes alternativas mais promissoras, por estar disponível praticamente em todos os lugares geográficos. Sistemas fotovoltaicos foram desenvolvidos como alternativa para fornecer energia limpa e renovável para diversos usos, a partir da conversão da luz do sol em energia elétrica (Tirmikci & Yavuz, 2015). A presente pesquisa traz os resultados do projeto de um seguidor solar de código-aberto que utiliza sensores fotossensíveis e programação responsiva para manter as placas solares permanentemente direcionadas para o sol, visando o aumento da eficiência energética do sistema. A pesquisa tem grande relevância científica devido ao grande potencial de geração de energia solar no Brasil e a importância de atender a agenda ambiental relativa ao uso de energia limpa e renovável, em especial em regiões carentes e isoladas que não tem acesso à energia elétrica (Bondarik et al, 2018).

Esta pesquisa parte do pressuposto de que energia solar fotovoltaica é produzida a partir da corrente elétrica gerada pela radiação solar ao atingir módulos fotossensíveis, e que quanto maior for a radiação solar incidente nos módulos, maior será a energia elétrica produzida. A pesquisa utilizou dados quantitativos de radiação incidente coletados tanto em modelo físico quanto digital para determinar o volume de energia a mais produziria por um seguidor solar em comparação com um módulo fixo.

Foram utilizados componentes de plataformas Arduino e peças customizadas impressas em 3d e cortadas a laser para a produção do modelo físico e recursos do plugin Ladybug (Grasshopper) para a simulação dos dados no modelo digital. Trata-se de pesquisa aplicada que avança nas análises de etapas publicadas em Rocha et al (2020) trazendo dados sobre os testes de funcionamento do sistema e a coleta de dados relacionados à geração de energia.

## 2 Metodologia

A metodologia utilizada foi inspirada na Design Science Research (Van Aken, 2004) caracterizada por sua natureza prescritiva e projetual com o objetivo de desenvolver soluções práticas ou aprimorar soluções para artefatos

e sistemas existentes (Dresch et al, 2015). Os resultados desta pesquisa avançam sobre etapas de desenvolvimento anterior já publicadas (Rocha et al, 2020) e contribuem para o entendimento das possíveis contribuições práticas deste tipo de mecanismo responsivo. Neste sentido, o propósito da metodologia adotada é produzir sistemas que ainda não existem, ou que não estão disponíveis ou acessíveis para a realidade e o contexto em que será instalado. Os procedimentos adotados têm objetivo prescritivo e utilizam como suporte fundamental o desenvolvimento projetual de futuras versões do mecanismo. Por meio do projeto, espera-se com esta metodologia desenvolver artefatos que permitam soluções satisfatórias para problemas práticos da realidade brasileira, em se tratando de geração autônoma de energia elétrica. Os resultados foram avaliados qualitativamente e quantitativamente tendo em vista o desenvolvimento de aplicações e experimentos que permitam não apenas compreender a realidade do equipamento, mas transformá-lo em versões melhoradas. A aplicação da metodologia inclui três etapas: estruturação do projeto, construção do protótipo e da simulação computacional incluindo ciclos de aprimoramento, e a análise dos resultados. A seguir serão descritos os dois processos de etapa de construção do protótipo e simulação computacional destacando os procedimentos e configurações adotadas.

### 3 Desenvolvimento dos Protótipos

#### 3.1 Protótipo Digital

Nesta etapa de análise da eficiência de produção de energia solar do Girassol foi realizada a simulação digital de modelo tridimensional produzido no software *Rhinoceros/Grasshopper* e seu *plugin Ladybug*. O objetivo foi obter dados relacionados à diferença na produção de energia em diferentes situações de exposição à radiação solar. O *Ladybug* é uma extensão do *Grasshopper* que auxilia nas análises ambientais, importando arquivos de informações climáticas para criação de diagramas, cartas solares, análises de radiação, quantidade de insolação em simulações paramétricas (Sadegui pour Roudsari & Pak, 2013). Para o desenvolvimento da simulação foi utilizado modelo 3d em formato *SKP (Sketchup)* importado para o software *Rhinoceros/Grasshopper*. Após o referenciamento do modelo na interface *Grasshopper* foi realizada a separação dos eixos de rotação, para que o movimento do equipamento fosse idêntico ao movimento do modelo físico. Assim, a divisão dos eixos de movimento do modelo 3D foi programada para atender aos mesmos requisitos do protótipo físico.

