

Modelo de rastreador solar utilizando equações para predição da posição do sol

Micael Praxedes de Lucena

Laboratório de Otimização de Sistemas Elétricos - LOSE
CEAR, Universidade Federal da Paraíba - UFPB
João Pessoa - PB, CEP: 58051-085
Email: micaelpraxedes@ieee.org

Camila Seibel Gehrke

Laboratório de Otimização de Sistemas Elétricos - LOSE
CEAR, Universidade Federal da Paraíba - UFPB
João Pessoa - PB, CEP: 58051-085
Email: camila@cear.ufpb.br

Resumo—Neste artigo, é proposto um modelo de rastreador solar de dois eixos offline e sem o uso de sensores. Ao abordar matematicamente a posição do sol em relação ao painel pode-se rastrear a direção e inclinação em que tem-se a maior irradiação solar possível sobre o mesmo, aumentando assim a energia obtida. Para esse sistema temos um rendimento teórico próximo aos modelos baseados em sensores, contudo esse sistema apresenta baixa complexibilidade para implementação, além de ser mais barato em comparação aos modelos baseados em sensores, pois é possível implementar esse rastreador solar de dois eixos utilizando apenas um microcontrolador e dois servomotores.

Keywords – Energia solar, Rastreador solar, Sensorless, Sun path

I. INTRODUÇÃO

Os humanos sempre estiveram ligados a energia, sendo assim notável a dependência da sociedade de fontes de energia para sustentar o consumo, dessa forma a demanda por fontes alternativas de energia tende a aumentar [6]. Além disso, as cidades se encontram em um processo de verticalização devido à falta de espaço nos grandes centros urbanos, impossibilitando uma geração de grande porte próxima ao consumidor de maneira que os painéis fotovoltaicos ganharam popularidade por ser um fonte de energia renovável [1] e ocupar pouco espaço útil, pois pode ser instalado sobre o telhado, contudo seu maior problema é sua baixa eficiência em torno de 18% [2] para os modelos presentes no mercado. Esse valor depende da energia total recebida, ou seja, depende diretamente da irradiação solar de maneira que pode ser utilizado um sistema de rastreamento solar [3]. O modelo usual dos rastreadores solares utilizam sensores [4], o que eleva o custo final do sistema. Neste trabalho utilizou-se uma abordagem matemática para diminuir o valor final do rastreador (removendo os sensores do sistema). Para isso o sistema deve funcionar baseado em equacionamentos para a predição da posição do sol. Será analisado o desempenho do sistema e comparado o aumento da sua eficiência em relação a outro sistema com a posição fixa.

II. EQUACIONAMENTO

Uma das abordagens possíveis para aumentar a eficiência de um painel fotovoltaico é aumentar a irradiação solar sobre o mesmo, logo é importante saber qual a posição ideal que o

painel deve ser posto. Na Figura 1, ilustra-se a posição ideal para um painel fixo localizado no hemisfério norte, onde o painel está voltado para o sul e com uma inclinação igual a latitude local. Logo, durante um equinócio, ao meio-dia, tem-se os raios solares incidindo com o melhor ângulo possível sobre o painel.

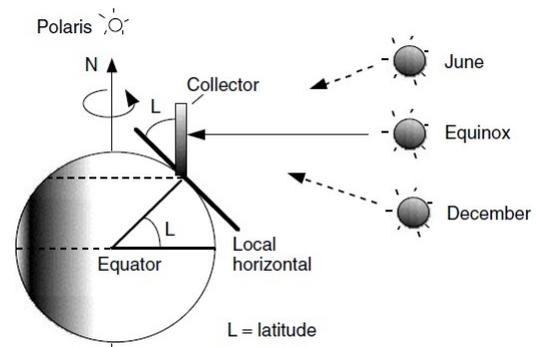


Figura 1. Posicionamento ideal para um painel fixo [5].

