

III Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 21
	Páginas: 152-159

CLASSIFICAÇÃO DE RASTREADORES SOLARES: UMA BREVE REVISÃO

Juliano da Rocha Queiroz¹, Anacreone da Silva Souza², Cid Marcos Gonçalves Andrade^{3*}

1 – Instituto Federal do Paraná – IFPR – Campus Ivaiporã, juliano.queiroz@ifpr.edu.br

2 – Instituto Federal do Paraná – IFPR – Campus Ivaiporã, anacreone.souza@ifpr.edu.br

3 – Universidade Estadual de Maringá, cmgandrade@uem.br*

Abstract – This work presents a bibliographic study and classification of solar tracking systems. A solar tracker is a device that follows the sun position, in order to keep the solar panel or thermal concentrator perpendicular to the sun's beam, maximizing the energy transfer. The main objective of this work is to carry out a survey on the main types of solar trackers, classifying them according to their main characteristics, listing the benefits and difficulties in their development and implementation.

Keywords: Sun tracking system; Sun tracking strategy; Closed-loop control; Open-loop control; Energy gain.

Introdução

A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar suficiente para suprir inúmeras vezes as necessidades energéticas mundiais neste mesmo período [1]. Esta energia solar pode ser convertida em energia elétrica através do efeito fotovoltaico, que consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz [2]. Com o intuito de maximizar a geração de energia solar fotovoltaica, são estudados sistemas para orientar o arranjo de painéis de forma que estejam sempre voltados para o sol, a fim de que haja uma maior incidência de raios solares perpendiculares à superfície destes painéis. Estes sistemas, chamados de rastreadores solares, são capazes de aumentar a incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos em mais de 30% [3]. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico dos principais tipos de rastreadores solares, classificando-os quanto as suas principais características, elencando os benefícios e dificuldades no desenvolvimento e implementação dos mesmos.

Classificação dos Rastreadores Solares

Os rastreadores solares podem ser classificados quanto a quatro características, sendo elas: ativo ou passivo; de um eixo ou dois eixos; sistema de controle em malha aberta ou fechada; estratégia de rastreamento cronológica ou por sensores [3].

Nos sistemas de rastreamento passivo, não existe um aparato mecânico controlado por um sistema elétrico/eletrônico responsável por rastrear o céu em busca do melhor posicionamento em relação ao sol. A posição dos módulos é alterada por algum arranjo mecânico e este movimento ocorre devido à radiação solar não homogênea sobre a superfície do sistema. Como vantagens esses projetos apresentam simplicidade construtiva, baixo custo de implementação (quando comparados aos sistemas de rastreamento ativos), manutenção simples, alta confiabilidade e não necessitam de uma fonte externa de energia para funcionarem [3]. Como desvantagens estes normalmente são desenvolvidos para movimentação em apenas um eixo (devido à complexidade de estruturação deste tipo de sistema em dois eixos), o que limita sua eficiência em comparação com sistemas de rastreamento biaxiais. Outra questão limitante à utilização deste tipo de sistema é que eles não operam em regiões de frio extremo, além do que sua eficiência é comprovadamente inferior a sistemas de rastreamento ativos.

Na abordagem de sistemas com controle passivo, alguns projetos utilizam um conjunto de tubos interligados contendo um líquido expansível dentro [4]. São basicamente dois tubos nas extremidades do sistema. Quando são iluminados de forma desigual pelo Sol, ocorre a evaporação do líquido e transferência de massa entre os tubos (Fig 1), gerando um desequilíbrio que produz o movimento de rotação.

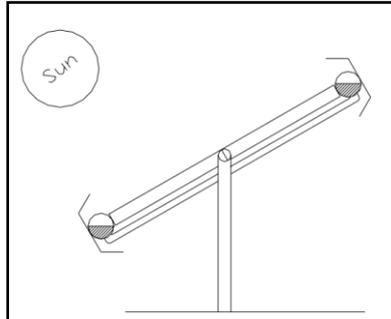


Figura 1: Sistema de controle passivo utilizando transferência de líquido por evaporação [5]

Já outros projetos operam a partir da deformação de tensores fabricados a partir de duas ligas metálicas distintas [5]. A diferença entre os coeficientes de dilatação dos materiais faz com que eles se expandam de forma diferente, o que gera uma força resultante capaz de rotacionar o sistema (Fig. 2).