Para analisar a quantidade de radiação que as placas solares receberiam foi necessário utilizar o arquivo *EPW (Energy Plus Weather)*, um formato que carrega informações climáticas de diversas regiões do planeta que facilitam sobremaneira a operacionalização de simulações climáticas. O arquivo *EPW* é a base de informações a partir de onde o *plugin Ladybug* retira os dados necessários para cada tipo de análise. O arquivo utilizado nesta pesquisa foi do INMET Vitória.

Para fazer com que o modelo simulado acompanhasse a posição solar referente à localização geográfica desejada foi utilizado o componente *SunPath*, que recupera os dados retirados do arquivo *EPW* e gera um diagrama de carta solar que fornece a posição exata do sol. Essa posição foi utilizada como referência para a orientação do movimento de giro do Girassol, simulando a característica heliotrópica (Rocha et al, 2020) adaptativa do seguidor solar. Para a análise da radiação incidente nas placas foi utilizado o componente *GencumulativeSkyMtx*. Ele possui uma função denominada *Radiance's GendayMtx* para especificamente calcular a radiação em cada hora do dia, durante todo o ano. O *GendayMtx* utiliza o *Perez All-Weather Sky Model*, um modelo matemático usado para descrever a quantidade de emissão de luz que ultrapassa ou é refletida por uma superfície. Trata-se de um modelo elaborado para cálculos relacionados à iluminação diária composto por dados reais reunidos em estações climáticas ao redor do mundo. Com o emprego do componente *SelectSkyMtx* é possível definir um período de análise de acordo com um horário, dia e mês específicos. Essa etapa foi decisiva para a implementação dos cálculos de simulação de incidência solar porque trouxe definições científicas comprovadas nos períodos selecionados. O componente *Radiation Analysis* permitiu calcular a quantidade de radiação (Kwh) que incide nas placas solares do modelo digital em um momento específico de insolação definido pelo componente *SelectSkyMtx*, e ainda em sincronia com o direcionamento do Girassol para a posição ótima baseada no *SunPath* (Fig. 1).

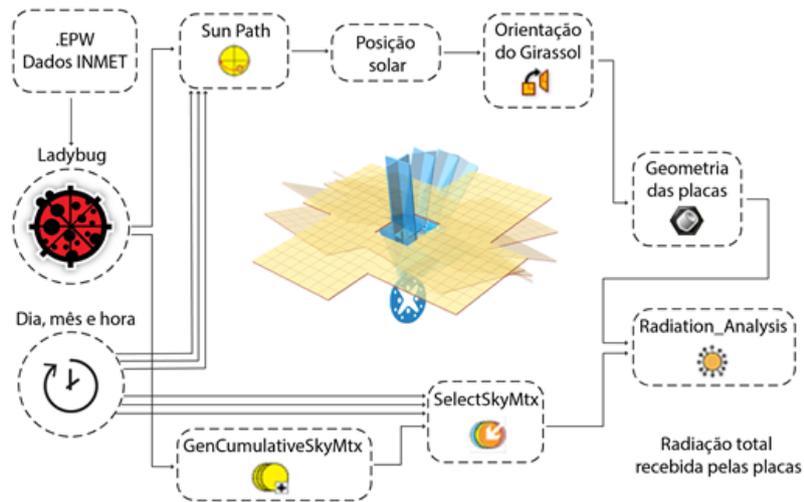


Figura 1. Diagrama ilustrativo da programação desenvolvida no *Grasshopper*. Fonte: Produção do próprio autor, 2021.

O cálculo inicial foi realizado durante os solstícios e equinócios de verão e inverno entre as 8 (oito) e 18 (dezoito) horas. Primeiramente foi realizada a coleta de dados considerando o sistema ativo, ou seja, com as placas sempre orientadas perpendicularmente aos raios solares. Em seguida, nas mesmas datas, foram coletados os dados com o sistema passivo, em conformidade com a orientação comumente adotada pelo mercado comercial que é inclinação correspondente à latitude (20 graus no caso da cidade de Vitória) e orientadas em direção N (norte).

