

ESPECIFICAÇÃO E PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA COM RASTREAMENTO SOLAR

Téo Cerqueira Revoredo - teorevored@uerj.br

Marcos Vinícius dos Santos Ribeiro - mvinicius.sr@gmail.com

Pedro Luis Moreira Leitão - pedroleitaorj@gmail.com

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

Resumo. A geração de eletricidade a partir da energia solar é uma proposta viável para solucionar parte dos problemas de energia do mundo. Dentre os principais fatores que influenciam o desempenho dos painéis fotovoltaicos na geração de energia está a sua orientação com relação ao Sol. Se o sistema é voltado de maneira constante e exata para o astro, o aumento da eficiência é significativo. Com esse objetivo, rastreadores solares orientam o painel constantemente na direção do Sol, e compensam modificações no ângulo de altitude diária, no desvio sazonal de latitude e no ângulo de azimute da estrela. Para que tenham bom desempenho, deve haver um compromisso adequado entre o ganho energético do posicionamento automático e o gasto de energia para mover o painel, além do desgaste das partes móveis e a manutenção necessária. O sistema deve operar de maneira estável e sem oscilações, e o foco de projeto deve ser a configuração dos ângulos de rastreamento e a otimização das partes móveis, enquanto uma configuração adequada do sistema de controle tende a aumentar a sua eficiência. Nesse contexto, esse trabalho apresenta os conceitos fundamentais do rastreamento solar, bem como a especificação e a prototipagem de um sistema de microgeração de energia com essa capacidade. A validação do desempenho do protótipo é realizada com base na comparação das medições feitas com um painel solar de especificações semelhantes, porém fixo, e com outros trabalhos da literatura. Os resultados comprovam a exequibilidade e a utilidade do sistema proposto.

Palavras-chave: Rastreador solar, Geração fotovoltaica, Prototipagem.

1. INTRODUÇÃO

A energia é o principal fator no desenvolvimento da humanidade e, como tal, tem experimentado constante crescimento global de demanda (Sefa, Mehmet e Colak 2009), (Enjavi-Arsanjani, Hirbodi e Yaghoubia 2015). Entretanto, o consumo elevado a partir de fontes não renováveis tem afetado nocivamente o meio ambiente, sendo a emissão de gases de efeito estufa (GEE) o principal vilão dessa história. Surge, assim, o desafio de suprir essa demanda de maneira sustentável, reduzindo a emissão dos referidos gases na atmosfera. Nesse contexto, as fontes renováveis de energia figuram como atores principais e a demanda pela sua utilização vem aumentando.

Energias renováveis são aquelas provenientes de fontes naturalmente reabastecidas pela natureza. Como exemplo, cita-se a energia solar, que converte a incidência dos raios solares em eletricidade ou calor, a energia eólica, que converte a energia dos ventos em eletricidade através de aerogeradores, a hídrica, que converte a energia gerada pelas correntezas dos rios, das marés e das ondas em eletricidade e a geotérmica, que transforma a energia da terra em calor.

No contexto nacional, o Plano Decenal de Expansão 2024 (PDE 2024) adotou como uma das principais diretrizes a priorização da participação de fontes renováveis para atender ao crescimento do consumo de energia elétrica no horizonte decenal, compatibilizando esta participação com o atendimento à carga de forma segura e tendo em vista o compromisso brasileiro de manter seu crescimento econômico apoiado em uma matriz energética limpa. Segundo o PDE 2024, a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) expandirá 55% em dez anos (Tolmasquim 2016).

O Brasil pode se tornar um dos 20 maiores países produtores de energia solar já em 2018, alcançando a marca de 1 GW em capacidade instalada. O PDE 2024 estima que a capacidade instalada de geração solar chegue a 8,3 GW em 2024, sendo 7 GW de geração centralizada e 1,3 GW de geração distribuída. Os estudos do PNE 2050, em elaboração pela EPE, estimam que 18% dos domicílios em 2050 contarão com geração fotovoltaica.

Uma matriz energética com uma grande participação de fontes renováveis de energia, permite que o país atinja as metas de emissão de (GEE) estabelecidas na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e nos acordos internacionais sobre o mesmo. O Decreto 7.390/10, que regulamenta a PNMC, estabelece no setor de energia o plano setorial de mitigação e adaptação às mudanças do clima. Dessa forma, o cenário de expansão do PDE 2024 é compatível com a meta estabelecida no PNMC (MME - Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia 2015).

Nesse contexto, as pesquisas básicas e aplicadas à sistemas de geração de energia, de grande ou pequeno porte, tornam-se de grande importância para o Brasil, com objetivo de desenvolver tecnologia e produtos aplicáveis a essa nova realidade que vem se estabelecendo com as fontes renováveis. Sistemas de microgeração, adequados a residências e estabelecimentos comerciais, baseados em geração fotovoltaica são de grande relevância e o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo de fabricação, instalação e manutenção, que possuam bom desempenho sob diversos

aspectos é fundamental para o estabelecimento dessa parte da matriz energética do país. É nesse cenário que este trabalho se insere, apresentando o desenvolvimento de um protótipo simples de sistema de microgeração com capacidade de rastreamento solar, que provê as bases para a implementação e consequente avaliação de diferentes técnicas de utilização de sensores, atuação e controle com vistas ao desenvolvimento de um sistema facilmente aplicável como medida de melhor aproveitamento energético em unidades consumidoras de pequeno ou grande porte.

1.1 Geração fotovoltaica

Os processos mais usuais de aproveitamento da energia solar para geração de eletricidade e de calor, são: Fotovoltaico, que converte a luz do sol em energia elétrica; Concentração da luz solar (CSP, do inglês *concentrating solar power*), que produz calor para uso direto ou para geração de energia elétrica, e o aproveitamento por meio de coletores, que realizam o aquecimento direto da água e/ou de ambientes a partir da luz do sol.

A conversão fotovoltaica pode ser aplicada em pequenos sistemas autônomos, em geração distribuída (GD), e em grandes centrais (MME - Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia 2016), e traz uma série de benefícios estratégicos para o desenvolvimento do país. Costuma-se dividir estes benefícios em três eixos: Socioeconômico, ambiental e estratégico. No eixo socioeconômico, estima-se que o segmento gere de 25 a 30 novos empregos por megawatt instalado por ano. No eixo ambiental, trata-se de uma energia limpa, renovável, de baixo impacto, que contribui para que o Brasil reduza as suas emissões de gases do efeito estufa. No eixo estratégico, amplia a participação de fontes renováveis no atendimento da demanda e reduz as perdas em transmissão e distribuição (Moreira s.d.). Entretanto, ainda há dificuldades a serem superadas, tais como o custo elevado e a baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos. Na busca para mitigar perdas, o mercado de energia solar vem se tornando cada vez mais competitivo, contando com investimentos expressivos para a melhoria dos produtos existentes e o desenvolvimento de novos, e investimentos na fabricação de equipamentos nacionais.

