

Revisão do rastreamento solar para sistemas fotovoltaicos

Jorge Augusto Wissmann¹
Alysson Francisco Toscan²
Maikon Lucian Lenz³
Carlos Eduardo Camargo Nogueira⁴
Jair Antônio Cruz Siqueira⁵

Resumo

Energias renováveis são uma opção de energia limpa e a corrida para adicioná-las na matriz energética dos países está em andamento, uma opção dentre as renováveis é a energia solar coletada por painéis fotovoltaicos. Existe uma busca constante de otimização destes painéis, a qual pode se dar de várias formas como: no avanço de tecnologias das células fotovoltaicas, no ajuste da impedância, no inversor, no armazenamento da energia coletada (*on-grid* ou *off-grid*), no resfriamento das células, na limpeza dos módulos e, como objeto deste trabalho, no rastreamento da posição solar. Será apresentada uma revisão sobre os tipos, técnicas e classificações dos mais variados rastreadores solares através de pesquisa bibliográfica em periódicos internacionais recentes. Levantamentos quantitativos e qualitativos serão exemplificados, demonstrando em quais situações estes se tornam eficientes.

Palavras-chave: rastreador solar, sistemas de rastreamento, revisão bibliográfica

¹ Doutorando em Engenharia de Energia na Agricultura – UNIOESTE. E-mail: professor.jorgew@gmail.com

² Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina

³ Especialista em Automação Industrial e Controle de Processos -Centro Universitário Assis Gurgacz.,

⁴ Docente da UNIOESTE

⁵ Docente da UNIOESTE

Abstract

Renewable energies are an option for clean energy and the race into the energy matrix of countries is underway, an option among the renewable ones is solar energy collected by photovoltaic panels. There is a constant search for the optimization of PV panels, which can take many forms, such as: advances in photovoltaic cell technologies, impedance adjustment, inverter technologies, storage of the collected energy (on-grid or off-grid), in the cooling the cells, cleaning the modules and, as the subject of this paper, tracking the solar position. A review of the types, techniques and classifications of the most varied solar trackers is presented through bibliographic research in recent international journals. A quantitative and qualitative surveys will be exemplified, demonstrating in which situations these become feasible.

Keywords: solar tracker; tracking systems; bibliographic review

1. Introdução

Um desafio contínuo na produção de energia é a otimização e a eficiência dos sistemas. Dentre as opções em energias renováveis estão os sistemas fotovoltaicos, os quais vem recebendo atenção cumulativamente, tanto no âmbito nacional quanto no internacional. Cada vez mais as matrizes energéticas dos países contam com uma contribuição crescente de fontes cujas origens são renováveis, uma delas é a coleta de radiação solar via células fotovoltaicas.

Entre as possíveis melhoras nesta eficiência estão o avanço de tecnologias nas células fotovoltaicas, no ajuste da impedância, no inversor, no armazenamento da energia coletada (*on-grid* ou *off-grid*), no resfriamento das células, na limpeza dos módulos etc., e de encontro ao interesse deste estudo, no rastreamento da posição do sol.

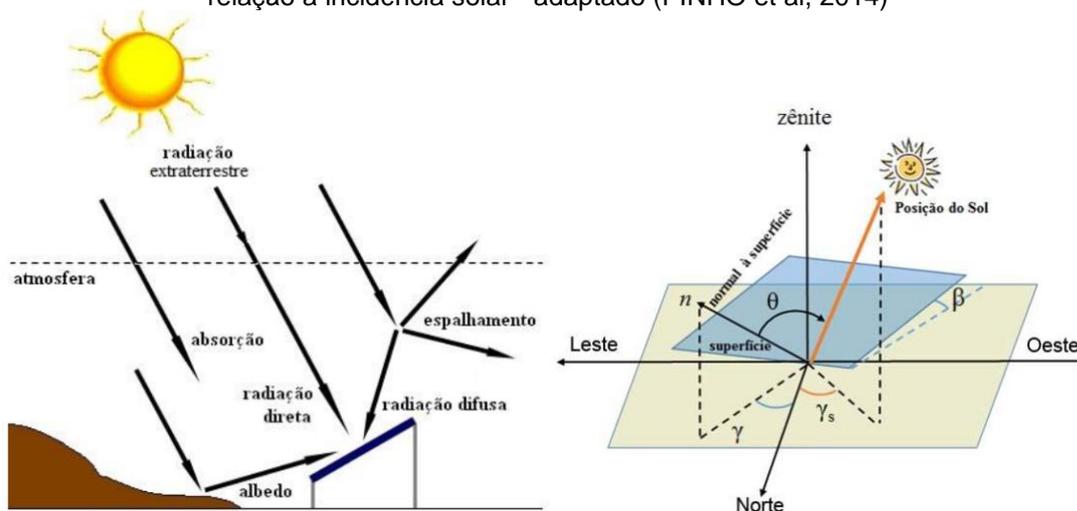
Em muitas situações os módulos fotovoltaicos se apresentam instalados de forma fixa (sem rastreamento da posição solar), normalmente sobre a estrutura do telhado de edificações, engessando assim sua posição em relação a incidência solar e restringindo seu pico de eficiência a um certo horário durante o dia. Uma alternativa para a otimização desta coleta de radiação é a implementação do rastreamento solar, objeto deste trabalho. Uma revisão dos mais variados tipos e técnicas de rastreamento serão aqui apresentados.