Para esse caso a irradiação sobre o painel é máxima durante, apenas, dois dias do ano. Para uma irradiação solar maior pode-se calcular, as equações utilizadas nessa seção são baseadas na referência [5], qual a angulação ideal para cada dia do ano, tal como segue:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (1)$$

A equação 1, em que "n" é o dia do ano, permite calcular a angulação do sol em relação a linha do equador. Sabendo disso, e da latitude do local (L), pode-se definir o ângulo de altitude do sol ao meio dia, que pode ser obtido por:

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (2)$$

Portanto pode-se obter a inclinação ideal para o painel como demonstrado em:

$$Tilt = 90^\circ - \beta_N \quad (3)$$

Para essa situação tem-se a máxima irradiação solar apenas ao meio-dia, contudo é de interesse a máxima irradiação solar para todos os horários com luz solar acessível.

$$H = \left(\frac{15^\circ}{\text{hour}} \right) (m) \quad (4)$$

Para obter-se o ângulo de altitude e o ângulo de azimute, em vez do tempo, utiliza-se o "ângulo de hora" (H) que tem sua forma expressa em (4), onde " m " denota a quantidade horas antes do meio dia solar. Conhecendo H pode-se obter o ângulo de altitude (β) por:

$$\beta = \arcsin(\cos L \cos H + \sin L \sin H) \quad (5)$$

Conhecendo β é possível obter o ângulo de azimute (ϕ_s) por:

$$\phi_s = \arcsin \left(\frac{\cos \delta + \sin H}{\cos \beta} \right) \quad (6)$$

Devido a ambiguidade do arco seno existirão duas possibilidades para o ângulo de azimute obtido, de forma que para determinar o ângulo correto emprega-se o seguinte critério:

$$\phi_s = \arcsin \left(\frac{\cos \delta + \sin H}{\cos \beta} \right), \text{ se } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad (7)$$

$$\phi_s = 180 - \arcsin \left(\frac{\cos \delta + \sin H}{\cos \beta} \right), \text{ c.c.} \quad (8)$$

Pode-se também, calcular a irradiação solar direta e difusa sobre o painel, para este estudo a irradiação refletida não foi considerada.

A atenuação da irradiação total é uma função da distância que os raios devem atravessar pela atmosfera. Fatores como poeira, poluição do ar, nuvens entre outros também atenuam a irradiação. O modelo usado para tratar esse decaimento é um decaimento exponencial, como pode ser visto em 9

$$I_B = A e^{-km} \quad (9)$$

Onde I_B é a parcela da irradiação que chega na terra, A é um fluxo extraterrestre aparente, k é um fator sem dimensão chamada de *profundida óptica*. E m é a relação de massa de ar que é dada por:

$$m = \frac{1}{\sin \beta} \quad (10)$$

Pode-se obter os valores de A e k por (11) e (12) respectivamente:

$$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 275) \right] \quad (11)$$

$$k = 0,0174 + 0,035 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right] \quad (12)$$

Para a irradiação difusa, a mesma dependerá da posição do painel e da irradiação direta, tendo a forma:

$$I_{DC} = C I_B \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (13)$$

Onde tem-se:

$$C = 0.095 + 0.04 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right] \quad (14)$$

Onde Σ é o ângulo de inclinação do painel. Logo a irradiação total sobre o painel será:

$$I_T = I_B + I_{DC} \quad (15)$$

III. IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação do sistema de rastreador solar de dois eixos utilizou-se o microcontrolador da texas a Tiva C Series, ilustrado na Figura 2.

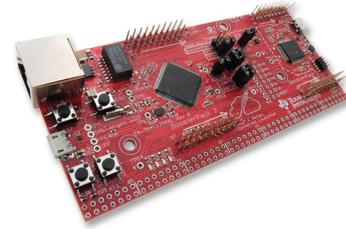


Figura 2. Tiva C Series TM4C1294.

Onde para a implementação do controle do ângulo do painel utilizou-se dois servos motores, um para cada eixo, controlados através de um sinal PWM.



Figura 3. Micro Servo SG90.

Através de (5) e de (3) é possível obter o ângulo de inclinação para um eixo durante todos os horários do dia e todos os dias do ano. Obtem-se dessa forma um os valores que são utilizados de referência para o sinal PWM. Para o micro servo utilizado tem a precisão de 1° , onde o mesmo é controlado por um sinal PWM com período 20ms e com largura de pulso entre 1 e 2 ms. O qual estará posicionado no centro com largura de pulso igual a 1,5ms, para atingir 90° para a esquerda e para a direita é necessária uma largura de pulso de 1ms e 2ms respectivamente. Dessa forma para uma variação de $5,55\mu s$ na largura de pulso devemos obter uma variação de 1° no micro servo. Assim é possível relacionar os ângulos obtidos anteriormente e o controle do servo motor.