1.2 Rastreamento solar

Os painéis fotovoltaicos são constituídos de células capazes de converter energia luminosa em energia elétrica, através do chamado efeito fotovoltaico. As células são cobertas com vidro para que sejam protegidas da ação do meio ambiente e, com isso, perdas por reflexão acontecem, que afetam diretamente a capacidade do painel de converter a energia disponível. O aproveitamento máximo dos raios solares é alcançado quando o ângulo de incidência (ângulo entre a trajetória de incidência e a reta normal ao plano que contém a superfície da célula solar) for zero. Atualmente, a maioria dos sistemas fotovoltaicos em operação possuem painéis fixos, que não têm a capacidade de se adaptar à mudança de posição do Sol para anular o ângulo de incidência e, portanto, possuem desempenho aquém do possível (Mathew 2015).

O rastreador solar é um dispositivo capaz de movimentar o painel fotovoltaico para que siga o posicionamento do sol. Um rastreador ideal permitiria que o sistema fotovoltaico apontasse de maneira exata para a posição do Sol, compensando as modificações no ângulo de altitude diária, no desvio sazonal de latitude e no ângulo de azimute do Sol.

O movimento do Sol exige um sistema de controle para o rastreador que opere de maneira estável e sem oscilações. O foco principal de projeto deve ser a configuração dos ângulos de rastreamento (Skour, et al. 2016), (Koussa, et al. 2011) e a otimização das partes móveis (Kassem e Hamad 2011), enquanto uma configuração adequada do sistema de controle pode aumentar a sua eficiência (Koyuncu e Balasubramanian 1991). Cada um desses aspectos apresenta certas características, vantagens e desvantagens e, se trabalhadas de maneira adequada, levam ao aumento da eficiência global.

De forma resumida, as principais vantagens do uso de um sistema de rastreamento solar são (Passos s.d.):

- Sistemas com seguidores solares geram mais energia do que os sistemas fixos, com ganhos que podem alcançar valores de 25 a 60%. De certa forma, e com devidos critérios de comparação, pode-se dizer que um sistema com seguidor solar que aumenta em 30% a produção de energia é semelhante a um sistema fixo 30% maior;
- Com o rastreamento solar, não só a produção de energia aumenta, mas também melhora a forma como a potência é entregue. Em painéis fixos, a produção de energia aumenta gradualmente das primeiras horas da manhã até o meio-dia e, em seguida, passa a diminuir. Painéis móveis mantêm a potência gerada próxima a um valor máximo desde o início da manhã até o final da tarde;
- Avanços na tecnologia e na confiabilidade dos componentes eletrônicos e mecânicos reduziram drasticamente as preocupações de manutenção de longo prazo para sistemas de rastreamento.

Algumas limitações a serem superadas são listadas a seguir, (Passos s.d.):

- São ligeiramente mais caros, devido ao uso de tecnologias mais complexas e de peças móveis;
- Mesmo com os avanços na confiabilidade, a manutenção necessária para manter o funcionamento de um sistema com seguidor solar é maior do que um sistema fixo, embora um bom projeto e a qualidade dos componentes de um sistema rastreador possa reduzir significativamente a quantidade de intervenções de manutenção necessárias;
- Exigem uma maior preparação do local da instalação, cuidados com a mobilidade e com o cabeamento;

- Seguidores solares são geralmente projetados para climas com pouca ou nenhuma neve, tornando-os uma solução mais viável em climas mais quentes. Um sistema fixo acomoda condições ambientais mais severas com mais facilidade do que os sistemas de rastreamento.

Trabalhos anteriores, realizados com o objetivo de comparar um sistema com rastreamento a um fixo, comprovaram a eficácia do primeiro, fazendo com que o aproveitamento da conversão da energia solar disponível em energia elétrica seja bastante significativo. No trabalho desenvolvido por (Chun-Sheng, et al. 2008), utilizando o princípio da hora solar, chegou-se à conclusão que, para um sistema com dois eixos de movimento, a melhora no aproveitamento chega a 47,3% em relação ao sistema fixo e para um sistema com apenas um eixo, a melhora do aproveitamento é de apenas 4,7%. Em (Alves 2008), implementou-se um sistema com dois eixos de movimento, também baseado no princípio da hora solar, controlado um controlador lógico programável e os resultados indicaram aumento na energia gerada de até 70% para determinadas situações, com um valor médio de 53%, sendo que o consumo dos componentes eletromecânicos responsáveis pelo controle de movimento do painel representa menos de 0,1% desta energia. No trabalho desenvolvido por (Mamun e Samrat 2014), foi implementado um rastreador solar multidirecional e um com dois eixos de movimento, utilizando sensores ópticos do tipo resistores variáveis pela luz (LDR) como única referência. O ganho no aproveitamento com relação ao painel fixo atingiu 63,96%.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema simples para microgeração solar com capacidade de rastreamento da posição do Sol. O posicionamento do painel solar é realizado em duas etapas, a saber: A orientação geral é baseada no conceito de hora solar, a partir do qual são calculados os ângulos horário e de declinação. Em seguida, é realizado um ajuste deste posicionamento, denominado ajuste fino, de acordo com as condições ambientais de momento, a partir das informações obtidas de sensores do tipo LDR. O sistema é composto por elementos estruturais, elétricos e eletrônicos, sendo o algoritmo de controle embarcado em um processador Arduino (Arduino s.d.). O protótipo foi testado em campo, tendo o seu desempenho comparado a um painel de mesmas especificações, porém fixo. Os resultados comprovam o funcionamento adequado do sistema móvel e o ganho de eficiência obtido com relação ao estático.

A Fig. 1 apresenta um diagrama geral que ilustra os principais fluxos de sinais do protótipo de sistema de rastreamento aqui descrito. Detalhes de especificação e operação serão discutidos nas seções que seguem.

Este trabalho é organizado da seguinte maneira: A Seção 1 apresentou o conceito de rastreadores solares e o contexto da geração fotovoltaica no Brasil, a Seção 2 apresenta os conceitos e equações fundamentais para a realização do sistema de rastreamento solar, a Seção 3 apresenta a especificação do sistema proposto e a Seção 4 resume a sua operação. Resultados experimentais são apresentados na Seção 5 e considerações finais são feitas na Seção 6.

