2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

OTIMIZAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FIXOS E COMPARAÇÃO COM SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR PARA TRÊS CIDADES BRASILEIRAS[1]

PERES, Anna Carolina (1); ALMEIDA, Tatiane (2); MORGADO, Claudio O. (3)

(1) Pesquisadora do LCE da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro (AMBEE/FAU/UFRJ), arq.annacarolinaperes@gmail.com

(2) Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PROARQ/UFRJ), tatiane.almeida@fau.ufrj.br

(3) Doutorando da COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LABFUZZY/COPPE/UFRJ) e (AMBEE/FAU/UFRJ), claudi.morgado@fau.ufrj.br

RESUMO

Este artigo quantifica e analisa as vantagens da instalação de sistemas de rastreamento solar em relação ao uso de painéis fotovoltaicos fixos. Foram realizadas simulações em três capitais brasileiras (Belém, Brasília e Porto Alegre), selecionadas em função das diferenças entre suas latitudes e dos níveis de incidência de Irradiação Global Anual distintos. Para a realização das simulações foram utilizados os softwares Rhinoceros e Grasshopper, além de seu componente nativo Galapagos e o plugin Ladybug. Os resultados permitiram verificar os diferentes níveis de geração de energia entre as cidades, tendo Brasília apresentado o maior potencial. Além disso, observou-se que os sistemas de rastreamento se mostraram em média 20% mais eficientes do que os sistemas com placas fotovoltaicas fixas. (Pesquisa autônoma/início)

Palavras-chave: *Painéis fotovoltaicos fixos. Sistemas de rastreamento. Otimização. Simulação.*

ABSTRACT

The aim of this article is to quantify and analyze the advantages of using solar tracking applied to photovoltaic modules, rather than the regular fixed solution. Three cities in Brazil were chosen taken into account their different latitudes and Global Annual Irradiation: Belém, Brasília and Porto Alegre. The software used to run the energy generation simulations were Rhinoceros and Grasshopper, combined to their native component Galapagos and the plugin Ladybug. Results have shown a significant change between cities and Brasília had the best potential to generate photovoltaic energy. By using solar tracking systems, the performance increased around 20% compared to fixed photovoltaic modules.

Keywords: *Photovoltaic panels. Solar tracking systems. Optimization. Simulation.*

[1] PERES, Anna Carolina; ALMEIDA, Tatiane; MORGADO, Claudio O. Otimização de painéis fotovoltaicos fixos e comparação com sistemas de rastreamento solar para três cidades brasileiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

1 INTRODUÇÃO

A vida na Terra só é sustentada devido à energia fornecida pelo seu sistema solar. Essa energia proveniente do Sol é denominada irradiação e costuma ser expressa em kWh/m^2, em função de sua média diária ou anual. Jasser (2010) considera que, em uma hora, o planeta recebe energia solar suficiente para atender às suas necessidades por um ano. Rojas *et al*. (2014) estimam que a energia do Sol para a Terra é cerca de dez mil vezes maior do que o consumo da população mundial. De acordo com o *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* (REN21, 2016), a geração mundial de energias eólica e solar fotovoltaica teve um crescimento de 77% de novas instalações (contra 23% dos demais sistemas de geração de energia, incluindo usinas hidrelétricas) durante os anos de 2014 e 2015.

O custo internacional de instalação de sistemas fotovoltaicos é ainda muito elevado e, em geral, inacessível a grande parte dos proprietários de imóveis residenciais. Os investimentos nesses sistemas, entretanto, tornam-se viáveis a longo prazo, considerando sua vida útil entre 20 e 30 anos e as vantagens ambientais que proporcionam. Muitos estudos recomendam, inclusive, a implementação de políticas mundiais de incentivo à instalação de sistemas fotovoltaicos de geração de energia como forma de disseminação desta tecnologia (JASSER, 2010).

O máximo rendimento do sistema fotovoltaico é obtido quando a radiação solar incide com ângulo normal à superfície do painel. Desta maneira, as variações anuais desse ângulo de incidência (em função dos movimentos de rotação e translação da Terra, que são observados como os movimentos do Sol nos eixos Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente) resultam em perdas na conversão de energia do sistema fotovoltaico. Os sistemas de rastreamento solar (*tracking*) buscam otimizar os ganhos energéticos dos sistemas fotovoltaicos através do acompanhamento do movimento do Sol, o que aumenta a incidência solar a ser captada. Apesar dos sistemas de rastreamento serem mais caros, exigirem manutenção e consumirem energia, já há pesquisas nacionais que visam baratear seus custos e facilitar sua manutenção (LOSCHI, 2014; MONTEIRO, 2007).