1.1. Radiação e geometria solar

Sabe-se que a radiação solar que atinge as células de um módulo fotovoltaico provém de três partes: a direta recebida pelo sol, a radiação difusa resultado do espalhamento na atmosfera e o albedo indiretamente refletido por objetos. O foco dos rastreadores é posicionar o módulo em uma posição perpendicular a radiação direta, aumentando, portanto, a absorção desta radiação específica.

Diversas são as formas de se denominar os ângulos envolvidos na dinâmica do rastreamento solar, uma das geometrias mais comuns é esta apresentada por Pinho et al. (2014) apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Radiação e geometria tridimensional referente aos ângulos da superfície em relação a incidência solar - adaptado (PINHO et al, 2014)



Onde:

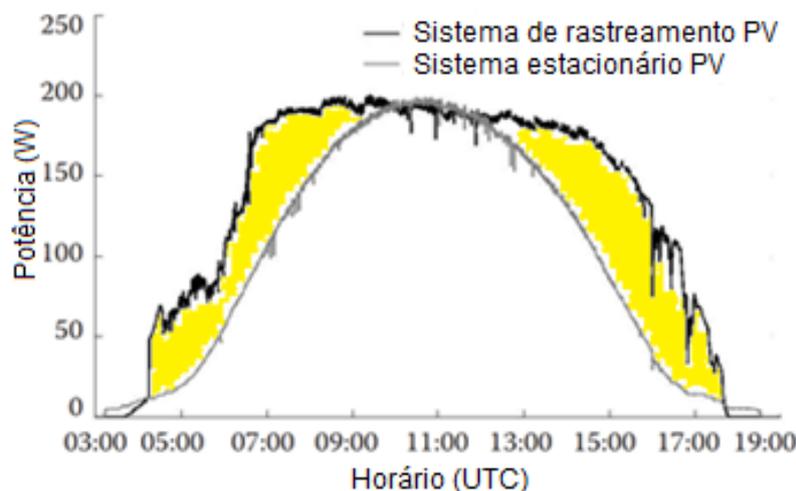
- β = inclinação da superfície de captação
- θ = ângulo de incidência entre os raios do sol e a superfície de captação
- γ = ângulo azimutal da superfície
- γ_s = ângulo azimutal do Sol
- n = normal da superfície

1.2. Coleta solar com rastreamento

Com o rastreamento solar, posicionando o pano do módulo de forma perpendicular (ou ortogonal) em relação a direção da radiação direta, durante o período do dia em que o sol realiza sua trajetória na linha elíptica, é possível acrescer a quantidade de energia absorvida.

Uma comparação entre a coleta de um sistema fotovoltaico fixo e outro se utilizando de rastreamento pode ser apreciado no trabalho de (OLEJÁR et al., 2015). Pode-se observar na Figura 2 a curva característica da coleta da radiação de um sistema fixo (vide linha na cor cinza) em contraste com a curva do sistema rastreado (vide linha na cor preta), assim como o ganho de eficiência entre estas (área preenchida na cor amarela). Os autores afirmam ter acrescido uma diferença de 33,78% de energia elétrica devido a implementação do rastreamento.

Figura 2 – Aumento da coleta solar durante as horas do dia - adaptado (OLEJÁR et al., 2015)



1.3. Histórico dos sistemas de rastreamento

De acordo com Singh et al (2018) os primeiros sistemas de rastreamento solar, na década de 20, foram elaborados apenas com estruturas mecânicas e eram desprovidos de correções em tempo real. Já na década de 60 os sistemas automáticos começavam a surgir no cenário do rastreamento solar.