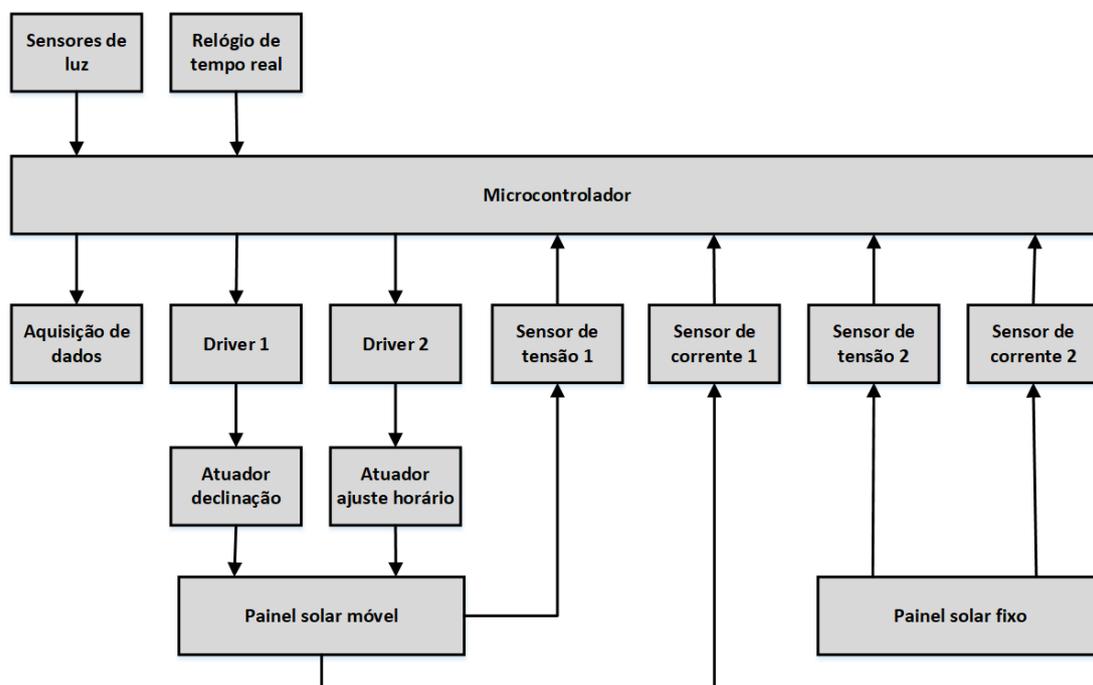


Figura 1: Diagrama em blocos do sistema de rastreamento.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Para posicionar o painel solar de maneira eficaz e aprimorar a obtenção de energia do Sol, sem o uso de sensores, é necessário conhecer a posição do astro com relação a Terra. As próximas seções apresentam as equações utilizadas para o cálculo dos ângulos responsáveis pelo posicionamento do painel (Stine e Geyer 2001).

2.1 Movimentação da terra com relação ao sol

A Terra completa uma volta em torno do sol a cada 365,25 dias numa órbita elíptica, com uma distância média do astro de $1,496 \times 10^{11}$ m, definida como uma Unidade Astronômica (1 UA). O plano desta órbita é denominado plano elíptico. A órbita da Terra alcança sua distância máxima do Sol (no afélio), de $1,52 \times 10^{11}$ m por volta do terceiro dia de julho. A distância mínima entre a Terra e o Sol (periélio) ocorre por volta do segundo dia de janeiro, quando a Terra está a $1,47 \times 10^{11}$ m de distância da estrela.

A Terra gira em torno do seu próprio eixo polar, inclinada de $23,45^\circ$, em ciclos de aproximadamente 24 horas. A direção na qual o eixo polar aponta é fixa no espaço e é alinhada com a estrela do norte (polaris) até cerca de 45 minutos de arco ($\cong 13$ mrad). A rotação da Terra em torno de seu eixo polar produz os dias e noites, e a inclinação deste eixo em relação ao plano elíptico cria as estações do ano, à medida em que o planeta gira em torno do Sol.

O tempo. Para medir a evolução do tempo, mede-se a rotação da Terra ao redor do seu eixo polar. O parâmetro de medição de tempo (e longitude) é o meridiano que passa pela cidade de Greenwich, na Inglaterra, e por ambos os pólos. Este é conhecido como Meridiano Principal.

Atualmente, a principal escala de tempo mundial, denominada hora universal (antigamente chamada de tempo médio de Greenwich), ainda é medida no meridiano principal. Trata-se de um sistema de tempo com 24 horas, baseado no "tempo médio", segundo o qual um dia tem 24 horas, e a metade da noite (meia-noite) corresponde à zero hora.

O tempo médio é baseado na duração de um dia médio. A duração de um segundo "médio" é obtida dividindo-se o tempo médio de uma transição completa do Sol, ao longo de um ano, por 86.400. Na prática, a duração de qualquer dia específico, medido desta forma, pode variar até 30 segundos ao longo do ano. Esta variação é devida a quatro fatores (Jespersen e Fitz-Randolph 1977): A órbita terrestre em volta do Sol não é circular e, sim, elíptica. Desse modo, a Terra movimenta-se mais rapidamente quando está mais próxima do Sol do que quando está mais afastada do mesmo; O eixo da Terra é inclinado em relação ao plano que contém a sua órbita; A Terra gira em uma velocidade irregular em torno de seu eixo e o planeta oscila sobre o seu eixo.

Fuso Horários. Como é convencional que 12:00 seja aproximadamente na metade do dia, independente da longitude, desenvolveu-se um sistema de fusos horários. Estes são regiões geográficas, de aproximadamente 15° de largura longitudinal, cada uma centrada em um meridiano cuja hora local padrão é igual à hora solar média. Desta forma, o tempo é medido em relação às zonas de hora padrão, que são localizadas a cada 15° do meridiano principal, de forma que a hora local varie em incrementos de 1 hora por Zona. As zonas localizadas a leste de Greenwich têm horários adiantados em relação ao horário de Greenwich, e as localidades situadas a oeste de Greenwich têm horários atrasados em relação ao mesmo.

Horário de Verão. Decisões políticas dos governos ou imposições econômicas alteram os padrões para a medida do tempo em alguns países durante determinados períodos do ano, dificultando a correlação entre o horário do relógio com o movimento do Sol. Um conceito conhecido e utilizado em alguns países é o chamado "horário de verão", também conhecido como "horário de economia de energia" (DST, do inglês *daylight savings time*), período no qual os relógios são adiantados em 1 hora durante alguns meses do ano com o objetivo de deslocar o horário de ponta, diminuindo a demanda de energia no mesmo, o que resulta em economia de energia e melhor utilização da luz do dia. Nestas situações, um projetista de sistemas de captação de energia solar deve estar atento ao horário do relógio adotado na localidade sob estudo.

Tempo Sideral. Neste trabalho, o conceito de tempo é associado ao tempo solar médio, que define um dia (86.400 segundos) como sendo o intervalo médio de tempo decorrido até que um mesmo ponto na Terra seja atingido pelo Sol por duas vezes consecutivas (transição). Entretanto, além do tempo solar médio, estudos de astronomia ou de mecânica orbital utilizam o conceito do "Tempo Sideral" (Stine e Geyer 2001). Este sistema de medida do tempo baseia-se no dia sideral, o qual corresponde à duração de uma rotação completa da Terra sobre seu próprio eixo.