Utilizando o mesmo procedimento através de (6) pode-se obter o ângulo de azimute que será o ângulo do outro eixo do nosso sistema. É possível então gerar um novo sinal PWM para o nosso segundo servo motor que irá retornar o ângulo desejado.

Para a implementação desse sistema faz-se necessário um clock externo de $f = 32.768KHz$, o mesmo pode ser implementado através de um circuito analógico, para a utilizar do RTC (Real Time Clock) sendo dessa forma possível gerir um calendário com informações sobre o dia e horário atual que servirá para ativar a interrupção, com a variação do horário, a qual irá então calcular os ângulos e mudar a posição do painel de acordo através do sinal PWM enviado para o servomotor. Todo esse processo pode ser melhor visualizado nos fluxogramas apresentados nas Figuras 4 e 5.



Figura 4. Fluxograma Pré-Interrupção.



Figura 5. Fluxograma da Interrupção.

Para a calibração desse sistema, faz-se necessário na montagem definir a data e o horário atual.

IV. RESULTADOS

Utilizando os dados da localização do sol obtidos na seção II é possível montar um sistema de rastreador solar para um melhor aproveitamento da irradiação solar durante o dia.

Variando "n" em (1), através de (2) e (3), obtém-se o posicionamento ideal para o meio-dia para os dias desejados. Ao variar "n" de 1 a 365 obtém-se essa posição para todos os dias do ano. Na Figura 6 ilustra-se a variação do ângulo de

inclinação do painel para a cidade de João Pessoa durante o ano.

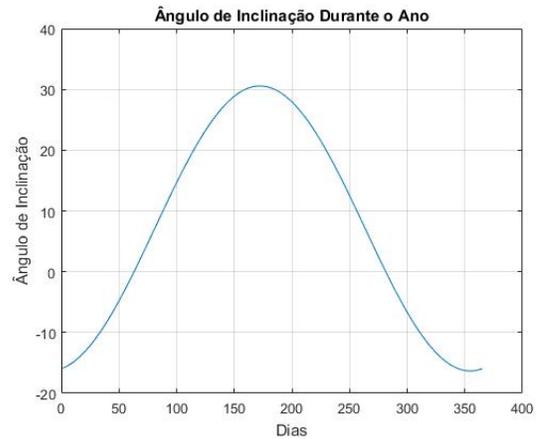


Figura 6. Variação da Inclinação do Painel ao Longo do Ano.

É possível perceber pela Figura 6 que há uma mudança significativa da posição ideal do painel se o ângulo de inclinação para a metade do ano for comparado com o início ou final do ano, é possível obter uma diferença de aproximadamente 45°. Dessa maneira pode-se perceber que para determinados períodos do ano o painel deverá estar virado para o sul e durante outros períodos o mesmo deverá estar virado para o norte. Geralmente para o painel fixo no hemisfério sul utiliza-se o painel virado para o norte durante todo o ano.

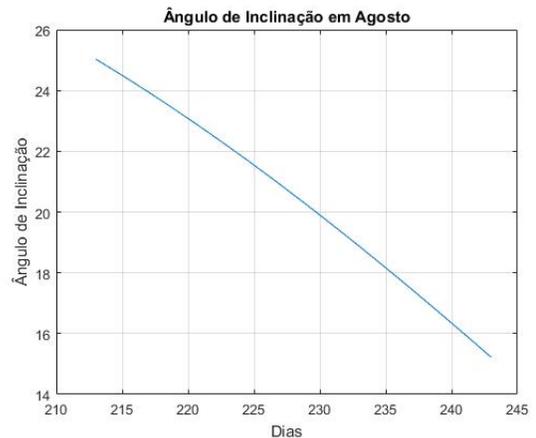


Figura 7. Variação da Inclinação do Painel ao Longo do Ano.

Na Figura 7 ilustra-se esse mesmo ângulo durante todo o mês de agosto.

Dessa maneira é possível montar um sistema de rastreador solar de um eixo. Contudo, dessa maneira tem-se a irradiação solar máxima sobre o painel apenas ao meio dia. Variando a hora em (4), entre as 6h e as 18h, podemos obter o ângulo de altitude através de (5) e o ângulo de azimute por (6). Dessa forma na Figura 8 ilustra-se a variação desses ângulos durante o dia 21 de Agosto para a cidade de João Pessoa.