Hafez et al (2018) relembra que na década de 70 passaram a existir sistemas que se utilizavam de espelhos, sensores ou medições de densidade de fluxo (portanto, ativos), resultando em correções de posicionamento na ordem de 0,5° a 1°.

Singh et al (2018) ainda cita que na década de 80 entrariam em cena os microprocessadores e algoritmos para se localizar o “ponto de máxima força solar”.

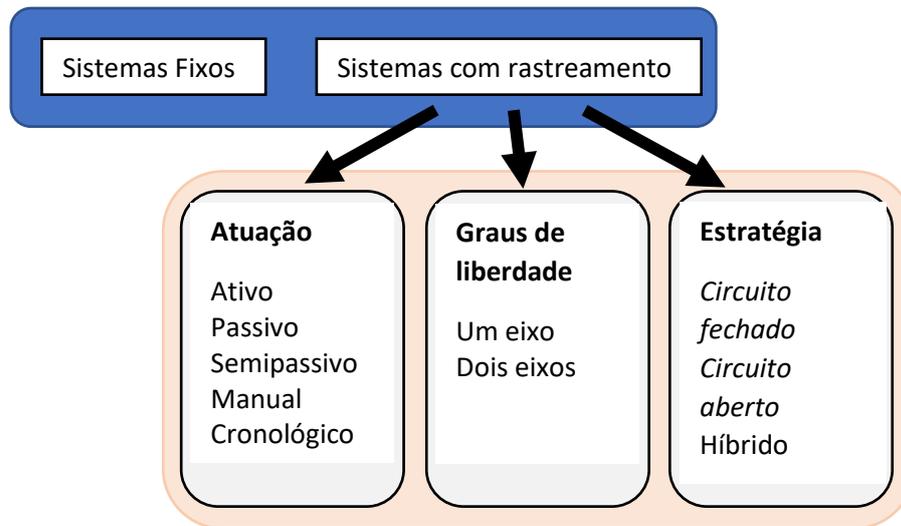
Nas últimas décadas os sistemas de rastreamento ativo foram criados e classificados com os mais diferentes tipos de controle, como métodos baseados em microprocessador, sensores elétrico-ópticos, métodos de data e hora e células PV auxiliares.

Recentemente a Inteligência Artificial e uma combinação de mais de um método dos supracitados também vêm se destacando.

2. Classificações do rastreamento

São várias as maneiras de se classificar um sistema de rastreamento, os quais são normalmente comparados aos sistemas fixos. Será apresentada uma forma de classificação híbrida, a qual agrupou as classificações realizadas pelos principais autores revisados neste estudo, vide Figura 3 adaptada.

Figura 3 – Classificação dos sistemas de rastreamento - adaptado (SEME et al., 2020)



2.1. Atuação

Quanto à forma de atuação pode-se classificar os sistemas fotovoltaicos da seguinte maneira.

2.1.1. Ativo

É o mais comum dentre os existentes e utiliza uma combinação de sensores e motores de forma ativa, empregando certa energia constantemente para o rastreamento da posição do sol.

Quando os raios da radiação solar não estão ortogonais ao plano do módulo fotovoltaico, o(s) sensor(es) detecta(m) essa divergência (diferença de potencial ou fluxo), acionando o(s) motor(es) para realizar a correção, portanto, de uma forma considerada ativa. Podem utilizar controles baseados em microprocessadores, em sensores ópticos elétricos, no dia e horário local ou até mesmo adicionando células fotovoltaicas auxiliares. Alguns destes se aproveitam da combinação dos sensores com uma estrutura fixa que gera sombras nos sensores, a fim de se ampliar essa diferença potencial, como por exemplo, no caso do estudo que utilizou sensores LDR (*Light Dependent Resistance*) e dois eixos de rastreamento detalhado por (HAMMOUMI *et al.*, 2018).

2.1.2. Passivo

Nesta atuação, utilizam-se um metal (dilatação térmica), um líquido ou gás para se equilibrar a posição do painel através da comunicação entre dois reservatórios opostos, dilatando ou evaporando e condensando, movendo-se entre eles. O movimento se dá pela incidência da radiação do sol em diferentes regiões do módulo, gerando um desequilíbrio que tende a se compensar automaticamente. Um exemplo pode ser contemplado por essa panela térmica no estudo de (FARROQUI, 2013).