Figura 2: Protótipo de sistema de controle passivo utilizando tensores bimetálicos [5].

Sistemas de rastreamento ativo possuem um conjunto composto por motores e sensores capazes de orientar os painéis em direção a máxima intensidade luminosa. Como produção de energia elétrica está diretamente relacionada com a incidência de energia luminosa, o rastreamento ativo melhora a eficiência do sistema. Normalmente se baseiam em um par de elementos fotossensíveis capazes de variar o nível de alguma grandeza elétrica de acordo com a radiação luminosa incidente. Se existe uma diferença no nível de sinal entre os dois sensores (Fig. 3), significa que o painel não está alinhado perpendicularmente aos raios solares e, portanto, o posicionamento deve ser corrigido [6]. Um sistema microcontrolado recebe as leituras dos sensores e envia sinal para que os atuadores (normalmente motores elétricos) desloquem o sistema em busca da máxima incidência luminosa.

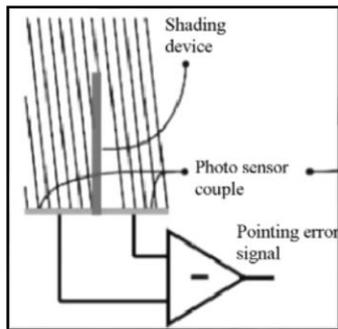


Figura 3: Foto-sensores recebendo intensidades de energia luminosa diferentes [6].

Uma outra estratégia de rastreamento ativo busca posicionar o sistema de acordo com a direção teórica do Sol. De acordo com a data e horário, é possível realizar cálculos e determinar qual a posição do Sol naquele momento. O sistema de rastreamento realiza estas operações e aciona os atuadores para direcionar os painéis [6].

Em sistemas de um eixo, a estrutura gira ao redor de um único eixo (Fig.4). Existem várias estratégias para o posicionamento dos módulos em relação ao eixo de rotação, como por exemplo o horizontal (HSAT), horizontal com inclinação dos módulos (HTSAT), vertical (VSAT), inclinado (TSAT) e polar alinhado (PSAT). Segundo Helwa et al. [7], dentre estes sistemas o de eixo vertical é o mais eficiente. De um modo geral, estes sistemas apresentam grande aplicabilidade devido à sua simplicidade construtiva e fácil sistema de controle.

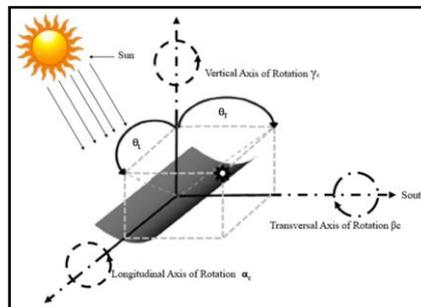


Figura 4: Sistema de *tracker* solar de eixo único [8].

Já os sistemas *dual-axis*, apresentam dois eixos de movimentação (Fig. 5), possibilitando um posicionamento preciso do sistema em relação ao Sol. Embora mais complexos de construir, todos os trabalhos indicam que os sistemas de duplo eixo alcançaram desempenhos entre 20% e 50% maiores em relação aos painéis fixos [3].

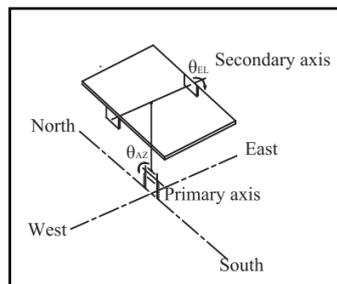


Figura 5: Rastreador solar com dois eixos para movimentação [9].