Apesar do Brasil ter um potencial grandioso e diversificado de disponibilidade de radiação para a exploração e produção de energia fotovoltaica, sua participação na matriz energética brasileira ainda é muito reduzida, com representatividade irrelevante (GONÇALVES *et al.*, 2017). De acordo como Balanço Energético Nacional de 2019 (BRASIL, 2019), apenas 0,5% da produção de energia elétrica no Brasil foi gerada a partir da energia solar. Considerando esse parco aproveitamento da irradiação no país e os prazos de retorno dos investimentos nos sistemas fotovoltaicos, o presente estudo tem como objetivo quantificar e analisar as vantagens da instalação de sistemas de rastreamento solar (*tracking*) em relação ao uso de painéis fotovoltaicos fixos (estáticos) em diferentes situações de irradiação. Para isso foram realizadas simulações em três capitais brasileiras, selecionadas a partir das diferenças entre suas latitudes e com níveis de incidência de Irradiação Global Anual (GHI)distintos: Belém, Brasília e Porto Alegre.

2 MÉTODO

Para obtenção dos resultados desejados, foram empregados os softwares *Rhinoceros* e *Grasshopper*. Enquanto o primeiro é um programa de computador para modelagem digital, o segundo funciona como uma interface para outros *plugins* poderem atuar com diversas ênfases, proporcionando possibilidades de análise do modelo tridimensional (FINKL; KOENIG, 2019). A opção da utilização do *plugin*

Ladybug se dá por sua capacidade de realização de simulações nos campos de design ambiental levando em consideração dados climáticos locais plotados em um arquivo com extensão *EnergyPlus Weather File* (.epw) (ELTAWEEL; YUEHONG, 2017). Por possibilitar analisar desde radiação incidente até quantificar as horas de sol, utilizou-se o componente *PhotovoltaicsSurface* para a realização dos cálculos relativos à geração de energia fotovoltaica (FV) em três cidades brasileiras em kWh/m² anuais, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de Irradiação Global Horizontal para as cidades analisadas

Capital	Latitude	GHI
Belém (BEL)	≈ 0º	≈ 1900 kWh/m²
Brasília (BSB)	≈15º Sul	≈ 2100 kWh/m²
Porto Alegre (POA)	≈ 30º Sul	≈ 1600 kWh/m²

Fonte: Adaptado de SOLAR GIS[2].

Para a definição dos arquivos climáticos com *extensão EnergyPlus Weather File* (.epw) a serem utilizados, foram considerados os arquivos das estações meteorológicas localizadas nos aeroportos internacionais de cada uma das três cidades: em Belém, o arquivo relativo ao aeroporto Val de Cans; em Brasília, ao aeroporto Juscelino Kubitschek; e em Porto Alegre, ao aeroporto Salgado Filho. Estes arquivos são compostos por dados relativos às 8760 horas de um ano considerando diversos parâmetros como velocidade do vento, radiação incidente e temperatura. Os arquivos utilizados seguem a metodologia TMY (*Typical Meteorological Year*) que é composto pela compilação de informações de diversos anos em uma série temporal idealmente superior a 30 anos de dados. O TMY não é, então, um ano específico, mas o conjunto dos meses mais típicos no espaço de tempo analisado.

A partir de revisões bibliográficas, foi verificado que é recomendado para a aplicação em projeto que a inclinação dos sistemas fotovoltaicos seja igual à latitude da cidade em que este se encontra (GASPARIN; KRENZINGER, 2017). Nas cidades analisadas no presente artigo, este valor é igual a 0° em Belém, 15° em Brasília e 30° em Porto Alegre. Com relação à orientação dos painéis FV, recomenda-se voltar os sistemas para o Norte em países a Sul da Linha do Equador. Analogamente, quando localizados no hemisfério Norte devem ter o posicionamento voltado para o Sul. Considerou-se, neste estudo, não só a variação de localização dos sistemas fotovoltaicos, mas também se o painel é fixo ou móvel. Os painéis FV podem apresentar montagem fixa (aplicação mais comumente utilizadas em cobertura de edificações) ou instalação móvel (onde um motor realiza o movimento dos painéis FV de forma a maximizar sua eficiência).