2.1.3. Semipassivo

Nesta atuação, utilizam-se refletores Fresnel para e poucos movimentos para concentrar os raios solares em uma seção absorvedora ou receptora.

2.1.4. Manual

Como o nome sugere, trata-se de uma situação em que o usuário deve realizar interferências manuais a fim de realizar ajustes no rastreamento solar. É mais comum para correções sazonais que ocorrem nas estações do ano, visto que uma correção manual cotidiana no eixo Leste-Oeste se tornaria impraticável.

2.1.5. Cronológico

O rastreamento cronológico, como o nome indica, se trata de um sistema baseado em tempo, variando diariamente a uma taxa pré-definida. A taxa de variação a ser determinada vai depender do tipo de eixo de rotação e da amplitude desejada. O motor é controlado para rotacionar a uma baixa taxa de rotação de 15° por hora aproximadamente (HAFEZ, YOUSEF, *et al.*, 2018).

2.2. Graus de liberdade

A liberdade de movimento, ou graus de liberdade, do sistema com rastreador é denominada em relação a rotação permitida do módulo fotovoltaico. Neste sentido pode-se realizar a classificação dos sistemas fotovoltaicos quanto ao número de eixos e suas rotações permitidas.

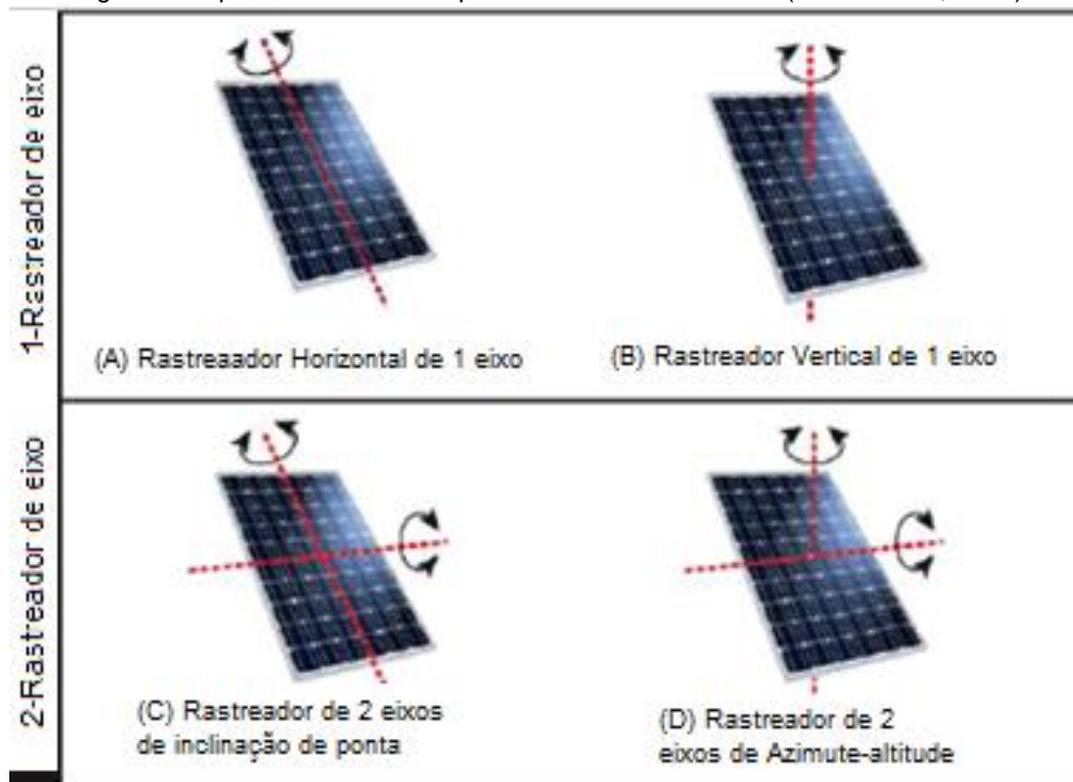
2.2.1. Um eixo

Normalmente, sendo o eixo horizontal ou Leste-Oeste (L-O) por ser o mais variável, diário (vide item A na Figura 4). Este grau de liberdade também pode ser substituído pela rotação vertical ou azimutal (vide item B na Figura 4).