O rastreador solar também pode ser classificado quanto a estratégia de controle utilizada. O sistema de controle tem como principal objetivo otimizar as diferenças diárias no ângulo de altitude, no deslocamento sazonal de latitude e no anglo de azimute, em diferentes localizações geográficas. A literatura aponta que a utilização correta de sistemas de controle em rastreador solar aumenta o ganho de energia em até 40% durante o verão, em comparação com sistemas estáticos. Os sistemas de controle geralmente são divididos em malha aberta e malha fechada, dependendo da estratégia e da operação dos sinais [3].

Os controladores em malha fechada apresentam como principal característica a realimentação do sinal da variável de saída. No caso do rastreador solar, são utilizados sensores para determinar os parâmetros apropriados da posição do sol, os quais são manipulados pelo controlador através de algoritmos e técnicas de rastreamento e controle, para então acionar os mecanismos de reorientação do dispositivo em direção ao sol, conforme retratado na estrutura genérica de um sistema de controle em malha fechada da Fig 6 [3].

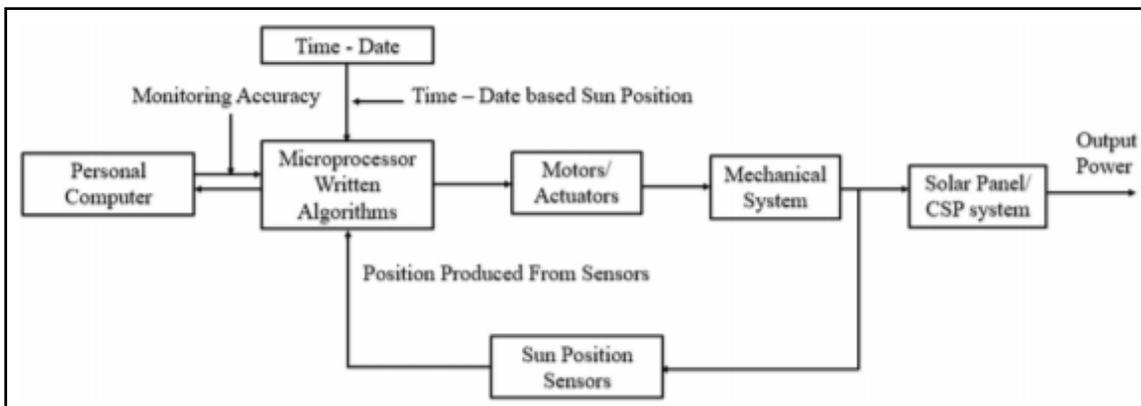


Figura 6: Estrutura genérica de um sistema de controle em malha fechada [3].

Mishra et al (2017) apresenta o um rastreador solar em dois eixos simples, utilizando a plataforma Arduino para realizar a leitura de quatro sensores foto resistivos (LDR – light dependent resistance), executar um algoritmo de controle baseado nas diferenças entre os valores obtidos pelos LDRs e acionar dois motores de corrente contínua para reorientar o painel solar, além da tensão no painel solar ser medida e enviada através de comunicação Bluetooth para um dispositivo móvel [10]. Também utilizando LDR como sensores para determinar a posição do sol, Badoud (2017) propôs um rastreador solar em dois eixos utilizando modelagem de gráfico de ligações (bond graph) em um controlador lógico programável (CLP), obtendo cerca de 51,2% de aumento da energia gerada em comparação com painel fixo, como mostra o gráfico da Fig 7 [11].

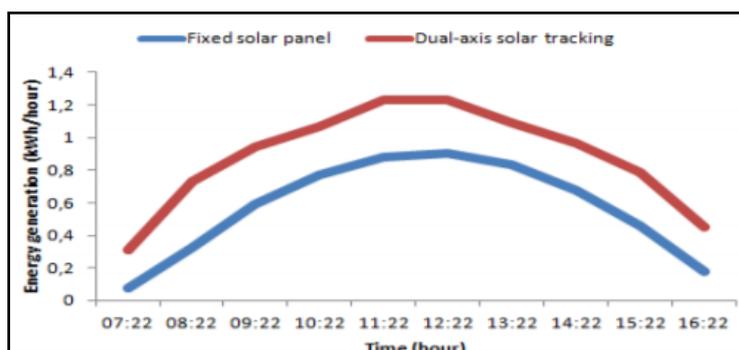


Figura 7: Geração de energia durante o dia para sistema com rastreador e fixo [11].