Um dia médio é aproximadamente 4 minutos mais longo que o dia sideral porque a Terra, durante o tempo que realiza uma rotação completa sobre seu eixo também está em movimento orbital em relação ao Sol. Deste modo, um dia sideral contém exatas 23 horas, 56 minutos e 4,09053 segundos de tempo médio. Assim, por definição, existem 86.400 segundos siderais em um dia sideral, o que significa que 1 segundo sideral é ligeiramente mais curto que 1 segundo solar médio. De maneira precisa: 1 segundo médio = 1,002737909 segundo sideral.

2.2 Ângulo horário (ω)

Para descrever a rotação da Terra em volta de seu eixo polar, usa-se o conceito do ângulo horário ω . Ele é definido como a distância angular entre o meridiano do observador e o meridiano cujo plano contém o Sol, tal como apresentado na Fig. 2. O ângulo horário é zero ao meio-dia solar (quando o Sol atinge seu ponto mais alto no céu). Neste horário, diz-se que o Sol está "direto ao norte" (no hemisfério sul), já que o plano do meridiano do observador contém o Sol. O ângulo horário é incrementado em 15° a cada hora (completando 360° em 24h).

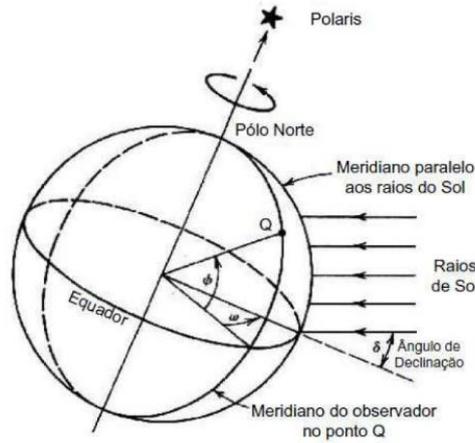


Figura 2: Ângulo horário (Alves 2008).

Hora solar. A hora solar é baseada no relógio de 24 horas, com 12:00 sendo o horário em que o Sol está exatamente na direção Norte. O conceito de hora solar é usado para prever a direção dos raios solares em um determinado ponto sobre a Terra. A hora solar depende da localidade (longitude) e geralmente é diferente da hora local marcada pelos relógios, definida pelas Zonas de hora padrão (fuso horário) e outras aproximações. A Eq. (1) é usada para calcular o ângulo horário a partir da hora solar. Nesta, t_s é a hora solar (em horas).

$$\omega = 15(t_s - 12) \text{ [graus]} \quad (1)$$

Equação do tempo (EOT). A diferença entre a hora solar média e a hora solar real é chamada de equação do tempo (EOT). A diferença acumulada entre ambas para uma determinada data pode atingir aproximadamente 17 minutos, medidos dentro de um ciclo anual, descrita através da Eq. (2). Uma aproximação para calcular a equação do tempo foi desenvolvida por (Woolf 1968) e tem exatidão de aproximadamente 30 segundos, considerando as horas de luz de um dia.

$$EOT = 0,258 \cos(x) - 7,416 \sin(x) - 3,648 \cos(2x) - 9,228 \sin(2x) \text{ [min]} \quad (2)$$

na qual o ângulo x é definido como uma função do número do dia N , conforme Eq. (3).

$$x = \frac{360(N - 1)}{365,242} \text{ [graus]} \quad (3)$$

Para um posicionamento mais exato do painel fotovoltaico, um cálculo com menor margem de erro deve ser utilizado, apresentado na Eq. (4) a qual tem um erro médio de apenas 0,63s e um erro máximo absoluto de 2s. O valor resultante em minutos é positivo quando a hora solar aparente está adiantada em relação à hora solar média e negativo quando a hora solar aparente está atrasada da hora solar média.

$$EOT = 60 \sum_{k=0}^5 \left[A_k \cos\left(\frac{360 \times k \times n}{365,25}\right) + B_k \sin\left(\frac{360 \times k \times n}{365,25}\right) \right] \text{ [min]} \quad (4)$$

n é o número de dias em um ciclo de 4 anos, sendo $n = 1$ o primeiro dia de janeiro dos anos bissextos, e $n = 1.461$ correspondente ao dia 31 de dezembro do quarto ano do ciclo. Os coeficientes A_k e B_k são apresentados na Tab. 1.

2.3 Conversão do tempo

A conversão de hora solar (t_s) para hora local do relógio (LCT, do inglês *local clock time*) requer conhecimento da localização, do dia do ano, e dos padrões com os quais os relógios foram ajustados. Ela é realizada através da Eq. (5).

$$t_s = LCT + \frac{EOT}{60} - LC - D \text{ [horas]} \quad (5)$$

na qual LC é uma correção de longitude (LC, do inglês *Longitude Correction*) realizada por intermédio da Eq. (6).

Tabela 1 : Coeficientes da equação do tempo (Stine e Geyer 2001).

k	A _k (hora)	B _k (hora)
0	$+2,0870 \times 10^{-4}$	0
1	$+9,2869 \times 10^{-3}$	$-1,2229 \times 10^{-1}$
2	$-5,2258 \times 10^{-2}$	$-1,5698 \times 10^{-1}$
3	$-1,3077 \times 10^{-3}$	$-5,1602 \times 10^{-3}$
4	$-2,1867 \times 10^{-3}$	$-2,9823 \times 10^{-3}$
5	$-1,5100 \times 10^{-4}$	$-2,3463 \times 10^{-4}$

$$LC = \frac{(\text{longitude local}) - (\text{longitude meridiano fuso horário local})}{15} \quad [\text{horas}] \quad (6)$$

O parâmetro D é igual a 1 se no local estiver em vigor o "horário de Verão", ou zero, caso contrário.

2.4 Ângulo de declinação (δ)

O plano que inclui o Equador da Terra é chamado de plano equatorial. Se uma linha é traçada entre o centro da Terra e o Sol, o ângulo entre esta linha e o plano equatorial da Terra é denominado ângulo de declinação (δ). Na época do ano em que a extremidade mais ao sul do eixo rotacional da Terra está inclinada em direção ao Sol, o plano equatorial da Terra está inclinado de $23,45^\circ$ em relação à linha Terra-Sol. Nesta situação, que ocorre por volta do dia 22 de dezembro, o Sol atinge a sua posição mais elevada no céu ao meio-dia solar e o ângulo de declinação será $\delta = +23,45^\circ$. Esta condição é chamada de solstício de verão e indica o início do verão no hemisfério sul.