Para determinar a diferença entre os valores entre os dois modos, foi elaborado o valor do coeficiente de aproveitamento que é a proporção no ganho de radiação total nas placas, medidos em kWh/m<sup>2</sup>, entre o sistema ativo ( $Rd_{ativo}$ ) e o sistema inativo ( $Rd_{inativo}$ ), resultando em uma medida de porcentagem. O cálculo realizado considerou os valores coletados pelo sistema passivo como sendo 100% do recebimento de luz em cada dia, e os relacionou diretamente com os valores coletados pelo sistema ativo para determinar o coeficiente de aproveitamento ( $Coef_{aprov}$ ), conforme a equação:

$$Coef_{aprov}(\%) = \frac{100 \times (Rd_{ativo})}{(Rd_{inativo})} \quad (1)$$

O resultado obtido pelo cálculo é a quantidade de radiação total a mais recebida pelas placas do sistema ativo proporcionalmente ao passivo, sendo qualquer acréscimo aos 100% interpretado como ganho no aproveitamento.

Reunindo os valores dos coeficientes de aproveitamento nos dias dos solstícios e equinócios, percebe-se, conforme ilustrado Fig. 2, que o coeficiente de aproveitamento foi maior no sistema ativo (linha em laranja) do que em relação ao sistema passivo (linha em azul), em grande parte dos horários estudados, em especial nos períodos iniciais e finais. Assim, observamos que nos períodos entre 8 (oito) e 10 (dez) horas da manhã e entre 14 (quatorze) e 17 (dezesete) horas houve ganho comprovado de eficiência para os painéis ativos. Nos períodos entre 11 (onze) e 13 (treze) horas o coeficiente de aproveitamento apresentou valores relativamente equivalentes e ganhos pouco expressivos em relação aos módulos passivos.

É importante explicar que as simulações digitais mensuraram a proporção na quantidade de radiação solar recebida pelas superfícies do modelo tridimensional e não a quantidade de energia gerada, pois a conversão da radiação em corrente elétrica depende de outras variáveis intrínsecas às configurações dos módulos fotovoltaicos, que não foram realizadas por estarem fora do escopo desta etapa. A figura a seguir apresenta informações sobre o comparativo entre a quantidade de radiação (kWh/m<sup>2</sup>) ao longo do dia para ambos os sistemas, ativo e passivo (inativo), bem como um comparativo único entre ambos de forma resumida.



Figura 2. Radiação total recebida pelas placas na data do solstício de inverno, equinócio de primavera, solstício de verão, equinócio de outono e Comparativo dos coeficientes de aproveitamento para as datas analisadas. Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados obtidos durante o equinócio de primavera e solstício de inverno mostram as curvas dos gráficos mais constantes, sem grandes picos ou vales, e com diferenças mais sutis entre os dois modos, ativo e passivo. Os resultados do solstício de verão e do equinócio de outono apresentaram variações alternadas nas linhas dos gráficos. Em termos gerais, é possível afirmar que o seguidor solar ativo demonstrou, em grande parte dos períodos de aferição, um ganho de eficiência na coleta de radiação que não deve ser desprezado, mas sim explorado. Com base no ganho de radiação recebida, pode-se afirmar que a probabilidade de ganho também na produção de energia elétrica se confirmaria.

### 3.2 Protótipo físico

A estrutura utilizada para a coleta de informações no modelo físico foi elaborada com base no sistema responsivo desenvolvido anteriormente. Este sistema foi objeto de desenvolvimento em etapa anterior desta pesquisa, publicado em Rocha et al (2020) e encontra-se em estágio funcional. No entanto, em função de seu tamanho reduzido, não suportou o peso das placas fotovoltaicas adquiridas e portanto houve a necessidade de recriar sua funcionalidade em um novo protótipo conforme ilustrado abaixo (Fig. 3).