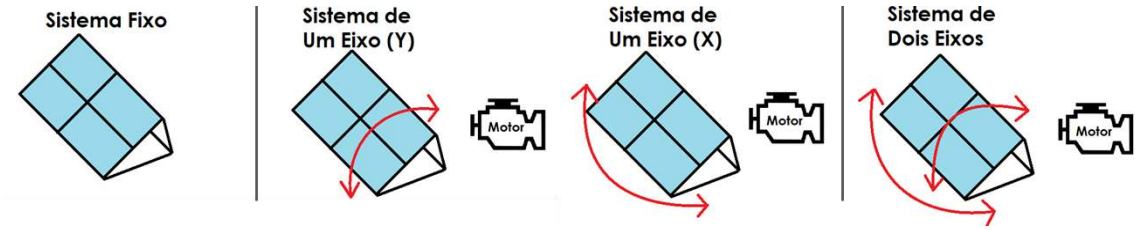
Os painéis fotovoltaicos móveis são divididos em sistemas de um ou dois eixos (GUIMARÃES, 2012; MORAES, 2012). A nomenclatura "um eixo" se refere à quantidade de graus de liberdade que os painéis (ou conjunto) têm para realizar a rotação, sendo no eixo X (variando de leste para oeste) ou Y (variando sua inclinação). Os sistemas com dois eixos mesclam estas duas liberdades, variando consideravelmente sua posição ao longo do dia e mantendo os painéis FV sempre perpendiculares aos raios solares. Estas possibilidades encontram-se apresentadas na Figura 1.

A **primeira análise** realizada consistiu na simulação de geração energética nos sistemas fixos, para as três cidades citadas, utilizando somente o *plugin Ladybug*,

[2] Segundo informações do SOLAR GIS. Disponível em <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em 12 jun. 2020.

definindo o azimute e a inclinação de acordo com a recomendação bibliográfica. Contudo, também foi gerada uma alternativa por meio do *Galapagos*, componente nativo do *Grasshopper* que possibilita a otimização mono-objetivo; esta foi a **segunda análise**

Figura 1 – Painéis Fotovoltaicos Fixos e Móveis



Fonte: Os autores.

Por meio da utilização de algoritmos genéticos usando princípios de evolução, foi possível desenvolver as simulações tendendo para o sucesso evolutivo (GERBO; SALIKLIS, 2014). Celani e Martino (2014) definem algumas características a serem utilizadas para este processo de evolução: elitismo (indivíduos que não sofrem mutação para a próxima geração) de 5%, taxa de cruzamento de 75% e população de 50 indivíduos para cada geração. A utilização de sistemas de otimização usou como variantes o azimute e a inclinação dos painéis fotovoltaicos e pôde-se realizar 10 vezes menos simulações de geração energéticas quando comparadas a todas as 32.400 possibilidades (360 variações de azimute e 90 variações de inclinação dos sistemas FV). Neste sentido, as simulações por meio da otimização demandaram 3 horas para cada arquivo climático, economizando mais de um dia de trabalho em cada caso.

A **terceira análise** é referente à simulação em painéis com *tracking*. Ressalta-se que, para o presente artigo, a simulação usou apenas painéis móveis em dois eixos. A definição da posição horária do sol foi realizada pela análise da carta solar com o *plugin Ladybug*, configurando o código de forma a movimentar o sistema fotovoltaico de acordo com os seus graus de liberdade e posição solar. Apesar do software considerar a altura solar negativa para a noite, configurou-se o código de forma que os sistemas fotovoltaicos móveis ficassem orientados para o Norte (azimute 0°) e horizontais nos períodos noturnos de forma a simplificar a simulação sem alterar sua acurácia. O Quadro 1 é um resumo das três análises realizadas e a variação de cada parâmetro.