Enquanto a Terra continua sua órbita anual em torno do Sol, um ponto é alcançado aproximadamente 3 meses após o solstício de verão, quando uma linha da Terra em direção ao Sol está contida no plano equatorial. Neste momento, um observador que estivesse no Equador observaria o Sol diretamente sobre sua cabeça ao meio-dia. Esta condição é chamada de equinócio já que, em qualquer parte na Terra, o tempo do dia em que o Sol é visível é exatamente de 12 horas e, analogamente, o tempo em que o Sol não é visível é de 12 horas. Tal condição ocorre duas vezes ao ano, o equinócio de outono (aproximadamente em 22 de março), marcando o início do outono, e o equinócio de primavera (aproximadamente em 23 de setembro), marcando o início da primavera no hemisfério Sul. Nos equinócios, δ vale zero.

O solstício de inverno ocorre por volta do dia 21 de junho e marca o ponto onde o plano equatorial está relativamente inclinado para a linha Terra-Sol de tal modo que o hemisfério sul está inclinado em direção oposta ao Sol, ou seja, em sua posição mais distante do Sol. Diz-se que nesta situação o sol do meio-dia está em sua posição "mais baixa" no céu e o ângulo de declinação é de $\delta = -23,45^\circ$. Por convenção, os ângulos de declinação de inverno são negativos.

O conhecimento do valor exato do ângulo de declinação é fundamental para navegação e astronomia, sendo que para aplicações em projetos de energia solar uma aproximação de 1° é suficiente. Uma expressão para o cálculo aproximado do ângulo de declinação é apresentada na Eq. (7).

$$\delta = -\arcsen\{0,39795 \cos[0,98563(N - 173)]\} \quad [\text{graus}] \quad (7)$$

na qual o argumento do cosseno está em graus e N é o número do dia no ano, calculado de maneira idêntica àquela definida para a Eq. (4). A Fig. 3 ilustra a variação do ângulo de declinação ao longo de 1 ano.

2.5 Ângulo de latitude (φ)

O ângulo de latitude (φ) é o ângulo entre uma linha traçada de um ponto da superfície terrestre para o centro da Terra e o plano equatorial da Terra. A interseção do plano equatorial com a superfície da Terra forma o Equador e é determinada como latitude 0° . O eixo de rotação da Terra faz interseção com a superfície do planeta na latitude 90° (Polo Norte) e na latitude -90° (Polo Sul). Deste modo, qualquer ponto da superfície terrestre pode ser definido pela interseção de um ângulo de longitude e um ângulo de latitude.

Outros ângulos de latitude de interesse são o Trópico de Câncer ($23,45^\circ$ e o Trópico de Capricórnio ($-23,45^\circ$ de latitude). Estes ângulos representam as inclinações máximas dos polos Norte e Sul em direção ao Sol. Outras duas latitudes de interesse são o Círculo Polar Ártico ($66,55^\circ$ de latitude) e Círculo Polar Antártico ($-66,55^\circ$ de latitude) que representam a interseção de uma perpendicular à linha Terra-Sol quando os polos Norte e Sul (respectivamente) estão com suas máximas inclinações em direção ao Sol. Os trópicos representam as latitudes mais altas, onde o sol está diretamente sobre a cabeça no meio-dia solar, e os círculos ártico e antártico, as latitudes mais baixas, onde há 24 horas de luz do dia ou escuridão. Todos esses eventos ocorrem nos solstícios de verão ou inverno.

3. ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA

O protótipo é instalado em uma estrutura metálica projetada para suportar (e movimentar) o painel fotovoltaico, bem como os outros elementos que compõem o sistema. O painel é acoplado a dois motores de passo, um para ajuste do ângulo horário, o outro para o ajuste do ângulo de declinação. Esses são conectados aos seus respectivos *drivers* de potência, sendo acionados através de comandos oriundos do microcontrolador, no qual o algoritmo para determinação da mudança de posicionamento ao longo do dia é implementado. Ademais, o sistema possui um módulo de relógio, para contar as horas externamente ao microcontrolador, sensores de tensão e corrente para cálculo da potência gerada pelos painéis, e um módulo de aquisição de dados, o qual permite o armazenamento do histórico de medições em um cartão de memória. Além do sistema de rastreamento solar, um painel fotovoltaico semelhante foi instalado em estrutura estática para a realização de testes de campo em condições semelhantes e comparação do seu desempenho com o do painel móvel.

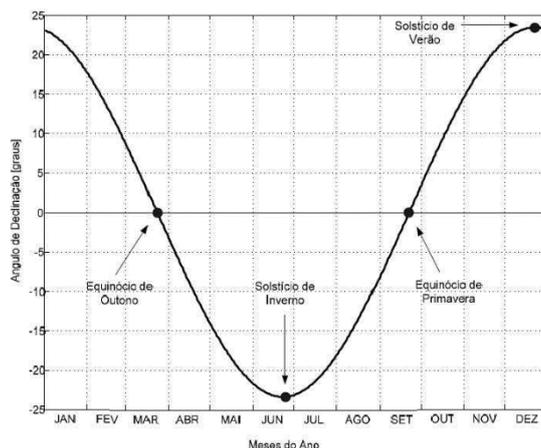


Figura 3: Variação do ângulo de declinação ao longo do ano.

A Tab. 2 apresenta as especificações dos painéis solares utilizados.

Tabela 2: Especificações Técnicas dos Módulos Fotovoltaicos.

Característica	Unidade	Valor
Potência Máxima (P_{max})	W	20
Tolerância (ΔP_{max})	%	+/- 5
Eficiência (η_m)	%	11,5
Tensão na Potência Máxima (V_{MPP})	V	16,6
Corrente na Potência Máxima (I_{MPP})	A	1,2
tensão de circuito aberto (V_{oc})	V	21,4
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	A	1,31
Dimensões (L×C×A)	mm	360 × 480 × 25
Peso	kg	2,26

A Fig. 4 apresenta uma visão geral e os principais componentes do protótipo de sistema de rastreamento.

Os motores utilizados para a movimentação do painel solar são de passo, ou seja, são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor desse tipo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados passos, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência entre os seus terminais. A velocidade de rotação do rotor é dada pela frequência de pulsos recebidos e o tamanho do ângulo rotacionado é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados. A escolha pelo motor de passo foi feita visando a exatidão do movimento e a facilidade de controle de fatores tais como: Ângulo de rotação, velocidade e posição. O erro de posicionamento é pequeno e não-cumulativo (em geral na faixa de 5%). Neste trabalho, foram utilizados dois motores de passo idênticos com as especificações apresentadas na Tab. 3, um motor para ajuste do ângulo horário e outro para ajuste do ângulo de declinação. O acionamento dos motores é feito de maneira independente.

O cálculo da posição desejada para o rastreador solar, bem como a leitura dos sensores e a geração de comandos para acionamento dos motores é realizado por uma placa de controle de baixo custo se comparado a alternativas encontradas na literatura, tais como controladores lógicos programáveis. A placa utilizada no sistema é denominada ArduinoMEGA, cujas especificações são apresentadas na Tab. 4 (Oliveira 2015).