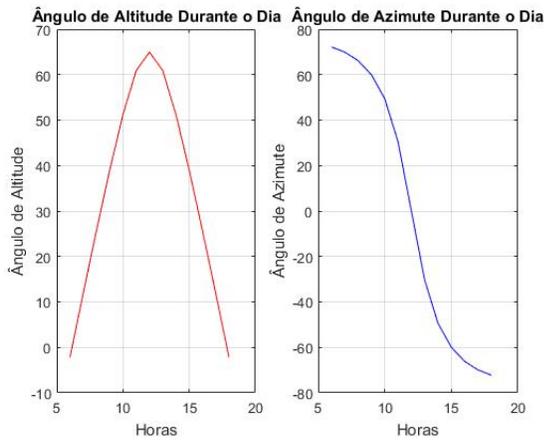


Figura 8. Ângulo de Azimute e Ângulo de Altitude Ideal para João Pessoa no Dia 21 de Agosto.

Pode-se notar pela Figura 8 que o pico do ângulo de altitude é próximo ao meio dia solar, onde pode-se perceber que o mesmo é próximo de 65° onde esse ângulo deve se aproximar de 90° para o equinócio de primavera ou de outono. Para o ângulo de azimute para no hemisfério sul utiliza-se como referência o norte. Pode-se perceber que antes do meio-dia teremos o ângulo de azimute positivo isso indica que o sol está a leste do norte (a referência adotada). Após o meio-dia tem-se ângulos negativos o que indica que o sol estará a oeste do norte. Dessa forma é notável a variação da posição do sol relação ao sistema durante o intervalo de tempo próximo ao meio-dia.

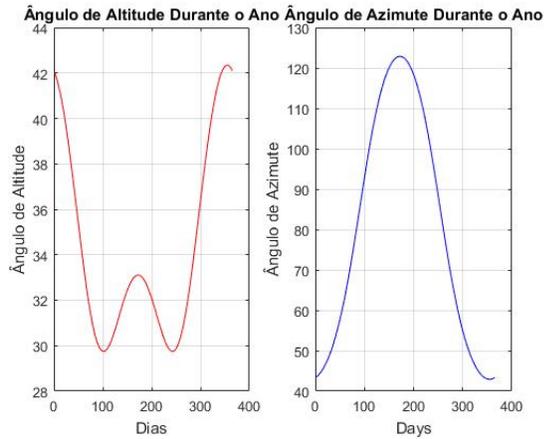


Figura 9. Ângulo de Azimute e Ângulo de Altitude Ideal para João Pessoa durante todo o ano as 10h

Nas Figuras 9 e 10 ilustra-se a variação do ângulo de altitude e do ângulo de azimute para a cidade de João Pessoa durante todo o ano para as 10h e 11h respectivamente. Na Figura 8 é perceptível a variação desses ângulos durante o dia, dessa forma torna-se notável a diferença de um painel fixo para o sistema com dois eixos, tornando clara a importância de um sistema de rastreador solar de dois eixos.

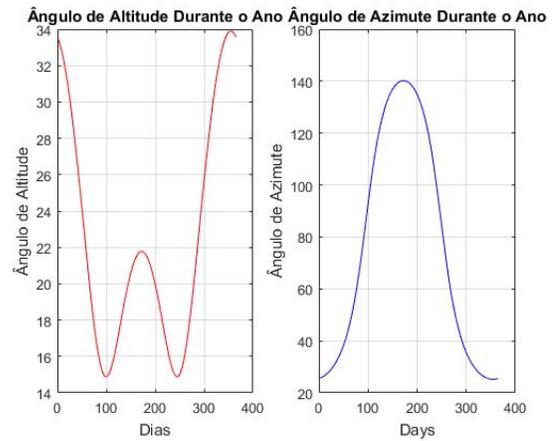


Figura 10. Ângulo de Azimute e Ângulo de Altitude Ideal para João Pessoa durante todo o ano as 11h

Para um dia claro assumimos a irradiação de referência sendo $1000W/m^2$. Nesse caso para um sistema fixo no dia do equinócio ou para um sistema com rastreador em relação ao meio dia solar pode-se aproximar sua forma como sendo o cosseno do ângulo de hora obtido através de (4). Para o rastreador solar de dois eixos podemos considerar a irradiação sendo constante durante todo o dia. As formas de onda obtidas para um painel fixo e outro com sistema de rastreador solar é visível na Figura 11.