Os controladores em malha aberta não utilizam a realimentação da variável de saída, dessa maneira não é possível corrigir erros, assim como compensar perturbações durante o funcionamento do sistema. Neste tipo de controle, o algoritmo do controlador realiza as tomadas de decisões baseado apenas no estado atual, acionando os mecanismos de reorientação do rastreador, como mostra a Fig 8. Dessa maneira, os controladores em malha aberta para rastreador solar são mais simples e baratos, porém, demandam estudos preliminares para calibração dos parâmetros dos algoritmos [3].

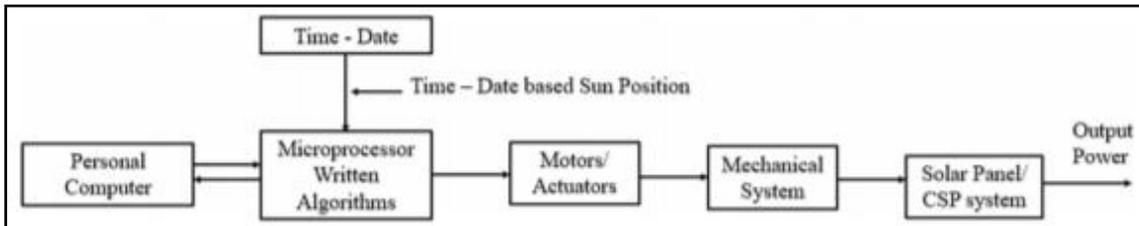


Figura 8: Estrutura genérica de um sistema de controle em malha aberta [3].

Chabuk et al (2017) apresenta o desenvolvimento e comparação entre um rastreador solar de um eixo e de dois eixos. O controle é do tipo malha aberta, utilizando um RTC (real time clock) para determinar intervalos de tempo para o movimento dos motores de corrente contínua. Como resultado, os autores observaram que o rastreador em dois eixos apresenta maior ganho energético em comparação com o de um eixo [12]. Também utilizando controle em malha aberta, Sidek et al (2017) emprega um algoritmo para determinar a trajetória do sol a partir de equações astronômicas e informações de GPS (Global Positioning System), atingindo acurácia de $0,5^\circ$ durante o rastreamento. Neste sistema, os autores utilizaram um controlador PID (Proportional Integral Derivative) para controlar o movimento da estrutura, garantindo o mínimo de consumo energético. Como resultados, obteve-se aumento de geração de energia em cerca de 26,9% para dias limpos e 12,8% para dias nublados e chuvosos [13].

Assim como o controle, a estratégia de rastreamento caracteriza outra classificação pertinente, visto que podem ser utilizadas três estratégias: modelos matemáticos que utilizam a data e o tempo; sensoriamento ótico-elétrico microcontrolado; ou a combinações de ambas. A estratégia de rastreamento baseada em data e tempo é caracterizada pelo uso de fórmulas e algoritmos, sensores, localização geográfica assim como o horário local, como entradas para o controlador, o qual gera sinais para os mecanismos de orientação do sistema [3]. Abdallah et al (2008) propôs um rastreador de um eixo utilizando um CLP e um motor para ajuste do ângulo de azimute, dividindo o dia em quatro etapas configuradas para atuar o motor em velocidades diferentes, obtendo ganhos energéticos de até 22% [14]. De maneira semelhante, Toyman (2016) apresenta um rastreador de dois eixos cujo algoritmo de controle utiliza o horário local e data juntamente com a lógica *fuzzy* para controlar os motores DC que movimentam a estrutura [15].