A plataforma Arduino é uma plataforma com documentação aberta baseada em *hardware* e *software* de fácil utilização. São dispositivos de placa única projetados com base em microcontroladores da marca Atmel, especialmente

os chips da família megaAVR (ATmega8, ATmega168, ATmega328 e ATmega1280). Sua linguagem de programação é derivada do *Wiring*, que é um *framework* livre para programação de microcontroladores e se assemelha à linguagem C++.

Para realizar o armazenamento de dados, foi integrado ao sistema um módulo para leitura e escrita em cartões SD.

Tabela 3: Especificações dos motores de passo.

Característica	Unidade	Valor
Tensão Nominal	VDC	24 (-0,3 a 7/fase)
Corrente	A	2,2/fase
Ângulo de passo	mA	50
Resistência	Ω	8,6/fase
Indutância	mH	19/fase
Torque	Kgf.cm	13
Número de fios	-	6
Peso	g	1000

Tabela 4: Especificações do microcontrolador (*Arduino s.d.*).

Característica	Unidade	Valor
Microcontrolador	-	ATmega2560
Tensão de Operação	V	5
Tensão de entrada (recomendada)	V	7-12
Tensão de entrada (limite)	V	6-20
Pinos de E/S digitais	-	54 (dos quais 15 são saídas PWM)
Pinos de entrada analógicos	-	16
Corrente DC por pino I/O	mA	20
Corrente DC para Pin 3,3V	mA	50
Memória flash	KB	256
SRAM	KB	8
EEPROM	KB	4
Velocidade do relógio	MHz	16
Comprimento	mm	101,52
Largura	mm	53,3
Peso	g	37

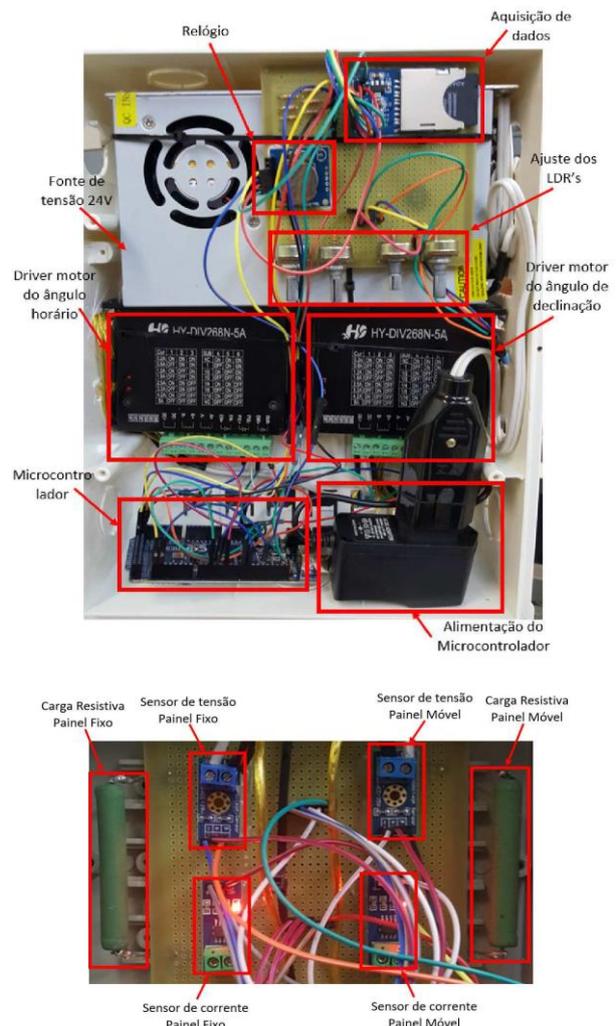
Um relógio de tempo real foi também integrado, para realizar a marcação de tempo de maneira independente do Arduino. O módulo tem 56 bytes de memória não-volátil disponível para uso, é capaz de armazenar informações completas de data e hora, nos formatos de 12 ou 24 horas. Meses com menos de 31 dias e anos bissextos são ajustados automaticamente. Uma bateria de lítio garante que os dados sejam preservados mesmo sem alimentação externa, e é acionada automaticamente em caso de falta de energia. Cabe ressaltar que é possível realizar a marcação de tempo com o próprio Arduino, utilizando rotinas simples tais como a *millis()*, que implementa um contador com escala de milissegundos. Entretanto, após a realização de testes com o sistema, ficou comprovado que a implementação da contagem de tempo diretamente no Arduino acumulava atrasos ao longo da operação, por conta das outras funções desempenhadas pelo controlador, especialmente o acionamento dos motores. A contagem de tempo externa ao Arduino sobressaiu-se como a melhor opção para o painel rastreador solar de baixo custo aqui proposto.

Sensores de tensão e corrente são utilizados para medir essas grandezas tanto no painel fixo quanto no móvel, permitindo o cálculo da potência gerada por ambos em condições semelhantes de operação. As especificações destes sensores são apresentadas nas Tab. 5 e Tab. 6.

Além do posicionamento realizado através do conhecimento da posição do Sol, um ajuste fino da orientação da estrutura ocorre em função da luminosidade incidente, objetivando compensar situações ambientais locais tais como nebulosidade ou sombras. Para determinar a incidência de luz sobre o painel foram instalados quatro sensores do tipo LDR na parte superior da estrutura, dispostos em formato de cruz, representando as quatro direções (Norte, Sul, Leste e Oeste).

Tabela 5: Especificações Técnicas do Módulo Sensor de Tensão.

Característica	Unidade	Valor
Leitura	VDC	0,02445 - 25
Resolução	V	0,00489
Tensão de entrada	VDC	0 a 25
Valor dos resistores	K Ω	30 e 7,5
Proporção de divisão	-	5: 1
Tolerância do resistor	%	1
Dimensões (C×L×A)	mm	25 × 13 × 0,51
Peso	g	2,8



(a) Visão Geral

(b) Principais componentes

Figura 4: Protótipo de rastreador solar.

Tabela 6: Especificações Técnicas do Módulo Sensor de Corrente

Característica	Unidade	Valor
Chip	-	ACS712-5A
Faixa de leitura da corrente bidirecional	A	-5 a +5
Tempo de resposta	μ s	5
Largura de banda	KHz	80
Margem de erro	%	1,5 a 25°C
Resistência interna	Ω	0,0012
Tensão de isolamento	KV _{RMS}	2,1
Tensão de alimentação DC	V	4,5 a 5,5
Sensibilidade	mV/A	185

4. OPERAÇÃO

O movimento da estrutura móvel é realizado por intermédio dos motores de passo que, por sua vez, são controlados pelo Arduino em função dos ângulos calculados na rotina do tempo.

O programa calcula a posição aparente do Sol, a partir das equações descritas anteriormente, e gera os sinais de controle para os motores de passo. Estes sinais são transformados pelos *drivers* nos pulsos que acionam os motores, determinando parâmetros tais como as velocidade e direção do movimento, assim como os ângulos de posicionamento. Este último é o responsável pela colocação do painel fotovoltaico na posição desejada.