2.2.2. Dois eixos

Normalmente, mantendo a rotação horizontal (L-O) e adicionando a rotação no eixo Norte-Sul (N-S), vide item C na Figura 4. Pode ainda haver a substituição do eixo horizontal pelo azimutal (vide item D na Figura 4).

Figura 4 - Tipo de rastreamento para módulos fotovoltaicos (HONG *et al.*, 2016).



2.3. Estratégia

2.3.1. Circuito aberto

Utilizam algoritmos inseridos no microprocessador que trabalha baseado em data e horário, onde a posição do painel na Terra (latitude e longitude) deve ser previamente imputada. Não existe uma análise da qualidade do resultado da coleta da radiação ou uma retroalimentação dos dados.

2.3.2. Circuito fechado

Nesta estratégia existe uma retroalimentação através de respostas dos sensores (LDR), determinando assim a nova posição do módulo para seguir o Sol. Portanto, mais caros pelo motivo de necessitarem dos sensores e pelos problemas causados durante um dia de tempo ruim (nublado).

2.3.3. Híbrido

Uma solução para se evitar estes gastos extras supracitados é realizar a integração entre os dois, criando um sistema que se utiliza de data e horário juntamente com sensores, portanto, uma estratégia híbrida.

Um extenso levantamento e análise de sistemas de rastreamento solar foi realizado por HAFEZ et al 2018 abrangendo trabalhos originados em mais de 60 localidades e distribuídas em todo o globo. A classificação dos sistemas nestes estudos foi sintetizada em três gráficos a seguir, conforme mostram as Figuras 5 a 7.

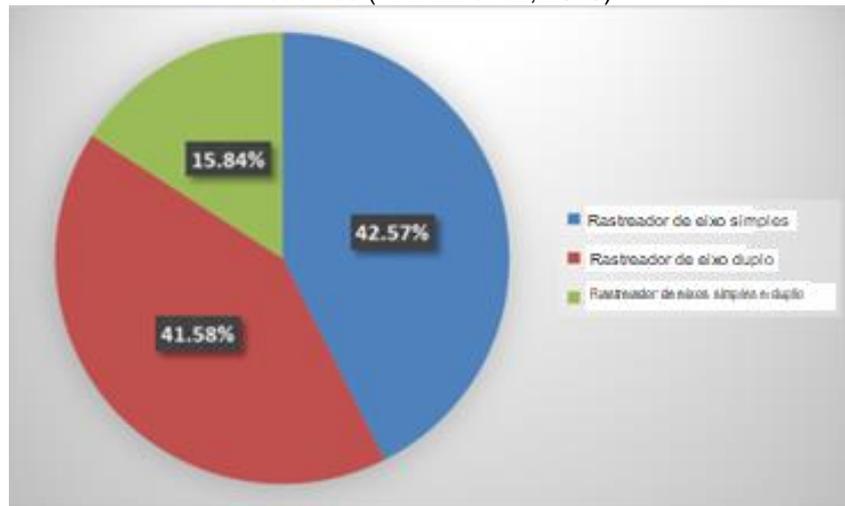
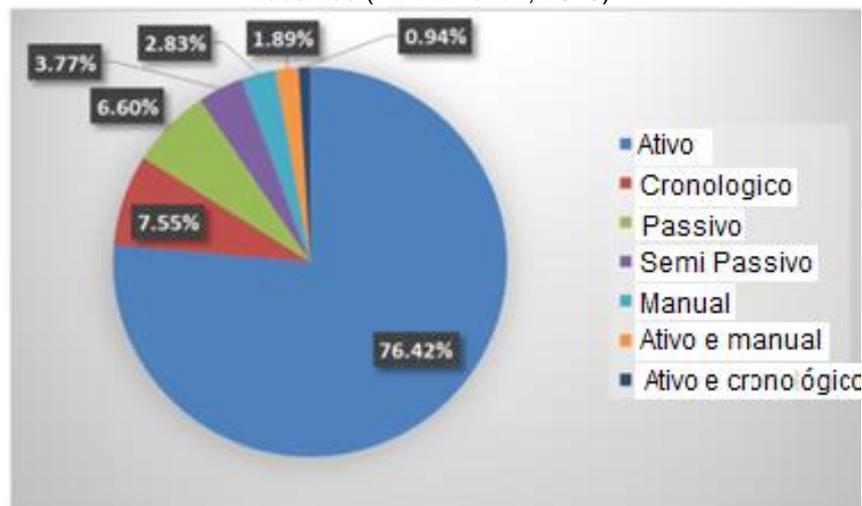
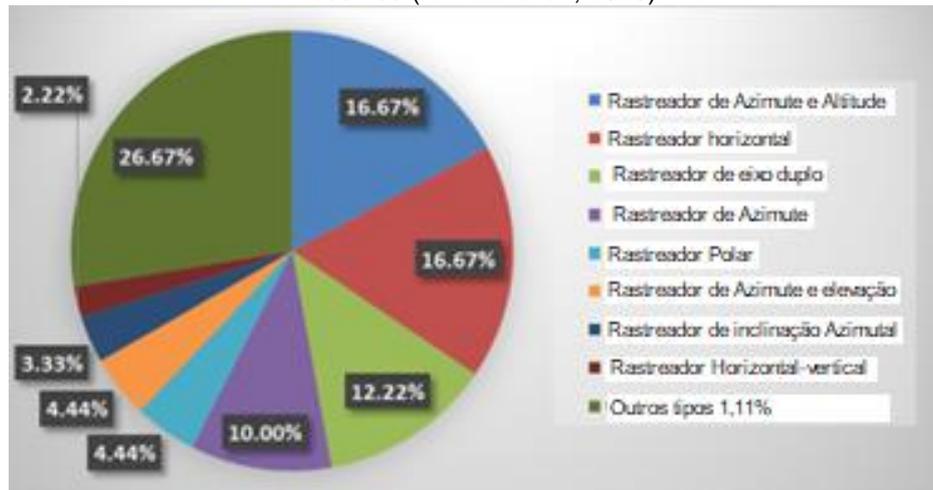
Figura 5 – Porcentagem do uso dos tipos de sistemas de rastreamento solar em estudos recentes (HAFEZ *et al.*, 2018)Figura 6 – Porcentagem do uso da atuação de sistemas de rastreamento solar em estudos recentes (HAFEZ *et al.*, 2018)