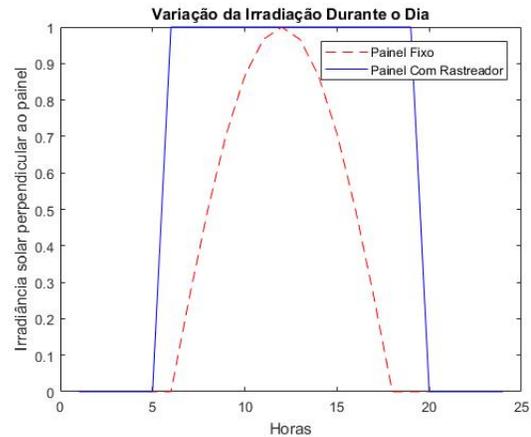


Figura 11. Variação da irradiação solar ao longo do dia

Ao integrarmos as curvas entre 6 e 18 horas obtém-se a energia gerada por metro quadrado. Para o painel com rastreador a integral se reduz a área do retângulo, logo obtém-se $E_1 = 12000Wh$. Para o painel fixo tem-se então $1000 \int_6^{18} \cos(h)dh$ dessa forma $E_2 = 7640Wh$. Ao dividir, então esses valores, $\frac{E_2}{E_1}$, obtém-se que o sistema com rastreador ira prover um aproveitamento aproximadamente 57% maior em relação ao sistema fixo durante o equinócio.

De forma mais geral pode-se calcular qual a quantidade de irradiação que incide sobre o painel. A irradiação sobre o painel é uma função do ângulo de incidência, tendo a forma

$I_{BC} = I_B \cos \theta$, onde o ângulo de incidência tem a forma:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_s - \phi_c) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (16)$$

Onde β é o ângulo de altitude, ϕ_s é o ângulo de azimute do sol, ϕ_c é o ângulo de azimute do painel, Σ é o ângulo de inclinação do painel.

Utilizando (15) pode-se obter a irradiação total deverá que incidir sobre o painel. Na Figura 12, ilustra-se a variação dessa irradiação ao longo do ano.

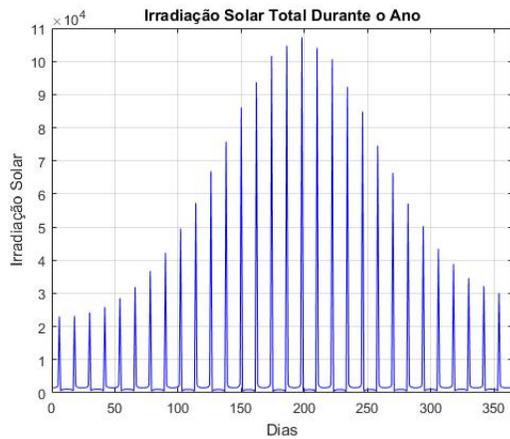


Figura 12. Irradiação solar total durante o ano

Através de (16) e utilizando os valores obtidos de (15) obtém-se os valores da irradiação real sobre o painel, para o sistema de dois eixos e para um painel fixo com inclinação igual a latitude, para todos os dias do ano durante as 10h e 12h.

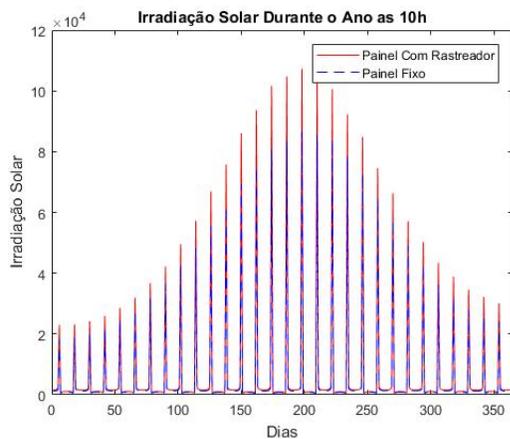


Figura 13. Irradiação solar durante o ano para um painel fixo e outro com rastreado para as 10h

É possível visualizar pelas Figuras 13 e 14 que teoricamente a irradiação sobre o painel com o sistema de rastreador de dois eixos será máxima, ou seja, $I_{BC} = I_B$. Pode-se notar que para as 10h tem-se uma diferença significativa na irradiação chegando a uma diferença de aproximadamente $197 \text{KW}/\text{m}^2$.