A posição inicial especificada para o nascer do dia é definida com $\omega = 0$ da Eq. (1), para o ângulo horário, e $\delta = 0$ da Eq.(7), para o ângulo de declinação. A partir destes, o sistema é posicionado centralizado em relação ao movimento horário e com uma inclinação de 23° para o Norte, mesma inclinação do painel fixo.

Um dos motores é responsável pelo movimento horário do motor, de Leste a Oeste, e é atualizado em intervalos de tempo pré-determinados. Nos resultados apresentados aqui, esse intervalo foi de 20 minutos. O segundo motor é acionado para mudar a inclinação do painel, e sua atualização acontece uma vez por dia. Além destes movimentos gerados por cálculos da posição aparente do Sol, deslocamentos mais sutis ocorrem em razão da incidência de luz, de acordo com os dados obtidos através dos LDRs, os quais são conectados às portas analógicas do Arduino. A comparação entre a leitura dos sensores é realizada aos pares, e os ajustes são realizados tal como segue: Primeiro compara-se as leituras dos sensores Norte-Sul. Se houver diferença de tensão maior do que VAR_{LDR} , o motor de ajuste do ângulo de declinação é acionado para que o painel seja reposicionado. Em seguida, a leitura dos sensores Leste-Oeste são comparadas. Se houver diferença maior do que VAR_{LDR} , o ângulo horário é ajustado. O valor de $VAR_{LDR} = 0,2$ V foi especificado através de experimentação feita em laboratório.

A Fig. 5 resume a rotina implementada para o controle do sistema.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A instalação do sistema foi realizada em campo, na cidade do Rio de Janeiro, nas coordenadas geográficas 22,902020 Sul, 43,286219° Oeste. Ambos os módulos fotovoltaicos (fixo e móvel), foram orientados em direção à linha do equador em uma área plana e livre da interferência de sombras, e posicionados de tal maneira a não influenciarem um na na incidência de luz do outro.

Testes iniciais foram feitos com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema em campo, corrigindo eventuais falhas e ajustando parâmetros definidos anteriormente em laboratório. Em seguida, procedeu-se com testes de desempenho para validação do protótipo construído, não apenas no que diz respeito à operação adequada ao longo de um dia, mas especialmente para comparar a sua eficiência com aquela do painel fixo e a painéis rastreadores solares de diferentes tecnologias apresentados na literatura.

A Fig. 6 apresenta a variação da potência gerada pelos painéis fixo e móvel ao longo de um período de 8 horas.

A potência média alcançada pelo painel móvel foi de 11,05 watts que, comparada à potência média observada para o painel fixo de 7,44 watts, indica uma melhoria de 48,5%. O sistema fixo não é tão produtivo quanto o móvel durante todo o dia, especialmente nas horas da manhã e do pôr-do-sol. Isto ocorre porque nesses instantes os ângulos horários estão mais distantes de 0° que se dá por volta das 12 (doze) horas.

Através do gráfico é possível observar pontos de potência reduzida com relação ao esperado, como por exemplo em torno de 10 horas e quinze minutos da manhã. Essa redução de potência é consequência do aumento da nebulosidade nesses intervalos de tempo, situação comprovada visualmente ao longo do experimento. A influência (negativa) que a nebulosidade tem na geração de potência é significativa, já tendo sido discutida em alguns trabalhos na literatura (Alves 2008). Dentre as propostas para reduzir o impacto das nuvens na geração, ressalta-se a utilização de sensores de luz para ajuste de orientação do painel de acordo com as condições ambientais correntes. Neste trabalho, sensores do tipo LDR foram instalados no protótipo com esta finalidade.

Como referência para validação dos resultados obtidos nos testes de pequena duração aqui descritos, como ponto de partida para o aprimoramento do protótipo e a realização de testes de longa duração, os resultados obtidos foram comparados com trabalhos semelhantes encontrados na literatura. Ressalta-se, aqui, três trabalhos em particular:

- **Alves, 2008** (Alves 2008): Descreve o desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar sem sensores, baseado exclusivamente na determinação da posição do Sol, controlado por um controlador lógico programável;
- **Chun-Sheng, 2008** (Chun-Sheng, et al. 2008): Neste trabalho é descrita a implementação de diferentes formas de rastreamento solar para um sistema gerador maior do que o considerado neste trabalho, com potência de 165W por painel;
- **Mamun, 2014** (Mamun e Samrat 2014): Apresenta um sistema de rastreamento solar baseado exclusivamente nas medições dos sensores.

A Tab. 7 apresenta a comparação entre a melhoria no aproveitamento de potência do sistema descrito neste trabalho e as referências citadas acima.

Tabela 7: Melhoria de potência gerada por diferentes trabalhos encontrados na literatura.

	Melhoria da potência gerada
Este trabalho	48,5%
Alves, 2008 (Alves 2008)	53,1%
Chun-Sheng, 2008 (Chun-Sheng, et al. 2008)	47,3%
Mamun, 2014 (Mamun e Samrat 2014)	32,3%

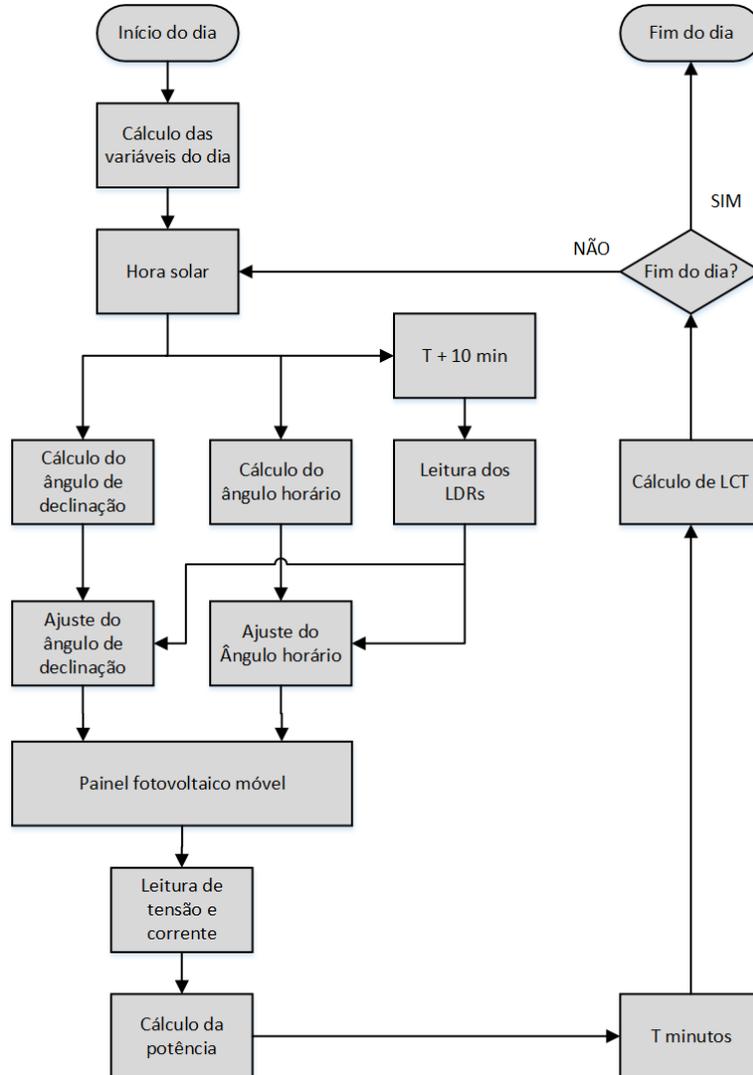


Figura 5: Fluxograma do código implementado no arduino para o controle do sistema.