Figura 3. (a) sistema responsivo original, (b) módulo novo (c) módulo novo. Fonte: Produção do próprio autor

Para a aferição da corrente elétrica geradas pelas placas fotovoltaicas foi elaborado um novo sistema independente composto pelos seguintes componentes: 01 módulo fotovoltaico de 20 watts, dimensões (40 x 15 cm), 01 multímetro e estruturas de suporte impressas em 3D (PLA cor preta). O processo de avaliação comparativa da performance entre o sistema ativo e passivo considerou a diferença na corrente elétrica (Volts) produzida pelo módulo fotovoltaico ao longo de um período de 9 horas em intervalos de 15 minutos. A medição do modo ativo foi feita de forma analógica com o uso de uma haste de referência indicativa da posição análoga ao sistema em funcionamento. O período de realização adotado foi o equinócio de primavera. Os resultados das medidas realizadas, bem como os gráficos comparativos dos resultados podem ser encontrados na tabela 1 e na Figura 4 que se seguem:

Tabela 1. Registro dos valores de corrente elétrica produzidos (volts) no sistema ativo e inativo. Fonte: Produção do próprio autor.

h / Sistema	7:00	7:15	7:30	7:45	8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00	10:15
ATIVO	22.4	22.1	22.2	22.2	22.0	22.2	22.2	22.2	21.7	21.6	21.6	21.5	21.3	21.1
INATIVO	6.2	6.4	6.8	20.7	20.6	21.6	21.5	21.6	21.3	21.2	21.3	21.2	21.1	21.0
Ganho %	+361	+345	+326	+7,24	+6,79	+2,77	+3,25	+2,77	+1,87	+1,88	+1,40	+1,41	+0,94	+0,47
h / Sistema	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45	12:00	12:15	12:30	12:45	13:00	13:15	13:30	13:45
ATIVO	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1
INATIVO	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
Ganho %	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47	+0,47
h / Sistema	14:00	14:15	14:30	14:45	15:00	15:15	15:30	15:45	16:00	16:15	16:30	16:45	17:00	17:15
ATIVO	22.1	21.8	22.1	22.2	21.9	21.7	21.6	21.7	21.5	21.2	20.8	x	x	x
INATIVO	21.8	21.6	21.8	21.8	21.4	21.1	20.9	20.9	20.7	20.2	6.8	x	x	x
Ganho %	+1,37	+0,92	+1,37	+1,83	+2,33	+2,84	+3,34	+3,82	+3,86	+4,95	+305	x	x	x

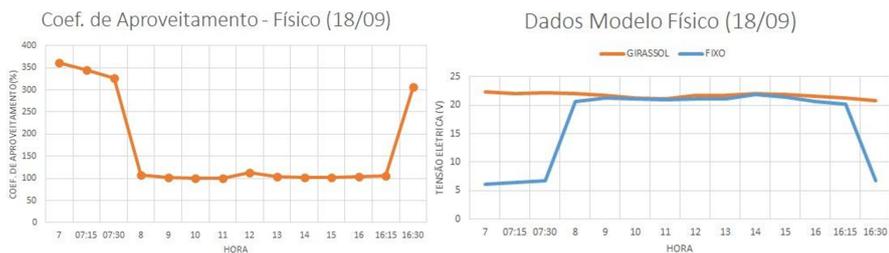


Figura 4. Dados comparativos (esquerda) e coeficiente de aproveitamento (direita). Fonte: Produção do próprio autor.

Foram adotados os mesmos princípios para o cálculo do coeficiente de aproveitamento utilizados no modelo digital, ou seja, a mesma posição de 20 (vinte) graus para o sistema passivo (linha laranja) e um intervalo de tempo semelhante que vai desde o início da manhã e o final da tarde.

#### 4 Análise dos resultados e conclusões

Comparando os gráficos do coeficiente de aproveitamento tanto do modelo digital quanto do modelo físico, constata-se haver uma semelhança no desenho dos resultados, que indicam um ganho de rendimento relevante principalmente no início da manhã e final de tarde. Durante os demais períodos, entre as 10 (dez) e 14 (quatorze) horas, a diferença indicada no coeficiente foi relativamente baixa em comparação ao sistema passivo, com uma alteração média de 5%. Esta diferença maior existente nos períodos do início da manhã e final de tarde era esperada uma vez que nos parece lógico que uma maior diferença no ângulo de incidência dos raios solares nas placas fotovoltaicas gera uma perda proporcional de geração de corrente. No entanto, algumas considerações importantes devem ser feitas para aprofundar nas particularidades destas diferenças.

O cálculo da inclinação recomendada para as placas solares de 20 graus (ou o valor correspondente da latitude) sugerida pelos fabricantes de placas é calculado para otimizar a produção de energia (Torsoni et al, 2015). No entanto, esta fórmula é uma aproximação genérica que está sujeita a ajustes em função da variação angular dos raios solares durante todo o ano.