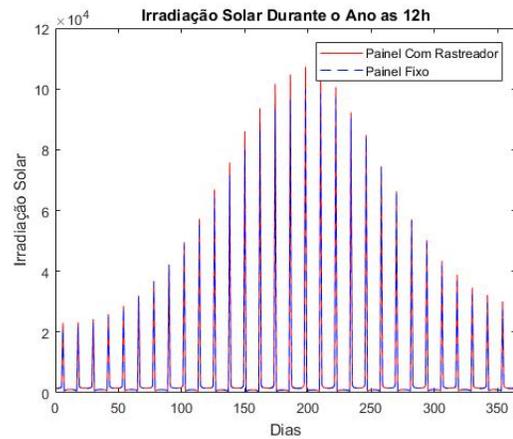


Figura 14. Irradiação solar durante o ano para um painel fixo e outro com rastreado para as 12h

Para o meio dia tem-se o painel fixo atingindo a irradiação máxima durante dois dias do ano, contudo ainda há uma diferença significativa em outros dias, chegando essa diferença a ser aproximadamente $71 \text{W}/\text{m}^2$.

Pode-se obter também a variação da irradiação para todo o ano.

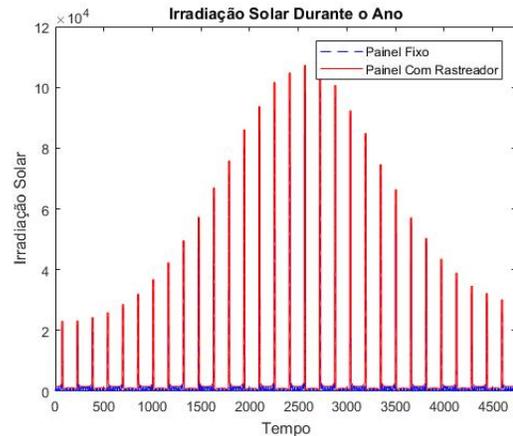


Figura 15. Irradiação solar durante o ano para um painel fixo e outro com rastreado entre as 6h e as 18h

Como visualizado através da Figura 15 para todos os dias do ano entre as 6h e 18h horas obtém-se uma variação da irradiância sobre o painel. Pode-se obter a potência total somando a potência para cada horário, dessa forma obtém-se também a energia total para o sistema fixo e para o sistema de dois eixos, sendo elas respectivamente $E_1 = 76,93 \text{GWh}$ e $E_2 = 134,79 \text{GWh}$. Dessa forma é possível visualizar que o sistema com rastreador irá proporcionar um aproveitamento cerca de 57% maior em comparação com o sistema fixo.

Para o dia 21 de agosto temos o ângulo desejado no primeiro servomotor para 13h sendo $Tilt = 24,0549^\circ$, é necessário gerar um sinal para atuar no servo e fazê-lo variar a posição do painel, como discutido anteriormente teremos nosso motor

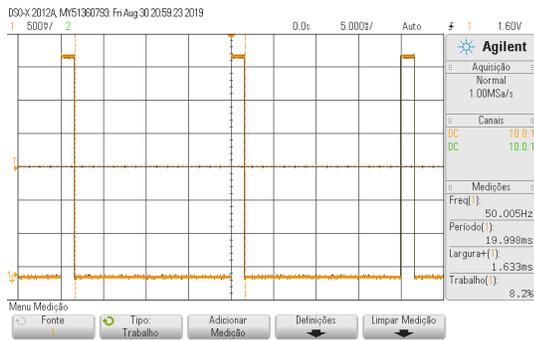


Figura 16. Ângulo de inclinação para o dia 21 de agosto as 13h

posicionado no centro para uma largura de pulso 1,5ms e para uma variação de $5,55\mu s$ na largura de pulso iremos obter uma variação de 1° . Dessa maneira para o ângulo em questão devemos ter uma largura de pulso de $1,6335ms$, e na Figura 16 pode-se visualizar aproximadamente a mesma largura de pulso. Para o segundo servomotor deve-se obter $\phi_s = -38,4367^\circ$, na Figura 17 ilustra-se o sinal gerado pelo microcontrolador para atuar no servomotor.