Figura 7 – Porcentagem do uso das técnicas de sistemas de rastreamento solar em estudos recentes (HAFEZ et al., 2018)



Seme et al (2020) também realizaram um extenso trabalho de classificação, incluindo o quesito “estratégia”, o qual conta com diversas ilustrações e exemplos reais de vários tipos de rastreadores.

3. Técnicas de determinação da posição do Sol

Visto que a incidência dos raios solares varia durante o dia, o ponto de máxima incidência solar também varia, portanto, devem-se utilizar técnicas para se realizar este rastreamento, também conhecidas como técnicas MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Algumas destas são aqui apresentadas:

3.1. P&O

Uma técnica comum é de se rastrear a posição mais otimizada do módulo em relação a irradiação solar, o algoritmo realiza o registro da voltagem e da corrente gerada em dada posição e o compara com uma nova posição, trabalha com uma perturbação seguida de observação. Esta técnica, conhecida como P&O convencional, é exemplificada por Dileep (2015), este também apresenta várias modificações, variações da técnica.

3.2. Sensores LDR

Outra técnica comum é do uso de sensores de luminosidade LDR (*Light Dependent Resistance*), onde estes sensores são posicionados em regiões estratégicas do módulo, normalmente com três e dispostos em esquerda, central e direita. A luminosidade é lida simultaneamente e comparada entre eles, qual apresentar maiores valores, após processamento, acionarão os motores e direcionarão a posição do módulo ou painel.

3.3. Pequenos PV Auxiliares

Semelhante aos sensores LDR supracitados, pequenos módulos fotovoltaicos (PV) podem ser utilizados para controlar diretamente a movimentação do painel. Quando esses pequenos módulos se apresentarem gerando energia repassam-na diretamente para os motores reposicionando o módulo principal.

3.4. Câmera Direta

Outra opção existente e bem mais direta é de se acoplar uma câmera posicionada diretamente para o sol, registrando e acompanhando seus movimentos. Para tal, algoritmos e processamentos são necessários.

3.5. Astronômico

Nesta técnica, existe um banco de dados astronômico e processamento de equações que determinam a posição dos astros, especificamente do sol. Previamente deve-se dar o input da localização geográfica do equipamento (latitude), a qual pode ser obtida com o uso de GPS (Global Position System).

3.6. Cronológico

Como o próprio nome sugere, é uma técnica baseada em data e horário. Analogamente à técnica astronômica, é necessário o conhecimento prévio da posição do equipamento no globo juntamente com a trajetória da elíptica para aquela data, são então programadas correções diárias para se seguir a posição solar.