Quadro 1 – Descrição das etapas de análise

Tipo de Sistema	Graus de Liberdade	Azimute	Inclinação
Fixo (bibliografia)	Nenhum	0°	Igual a Latitude
Fixo (otimizado)	Nenhum	Otimizado	Otimizado
Móvel (2 Eixos)	Eixos X e Y	Variação horária	Variação horária

Fonte: Os autores

Os inputs necessários para a realização das simulações foram os dados climáticos em formato *EnergyPlus Weather File* (.epw), as propriedades do painel e a geometria a ser analisada (neste caso 1m² de células fotovoltaicas). As propriedades estabelecidas para o painel solar foram as padrões do software, pois representam de maneira satisfatória as tecnologias disponíveis no mercado nacional: 15% de eficiência, com tecnologia de silício monocristalino e montados em um telhado. Por

manter tais propriedades para todas as localizações analisadas é possível estabelecer relações entre os dados obtidos e as cidades em que as placas foram implantadas, visto que modificações em tais definições acarretam também em mudanças consideráveis no desempenho do sistema.

3 RESULTADOS

O presente artigo analisou o potencial de geração de energia anual por meio de diferentes sistemas de placas fotovoltaicas para três cidades brasileiras: Belém (BEL), Brasília (BSB) e Porto Alegre (POA). As três cidades estão localizadas em latitudes distintas, fato que por si só já caracterizaria diferença no potencial de geração energética. Entretanto, outras variáveis foram também consideradas na análise, como a Irradiação Global Anual (GHI) - mostrada na Tabela 1. Nesse caso, foi observado que Brasília apresenta maiores níveis de GHI, seguido por Belém e, por último, Porto Alegre. Conforme descrito no método, foram realizadas três análises para cada uma das cidades.

A primeira análise verificou a geração de energia anual de placas fotovoltaicas fixas de acordo com a indicação da revisão bibliográfica, como pode ser visto na Tabela 2. Ressalta-se que as diferentes inclinações de painel utilizadas para as simulações são decorrentes da diferença de latitude e da recomendação da bibliografia utilizada. Como esperado e de acordo com a indicação prévia de GHI de cada cidade, pôde ser visto que Brasília apresenta maiores níveis de geração de energia anual que as demais cidades, com produção 10,8% maior que Belém e 14,9% maior que Porto Alegre.

Tabela 2 – Painéis FV fixos: geração de energia de acordo com bibliografia

Cidade	Orientação	Inclinação do Painel	Geração anual (kWh/m²)
Belém	0° (Norte)	0°	176,32
Brasília	0° (Norte)	15°	195,29
Porto Alegre	0° (Norte)	30°	169,97

Fonte: Os autores

Foram realizadas, para a segunda análise, simulações de otimização anual de geração de energia utilizando o *Rhinoceros* e *Grasshopper*, junto ao componente nativo *Galapagos*. Para tal, foram consideradas placas fixas, ou seja, sem a ocorrência de variações ao longo do ano nos ângulos de orientação e de inclinação. Essas simulações têm como objetivo identificar quais seriam os ângulos ótimos de orientação e de inclinação do painel para o melhor aproveitamento e eficiência de placas fotovoltaicas em cada uma das cidades. Na Tabela 3 podem ser verificados os ângulos ótimos encontrados para cada cidade e a geração de energia correspondente. Observa-se novamente que Brasília apresentou os maiores índices de geração de energia, sendo 10,6% maior que Belém e 14,3% maior que Porto Alegre.

Além disso, verificou-se grande semelhança entre os ângulos de orientação e inclinação indicados na bibliografia e os apontados como ótimo, sendo a diferença de geração de energia obtida entre as duas situações pouco significativas. Para Belém, as placas fixas com valores de ângulos indicados pela revisão bibliográfica é 0,3% menor que a otimizada, já para Brasília essa diferença é de 0,2% e para Porto Alegre de 0,6%.

Sendo assim, concluiu-se que a indicação de um intervalo ótimo de resultados é mais eficiente do que a indicação de um resultado específico. Considerando então uma variação na geração de energia relativa à placa otimizada na ordem de 1%, a Tabela 4 apresenta os intervalos propostos para as três cidades.

Tabela 3 – Painéis FV fixos: geração de energia a partir de otimização

Cidade	Orientação	Inclinação do Painel	Geração anual (kWh/m²)
Belém	0° (Norte)	5°	176,85
Brasília	352°	18°	195,61
Porto Alegre	349°	24°	171,08

Fonte: Os autores

Deve-se destacar os resultados de intervalo obtidos para Belém. Ficam indicados baixos ângulos de inclinação (placa tendendo a horizontalidade), pois a altura solar é elevada em todas as épocas do ano. Além disso, não houve a definição de um intervalo de orientação específico, resultado influenciado pela horizontalidade da placa já citada e pela simetria nos eixos Norte-Sul da trajetória solar (latitude próxima a 0° - linha do Equador).