A estratégia de rastreamento baseado em sensores ótico-elétrico microcontrolados tem como principal característica o uso de uma unidade de processamento e ao mínimo duas unidades de sensores óticos, os quais funcionam sob o princípio da diferença de iluminação [3]. Diversos estudos utilizam esta abordagem, como Mustafa e Ahmed (2017), Chhoton e Chakraorty (2017), Makwana e Lad (2017), Shukla e Prakash (2017), Akbar et al (2017), dentre outros [16-20]. Akbar et al (2017) utiliza quatro sensores do tipo LDR, um acima, um abaixo, um a direita e outro a esquerda do painel solar, de maneira que a diferença de iluminação entre os pares de LDR seja o sinal de entrada no algoritmo de controle [20]. Já Makwana e Lad (2017) organiza os quatro sensores em

uma estrutura na forma de cruz, com o intuito de que os raios solares não perpendiculares causem sombreamento nos sensores não atingidos, conforme mostra a Fig 10. Neste tipo de arranjo, a diferença de iluminação entre os sensores é maior, tornando o algoritmo de busca mais preciso [18].

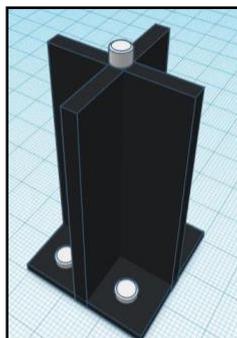


Figura 10: Arranjo de sensores em forma de cruz [18].

Por fim, a estratégia de rastreamento mais completa utiliza tanto os sensores como também as informações de data, tempo e posição geográfica [3]. Utilizando essa estratégia, também chamada de híbrida, Tharamuttam e Ng (2017) apresentaram um rastreador solar automático de dois eixos, realizando um estudo comparativo entre a tensão gerada por um sistema fixo, com estratégia cronológica, de sensores, e híbrida. Como resultado, os autores destacam os ganhos de 8,5%, 10% e 13%, em comparação com o sistema fixo, para as estratégias cronológica, de sensores e híbrida, respectivamente [21].

Os diferentes tipos de rastreadores solares, bem como suas características, estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos sistemas de rastreamento

Tipo de sistema de rastreamento	Vantagens	Desvantagens	Referências
Eixo único	Simplicidade construtiva. Fácil sistema de controle. Custo mais baixo.	Rendimento inferior ao sistema com dois eixos. Posicionamento limitado.	[7] [8]
Dois eixos	Maior eficiência (comparados com sistemas de um eixo) Posicionamento mais preciso.	Custo mais elevado. Complexidade construtiva.	[5] [9]
Passivos	Construção simples. Não necessitam de um sistema de controle. Não necessitam de uma fonte de alimentação.	Baixa eficiência. Limitação a dispositivos de um único eixo. Não operam satisfatoriamente em regiões com temperaturas muito baixas.	[3] [4]
Ativos	Maior eficiência. Operam sob quaisquer condições climáticas. Podem ser aplicados a sistemas com 1 ou 2 eixos.	Necessidade de um sistema de controle externo. Maior complexidade. Sistema de controle precisa ser alimentado eletricamente.	[11] [12]

Controle em malha fechada	Permite a correção de erros e a compensação de perturbações, possibilitando uma orientação precisa.	Maior complexidade do sistema de controle. Custos mais elevados.	[10] [11]
Controle em malha aberta	Simplicidade construtiva (em comparação com os sistemas de malha fechada). Custo menor.	Necessitam de um estudo preliminar detalhado para a calibração inicial precisa dos parâmetros iniciais do algoritmo.	[12] [13]
Estratégia de rastreamento baseada em data e tempo	Simplicidade construtiva. O sistema de controle não é afetado por perturbações (como nuvens por exemplo).	Eficiência baixa. Necessidade de um estudo prévio elaborado para um funcionamento adequado.	[14] [15]
Estratégia de rastreamento baseada em sensores	Maior eficiência. Rastreamento preciso da posição do sol.	Algoritmo de controle é mais complexo. Necessita de uma modelagem precisa dos sensores.	[16] [20]
Estratégia de rastreamento mista	Combina as duas estratégias de rastreamento, proporcionando maior precisão.	Maior custo. Maior complexidade do sistema de controle. Necessita de boa modelagem dos sensores e um estudo prévio adequado.	[3] [21]