A Lógica *Fuzzy* pode ser utilizada para a implementação dos sistemas de sensores supracitados, se apresenta na forma de lógica multivalorada, na qual os valores de verdade das variáveis podem ser qualquer número real entre 0 (correspondente ao valor falso) e 1 (correspondente ao valor verdadeiro), como visto no trabalho de Narendiran (2016). Recentemente também existe a presença do uso do Arduino que é um sistema de prototipagem rápida para criação de placa de circuitos e projetos eletrônicos, assim como o uso da Inteligência Artificial combinando diferentes técnicas a fim de se otimizar o sistema como um todo. Cada técnica apresenta diferentes custos de implementação e, portanto, diferentes tempos de retorno do investimento.

4. Eficiência no rastreamento

É fato que o rastreamento solar propicia uma coleta de radiação direta otimizada, porém deve-se descontar a energia necessária para se realizar este rastreamento de acordo com o método e equipamentos utilizados em cada sistema supracitado.

A economia no número de movimentos realizados pelo motor *versus* eficiência gerada deve ser levada em consideração, pois uma rotação contínua pode não aumentar significativamente a coleta de radiação e, conseqüentemente, da produção de energia elétrica líquida. A técnica ISNA-3P realiza apenas três ajustes diários referente às posições da manhã, meio dia e tarde (ZHONG, LI, *et al.*, 2011). Outra variação frequentemente encontrada na

bibliografia apresenta uma taxa em torno de 15^o por hora no eixo de rotação horizontal.

4.1. Número de eixos

O estudo de (VIEIRA, GUERRA, *et al.*, 2016), realizado em Mossoró-RN, portanto, próximo à linha do Equador, comparou a eficiência de um painel fotovoltaico fixo com outro de um eixo móvel, concluindo que houve um ganho de 11% no aumento da geração de energia, porém, ressaltou-se que a energia utilizada pelo motor para efetuar este rastreamento não foi computada. Ressaltou que as diferenças mais significantes entre a coleta dos dois painéis ocorriam após as 15h, porém que em períodos de céu muito nublado não havia diferenças.

Medeiros (2016) conclui ter produzido de 2,5 (duas vezes e meia) mais energia que um sistema fixo com seu protótipo de sistema rastreável de dois eixos mediante uso de programação em Arduino®, porém resalta que este valor é em potência máxima e não em efetiva e ainda, que há a necessidade de se descontar o valor da energia elétrica utilizada para se alimentar o rastreamento automático.

A diferença da eficiência entre sistemas de um e dois eixos pode não variar significativamente, este menor acréscimo da eficiência pós implementação do rastreamento do segundo eixo (normalmente o N-S), somado aos seus respectivos custos extras com motores e sensores, pode inviabilizar economicamente a ideia. Uma solução para este segundo eixo seria a utilização de um ajuste manual, necessitando intervenção do usuário sazonalmente. Uma das vantagens mais significantes do uso de um segundo eixo manual para o rastreamento é que se torna mais barato que a implementação de um segundo motor (HAFEZ *et al.*, 2018).

4.2. Tempo de retorno do investimento

O tempo de retorno do investimento, ou *payback*, resultante da implementação do rastreamento deve ser calculado em paralelo com a análise global do sistema fotovoltaico. A implementação de um segundo eixo pode conduzir a apenas um pequeno acréscimo de coleta de radiação, estendendo o período de *payback* para além da vida útil do sistema, e nesta situação, inviabilizando economicamente a sua implementação.

Uma análise mais detalhada deve levar em consideração a taxa de atratividade local do empreendimento, assim como possíveis incentivos fiscais pelo governo. Neste estudo comparativo, o custo por watt de um painel fixo pode levar a um *payback* de 1,5 a 3,5 anos, para um sistema de um eixo o investimento retornaria em 3 anos, para um sistema de dois eixos seriam necessários 3,5 a 5 anos para o retorno do investimento (SINGH *et al.*, 2017).

4.3. Efeito do sombreamento

O posicionamento local dos módulos e do painel também podem interferir na eficiência. Edificações ou vegetação próximas podem gerar sombras sobre as células, assim como a própria rotação dos eixos pode gerar sombra em um módulo adjacente. O estudo prévio da posição dos módulos é necessário. Uma análise dos efeitos deste sombreamento foi conduzida através do uso do software denominado “PVsyst” (ISKANDAR *et al.*, 2018). (PREMKUMAR, REPORTS, 2019) criou um algoritmo para otimizar o rastreamento nestas situações que envolvem sombreamento parcial.