Tabela 4 – Painéis FV fixos: intervalos ótimos para as três cidades

Cidade	Intervalo Orientação	Intervalo Inclinação
Belém	0° até 360°	entre 0° e 10°
Brasília	0° até 15° e 335° até 360°	entre 10° e 25°
Porto Alegre	0° até 5° e 325° até 360°	entre 20° e 35°

Fonte: Os autores

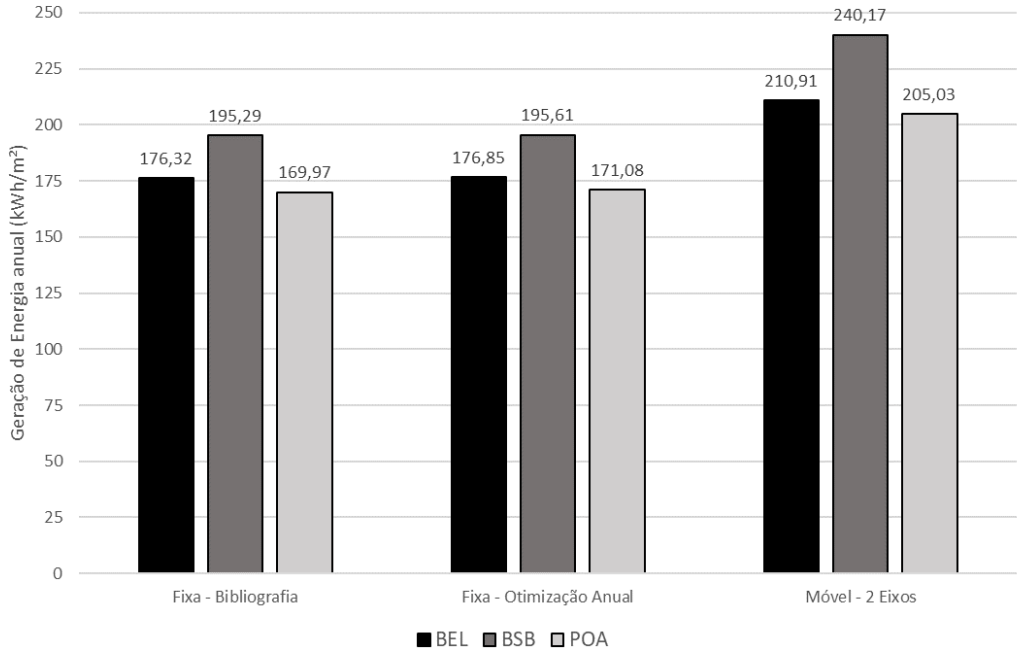
A terceira análise engloba a verificação de geração de energia considerando a utilização de sistemas de rastreamento. A partir de simulações realizadas no *plugin Ladybug* em conjunto ao *Rhinoceros* e *Grasshopper*, foi calculada a geração de energia anual das três cidades para o sistema de rastreamento de dois eixos, no qual a placa fotovoltaica está sempre perpendicular ao raio solar. Os valores obtidos foram então comparados com a geração de energia para placas fixas, como pode ser visto na Figura 2.

Pode-se verificar, primeiramente, a diferença de geração de energia entre as três cidades para o sistema de rastreamento de dois eixos. Conforme ocorreu nas demais simulações, Brasília manteve-se com os maiores resultados, com geração de energia 13,9% superior a Belém e 17,1% maior que Porto Alegre. Nesse caso, como a simulação realizada mantém a placa fotovoltaica constantemente perpendicular aos raios solares, a diferença de potencial encontrada entre as cidades deve-se inteiramente ao potencial intrínseco a cada localidade em relação à geração de energia, seja decorrente da latitude ou de outros fatores, como por exemplo, a altitude e nebulosidade na região.

Comparando-se então a placa com rastreamento de dois eixos e os sistemas de geração de energia fixos, verifica-se que o sistema de *tracking* apresenta resultados significativamente superiores. Para a cidade de Belém, o sistema de rastreamento simulado apresenta geração de energia anual 19,3% superior a placa fixa otimizada,

já para a cidade de Brasília essa diferença é de 22,8%, e para Porto Alegre de 19,8%. Esses resultados apontam grandes vantagens na utilização de sistemas de rastreamento, em especial ao se considerar a geração de energia em valor absoluto e conjuntos com maiores números de placas.