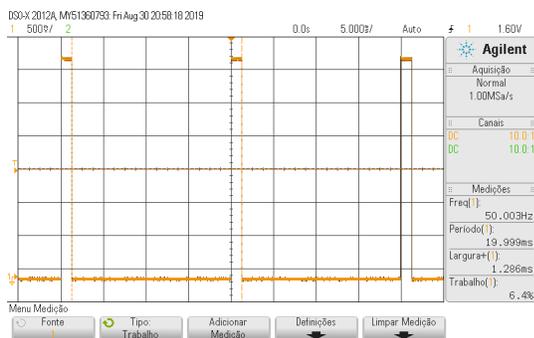


Figura 17. Direção para o dia 21 de agosto as 13h

Para esse caso a largura de pulso deve ser $1,2866ms$, e podemos perceber pela Figura 17 que o valor obtido é próximo do esperado.

De maneira semelhante, também para o dia 21 de agosto, para 14h tem-se o ângulo de inclinação $Tilt = 35,3034^\circ$ e a direção $\phi_s = -57,5922^\circ$, logo temos para o servomotor 1 e 2 a largura de pulso $1,6959ms$ e $1,1786ms$ respectivamente. O sinal enviado para os servomotores para o ângulo de inclinação e para a direção podem ser visto nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

Nota-se pelas Figuras 18 e 19 que a largura de pulso obtida é próxima a esperada.

É importante também notar a variação no ângulo em apenas uma hora, tem-se uma diferença de aproximadamente 11° para o ângulo de inclinação e cerca de 19° para o ângulo de azimute.

V. CONCLUSÃO

Como pôde ser notado deve-se obter então um aumento da energia total em aproximadamente 57% para um sistema

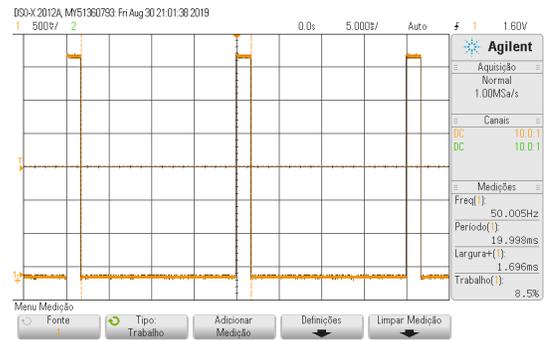


Figura 18. Ângulo de inclinação para 21 de agosto as 14h

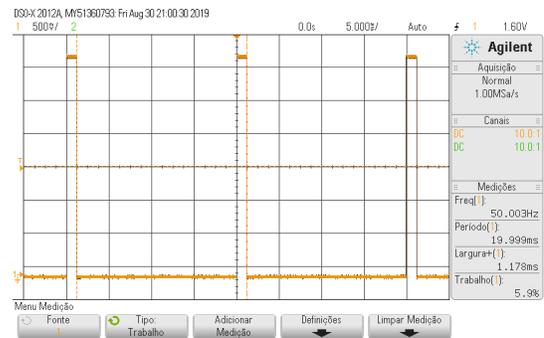


Figura 19. Direção para o dia 21 de agosto as 14h

de rastreador solar de dois eixos em relação a um sistema fixo. Pode-se destacar também a fácil implementação levando em consideração a baixa complexibilidade e o baixo custo se comparado com modelos que utilizam sensores. Outros resultados importantes como o aumento da potência gerada real em relação a um sistema fixo serão apresentados na versão final.

Neste trabalho não foram consideradas perdas de dispositivos semicondutores e dos motores, para sistemas em larga escala uma análise mais completa deve ser realizada.

REFERÊNCIAS

- [1] BEATLEY, Timothy. Envisioning solar cities: urban futures powered by sustainable energy. *Journal of Urban Technology*, v. 14, n. 2, p. 31-46, 2007.
- [2] FRONTIN, Sérgio de Oliveira et al. Usina fotovoltaica Jaíba Solar—Planejamento e Engenharia. Brasília, Teixeira Gráfica e Editora Ltda, p. 532, 2017.
- [3] MOUSAZADEH, Hossein et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 13, n. 8, p. 1800-1818, 2009.
- [4] SAWANT, Aditya et al. Design and Analysis of Automated Dual Axis Solar Tracker Based on Light Sensors. In: 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC) I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC), 2018 2nd International Conference on. IEEE, 2018. p. 454-459.
- [5] MASTERS, Gilbert M. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos avançados*, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.