Singh *et al.* (2018) apresentam avaliações econômicas de diversos trabalhos, ressaltando a dificuldade em encontrá-los. Concluem que a eficiência dos diferentes sistemas de rastreamento depende da latitude do local e que não é a mesma para todas as regiões.

5. Considerações finais

Fica evidente o aumento da eficiência da coleta da radiação solar e consequente produção de energia através do uso de rastreadores.

A posição geográfica no globo é um fator determinante para se definir qual sistema será mais eficiente e viável.

Existe uma presença hegemônica do rastreamento ativo, pois nesse quesito “atuação” é de 76,42%. Já na quantidade de graus de liberdade há um certo equilíbrio, em torno de 42% tanto para rastreamento de um eixo quanto para dois eixos.

O rastreamento solar constante pode não ser a opção mais eficiente, menos ajustes diários no eixo L-O conseguem garantir significativo acréscimo na coleta da radiação.

A implementação de rastreamento no eixo L-O e em regiões próximas aos trópicos se mostra mais interessante no quesito eficiência.

Em geral, um segundo eixo móvel (motorizado) maximiza a eficiência, porém não aparenta acrescentar muita diferença na coleta de radiação, quando analisado economicamente. Estudos quanto a latitude e a incidência da radiação local são sempre necessárias para essas tomadas de decisões.

Referências

DILEEP, G., SINGH, S. N. Maximum power point tracking of solar photovoltaic system using modified perturbation and observation method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 109-129, 2015.

FAROOQUI, S. Z. A gravity based tracking system for box type solar cookers, **Solar Energy**, v. 92, p. 62–68, jun. 2013.

HAFEZ, A. Z., YOUSEF, A. M., HARAG, N. M. Solar tracking systems_ Technologies and trackers drive types – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 754–782, 2018.

HAMMOUMI, A. EL.; MOTAHHIR, S.; ABDELAZIZ, EL G.; CHALH, A. A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. **Energy Science and Engineering**, v. 5, n. 5, 2018.

HONG, Y.; BELTRAN, A. A.; PAGLINAWAN, A. C. A robust design of maximum power point tracking using Taguchi method for stand-alone PV system. **Applied Energy**, Elsevier, vol. 211(C), p 50-63, 2018.

HONG, T.; JEONG, K. BAN, C. A Preliminary Study on the 2-axis Hybrid Solar Tracking Method for the Smart Photovoltaic Blind., **Energy Procedia**, v. 88, p. 484-490, 2016.

ISKANDAR, H. R.; BAKTI, Z. Y.; SAMBASRI, S. .Study and Analysis of Shading Effects on Photovoltaic Application System. MATEC Web of Conferences 2018. **Anais... ICIEE 2018**. EDP Sciences 26 out 2018.

MEDEIROS, I. P. M. **Sistemas De Controle Rastreável Para Painéis Fotovoltaicos: Protótipo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

NARENDIRAN, S., SAHOO, S., ... R. D.-2016 3rd I., et al. **Fuzzy logic controller based maximum power point tracking for PV system**, ieeexplore.ieee.org, 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7510590/>. Acesso em: 21 out. 2020.

OLEJÁR, M.; CVIKLOVIC, V.; HRUBY, D.; LUKÁČ, O. Autonomous control of biaxial tracking photovoltaic system. **Research in Agricultural Engineering**, Vol. 61, 2015, Special Issue: S48–S52.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014. 530 p.

PREMKUMAR, M.; SOWMYA, R. An effective maximum power point tracker for partially shaded solar photovoltaic systems. **Energy Reports**, v. 5, p. 1445-1462, 2019.

SEME, S.; STUMBERGER, B.; HADZISELIMOVIC, M.; SREDENSEK, K. Solar Photovoltaic Tracking Systems for Electricity Generation: **A Review. Energies**, v. 13, n.16, 2020.

SINGH, R.; KUMAR, S.; GEHLOT, A. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 82, 2017.

VIEIRA, R.; GUERRA, F. K. O. M. V.; VALE, M. R. B. G.; ARAÚJO, M. M. 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**, v. 64, p. 672-681, 2016.

ZHONG, H.; LI, G.; TANG, R.; DONG, W. Optical performance of inclined south-north axis three-positions tracked solar panels, **Energy**, v. 36, n. 2, p. 1171–1179, 2011.