Os resultados da simulação indicam que é justamente nos períodos mais afastados ao verão que o ganho de produtividade do seguidor solar é mais contínuo, como pode ser visto no gráfico correspondente ao solstício de inverno (21/06) na Fig. 2. Neste período, a necessidade de uma correção das placas é maior e o ganho em realizar

este procedimento é mais visível ao longo de todo dia. O comparativo de coeficientes comprova esta informação, e demonstra que é neste período que há diferenças maiores presentes nos extremos dos horários de sol.

Embora a medição no modelo físico tenha sido realizada somente em um dos quatro períodos utilizados no modelo digital, o desenho do gráfico respeitou desenho semelhante, indicando maiores diferenças nos extremos dos horários de insolação. Se por um lado o modelo físico demonstrou uma diferença significativa em extremos maiores do gráfico (antes das 8 e depois das 16h, contrário ao modelo digital que indicou antes das 10h e após as 14h, para o mesmo período do equinócio de primavera), por outro lado, os valores do coeficiente de aproveitamento foram bem mais altos, indicando ganhos entre 300% e 400% (enquanto no modelo digital os ganhos encontram-se entre 70% e 270%).

Foi possível perceber durante as experiências com o modelo físico que não há uma correspondência direta e proporcional entre o ângulo de inclinação dos raios solares nas placas fotovoltaicas e a perda de rendimento. Isso significa que as placas conseguem produzir uma quantidade estável de corrente elétrica mesmo havendo diferenças na incidência da luz sobre elas. Os resultados do modelo físico indicaram que quando expostas diretamente à luz solar no período estudado (equinócio de primavera), a diferença de corrente entre o horário das 8h e 16:30h foi de apenas 7%, o que significa que as placas podem manter seu rendimento alto mesmo sob diferenças razoáveis no ângulo de incidência do sol sobre elas. No entanto, nos horários mais extremos de insolação (antes das 8h e depois das 16:30h), nos quais a inclinação atinge valores mais expressivos, há uma queda abrupta no rendimento de mais de 70%, momentos estes em que se justifica atuar no reposicionamento das placas por meio de um seguidor solar.

Durante o equinócio de primavera (23/09) o coeficiente de rendimento permanece maior nos extremos do gráfico e torna-se equitativo nos horários próximos ao meio-dia.

Ao final, considerando o intervalo de coleta de informações e as diferenças de valores mensuradas durante todo o período, podemos afirmar que o modelo físico trouxe um ganho médio de 35%, considerando todas as aferições. No entanto, cabe salientar que os ganhos mais substanciais se concentram nos extremos dos horários de iluminação natural (início da manhã e final de tarde). Nos demais períodos, a proporção média de ganho foi de 5%.

## References

- Bondarik, R., Horst, D. J., & Pilatti, L. A. (2018) Uma Visão Geral Sobre o Potencial De Geração de Energias Renováveis no Brasil. *Interiencia*.43. p.680-688. <https://www.redalyc.org/journal/339/33957861002/html/>
- Dresch, A., Lacerda, & D., Miguel, P. (2015) A Distinctive Analysis of Case Study, Action Research and Design Science Research. *Revista brasileira de gestão de negócios*, Vol.17(56),1116-1133. DOI:10.7819/rbgn.v17i56.2069
- Roudsari, M. S., & Pak, M (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*. 3128-3135. DOI:10.26868/25222708.2013.2499
- Tirmikci, C. A., & Yavuz, C. (2015) Comparison of Solar Trackers and Application of a Sensor Less Dual Axis SolarTracker. *Journal of Energy and Power Engineering*. 9 (6). DOI:10.17265/1934-8975/2015.06.006
- Torsoni, G. B., Miranda, J. K., & Aparecido, L. O. (2019). Influência da direção de placa solar na geração de energia. *Encontro Internacional De Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)*, 3(1). <https://desafioonline.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/8597>
- Van Aken, J., Chandrasekaran, A. & Halman, J. (2016) Conducting and publishing design science research. *Journal of Operations Management*, 47-48: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2016.06.004>
- Rocha, B, M, Celestino, R., Silva, K., & Galimberti, I. (2020) Digital Sunflower: the potential of eco-oriented responsivity in the design process", p. 918-923 In: Congresso SIGraDi 2020. São Paulo: Blucher. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2020-124