Conclusão

Neste trabalho elencou-se diversos tipos de rastreadores solares, suas especificidades em relação à estrutura mecânica, estratégia de rastreamento e tipo de controle. De uma forma geral, os rastreadores solares podem ser classificados como ativos e passivos, e subdivididos com base no número de eixos móveis, um ou dois eixos de movimento. Para os rastreadores ativos, ainda se classifica em relação ao tipo de controle, em malha aberta ou fechada, e em relação a estratégia de rastreamento, cronológica ou com sensores. O comparativo de ganho energético aponta que os rastreadores de dois eixos, com controle em malha fechada e estratégia de controle híbrida (cronológica e com sensores) possui maior rendimento, apesar de ter maior custo e complexidade de desenvolvimento [3]. Como pesquisa futura, pode-se estudar a utilização de um dispositivo rastreador com estratégia híbrida desconectado fisicamente do arranjo de painéis, tornando este dispositivo de menores proporções e peso, fazendo com que seu consumo energético seja menor. Além disso, é possível utilizar sensores do tipo acelerômetro, giroscópio e magnetômetro para determinar os ângulos relativos do rastreador e enviar estes dados por rede, como entrada para o sistema de controle de diversos painéis, de maneira que um rastreador seja aplicado a diversos arranjos de painéis fotovoltaicos ou concentradores térmicos.

Referências

- [1] M. G. Villalva; J. R. Gazoli. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012.
- [2] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.
- [3] W. Nsengiyumva; S. G. Chen; L. Hu; X. Chen. Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018, 81, 250-279.

- [4] Parmar NJ, Parmar AN, Gautam VS. Passive solar tracking system. *Int J Emerg Technol Adv Eng* 2015; 5:138–45.
- [5] Clifford MJ, Eastwood D. Design of a novel passive solar tracker. *Sol Energy* 2004; 77:269–80.
- [6] Mousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, Mobli H, Abrinia K, Sharifi A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:1800–18.
- [7] Helwa NH, Bahgat ABG, Shafee AMRE, Shenawy ETE. Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems. *Energy Sources* 2000; 22:23–4.
- [8] Sallaberry F, Pujol-Nadal R, Larcher M, Rittmann-Frank MH. Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. *Energy Convers Manag* 2015; 105:1281–90.
- [9] Yao Y, Hu Y, Gao S, Yang G, Du J. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. *Renew Energy* 2014; 72:88–98.
- [10] J. Mishra; R. Thakur; A. Deep. Arduino based dual axis smart solar tracker. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*. 2017, 3, 532-535.
- [11] A. E. Badoud. Bond graph modeling, implantation and performance analysis of dual-axis solar tracking system. *Advances in Engineering: an International Journal (ADEIJ)*. 2017, 1, 51-62.
- [12] A. Chabuk; A. Shinde; M. Narale; P. Gonjari; P. S. Magdum. Dual axis solar tracker using microcontroller. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017, 4, 796-800.
- [13] M. H. M. Sidek; N. Azis; W. Z. W. Hasan; M. Z. A. Ab Kadir; S. Shafie; M. A. M. Radzi. Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2017, 124, 160-170.
- [14] S. Abdallah; O. O. Badran. Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. *Desalination*. 2008, 220, 669-676.
- [15] H. Toylan. Performance of dual axis solar tracking system using fuzzy logic control: a case study in Pinarhisar, Turkey. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*. 2017, 2, 130-136.
- [16] F. M. Mustafa; S. A. Ahmed. Design and implementation of dual-axis solar tracking system. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017, 4, 11-19.
- [17] A. C. Chhoton; N. R. Chakraborty. Dual axis solar tracking system – A comprehensive study: Bangladesh context. In: *Proceedings of the 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering, Bangladesh*, 2017, 421-426.
- [18] A. Makwana; D. Lad. Dual axis solar tracking system using 5-LDR sensor. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2017, 7, 1750-1753.
- [19] A. Shukla; S. Prakash. Dual axis solar tracking system using LDR. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017, 4, 175-180.
- [20] H. S. Akbar; A. I. Siddiq; M. W. Aziz. Microcontroller based dual axis sun tracking system for maximum solar energy generation. *American Journal of Energy Research*. 2017, 5, 23-27.
- [21] J. K. Tharamuttam; A. K Ng. Design and development of an automatic solar tracker. *Energy Procedia*. 2017, 143, 629-634.