Figura 2 – Comparação de geração de energia anual (kWh/m²) entre sistemas de rastreamento solar e painéis fotovoltaicos fixos para as três cidades



Fonte: Os autores

4 CONCLUSÕES

O presente artigo analisou as aplicações de sistemas de placas fotovoltaicas fixas e com rastreador solar. A escolha das três cidades buscou a diversidade tanto na latitude quanto na incidência de Irradiação Global Anual. Os resultados obtidos mostraram que Brasília apresentou o maior potencial para utilização de painéis fotovoltaicos, enquanto Porto Alegre obteve os menores valores em todos os sistemas. As simulações de sistemas FV fixos mostraram semelhança entre os resultados oriundos da indicação bibliográfica (inclinação e orientação) e os obtidos pela otimização quando considerada sua aplicação na mesma cidade. Este fato resultou na sugestão de intervalos ótimos de posicionamento das placas solares nas três cidades em detrimento de soluções únicas.

Além disso, observou-se que os sistemas de rastreamento solar se mostraram em média 20% mais eficientes do que os sistemas com placas fotovoltaicas fixas. Entretanto, ressalta-se que não foi estimado o consumo próprio de energia do sistema de placas com rastreamento; não foram analisados, também, os valores de custo de aquisição, instalação e manutenção referentes aos diferentes tipos de sistemas (fixos e móveis), sendo relevante portanto a execução de uma análise comparativa de viabilidade econômica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Anuário estatístico de energia elétrica 2019 - ano base 2018**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

CELANI, G.; MARTINO, J. A. **Definição Volumétrica a partir de um sistema generativo evolutivo**. In: Sigradi 2014. Blucher Design Proceedings, v. 1, n. 8. 2014.

ELTAWEEL, A.; YUEHONG, S. U. **Parametric design and daylighting: A literature review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 73, p. 1086-1103, 2017.

FINKL, T.; KOENIG, R. **Integrated Parametric Urban Design in Grasshopper/Rhinoceros 3D Demonstrated on a Master Plan in Vienna**. In: DCITY Information Modelling and GIS, v. 3, p. 313-322, 2019.

GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel. In: **Revista Brasileira de Energia Solar**, [*s. l.*], ano 8, v. VIII, ed. 1, p. 10-17, julho 2017.

GERBO, E.; SALIKLIS, E. **Optimizing a Trussed Frame Subjected to Wind Using Rhino, Grasshopper, Karamba and Galapagos.** In: Proceedings of IASS Annual Symposia: IASS 2014 Brasilia Symposium: Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Historical Spatial Structures,Brasília, p. 1-7, 19 set. 2014.

GONÇALVES, I.P. *et al.* **Estudo da relação custo-benefício na implantação de diferentes sistemas fotovoltaicos em um edifício de escritórios na ZB2.** In: Anais do ENCAC/ELECS 2017, p. 1388-1397. Balneário Camboriú: UNIVALI, 201

GUIMARÃES, J. C. **Implementação de um sistema de controle analógico com movimento em dois eixos aplicado em painéis solares.** In: Dissertação (Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia e Urbanismo, 103f, 2012.

JASSER, A.A. A stand-alone photovoltaic system, case study: a residence in Gaza. In: **Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation**, v. 5, n. 1, p. 81-91, 2010.

LOSCHI, H.J. *et al*. **Solar tracking system installed with photovoltaic (PV) panels to connection grid tie low voltage (Sunflower).** In: Energy and Power, v. 4, n. 3, p. 49-53, 2014.

MONTEIRO, F.A.M. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar.** Dissertação de Mestrado. Recife: CTG/UFPE, 2007.

MORAES, E. P. **Seguidor Solar de um Único Eixo Inclinado**. In: Dissertação (Engenharia de Computação) - Centro Universitário de Brasília, 73f, 2012.

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2016 Global Status Report.** Paris: REN21 Secretariat, 2016.

ROJAS, W.R.; BENAVIDES, C.M. **Discusión y evaluación de fuentes de luz artificial para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos.** Tecnología en Marcha. Edición especial Movilidad Estudiantil, p. 31-40, 2014.