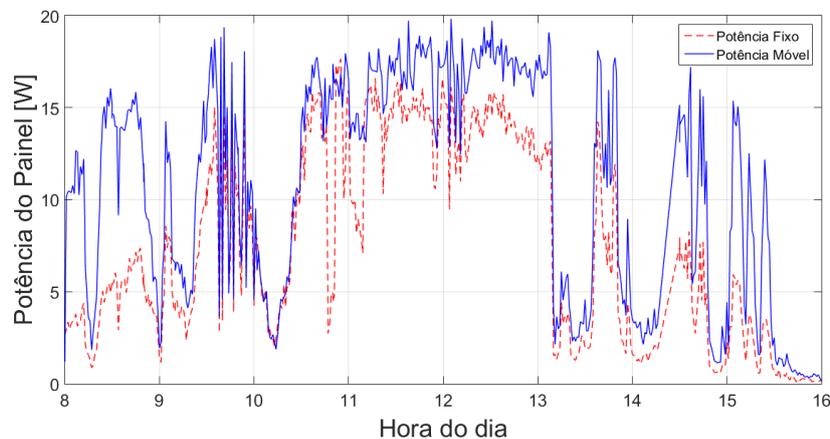


Figura 6: Variação da Potência em Função do Tempo.

Nota-se que o protótipo aqui apresentado e a estratégia de controle empregada alcança desempenho semelhante às referências (Alves 2008) e (Chun-Sheng, et al. 2008) e substancialmente melhor do que um painel posicionado exclusivamente através da leitura de sensores. Ademais, se comparado ao trabalho citado com melhor desempenho, o sistema aqui descrito é mais simples em complexidade e menos custoso, sendo baseado em uma eletrônica embarcada com essas características se comparada a um controlador lógico programável. Cabe ressaltar que os testes aqui descritos foram de curta duração e, portanto, devem ser realizados por mais tempo para permitir uma avaliação mais efetiva de desempenho, entretanto os resultados alcançados comprovam a exequibilidade e a utilidade da arquitetura proposta.

6. CONCLUSÃO

A geração fotovoltaica de energia elétrica é uma das principais alternativas sustentáveis para a matriz energética mundial. No contexto brasileiro, trata-se de um mercado em expansão, com aplicações em macro e microgeração. Dentre os desafios a serem superados e a busca por melhorias de desempenho, o rastreamento solar é uma técnica vantajosa, capaz de aumentar substancialmente (em torno de 50%), a potência entregue por um painel solar. Não por acaso, há diversos trabalhos na literatura que exploram o tema, apresentando propostas diferentes para realizar o posicionamento do painel solar ao longo do dia. Há propostas para movimentação em um eixo apenas, em dois eixos, em poucos pontos de operação ao longo do dia, ou e muitos, proposta de usos de sensores de luminância de maneira exclusiva para definição da orientação ou ainda os que não utilizam sensores algum. Mais do que isso, encontra-se investigações de medições em diferentes locais do planeta, na tentativa de caracterizar parâmetros de configuração e melhoria. Nesse contexto, este trabalho apresentou os conceitos fundamentais de sistemas de rastreamento solar, seguidos da especificação e da prototipagem de um sistema de microgeração fotovoltaico com essa capacidade. O sistema é baseado em eletrônica embarcada de baixo custo, e possui a capacidade de orientar-se com relação ao Sol a partir do cálculo da posição relativa do astro com relação à Terra e também de ajustar-se automaticamente às condições ambientais locais através da aquisição de dados de sensores de luminância. O protótipo foi testado em campo e os resultados foram comparados à um painel semelhante fixo e também a trabalhos encontrados na literatura. A melhoria de eficiência, medida com relação ao painel fixo, atingiu 48,5% e foi compatível com sistemas descritos na literatura. Os resultados alcançados validam a operação do protótipo e o qualificam para testes e desenvolvimentos mais amplos.

7. REFERÊNCIAS

- Alves, A. F. “Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos.” Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 2008.
- Arduino. s.d. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>.
- Chun-Sheng, W, W Yi-Bo, L Si-yang, P Yan-chang, e X Hong-Hua. “Study on Automatic Sun-tracking Technology in PV Generation.” *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 4* (2008): 2586-2591.
- Enjavi-Arsanjani, M, K Hirbodi, e M Yaghoubia. “Solar energy potential and performance assessment of CSP plants in different areas of Iran.” *Energy Procedia*, 2015.
- Jesperon, J, e J Fitz-Randolph. “From Sundials to Atomic Clocks: Understanding Time and Frequency.” *Dover Publications*, 1977.
- Kassem, A, e M Hamad. “A microcontroller-based multi-function solar tracking system.” *Proceedings of the IEEE international systems conference*, 2011.
- Koussa, M, A Cheknane, S Hadji, M Haddadi, e S Nouredine. “Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions.” *Applied Energy*, 2011.
- Koyuncu, B, e K Balasubramanian. “A microprocessor controlled automatic suntracker.” *IEEE Transactions on consumable electronics*, 1991.
- Mamun, N, e N. H Samrat. “Multi-directional Solar Tracker Using Low Cost Photo Sensor Matrix.” *University of Malaya*, 2014.
- Mathew, J. “How to Make Cost Effective Solar Panel without Affecting Efficiency?” *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015.
- MME - Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia. “Energia Solar no Brasil e no Mundo 2015.” 2016.
- . “Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.” 2015.
- Moreira, B. *Chegou a Vez da Energia Solar*. s.d. <http://www.osetoreletrico.com.br> (acesso em 07 de Novembro de 2016).
- Oliveira, A. L. “Modelo Híbrido de Aprendizagem Utilizando a Plataforma do Arduino Aplicado ao Ensino Tecnológico de Informática.” *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília - UnB*, 2015: 124.
- Passos, F. *Seguidor Solar - Parte 1: Vantagens e Desvantagens*. s.d. <https://microgeracaofv.wordpress.com> (acesso em 3 de Março de 2016).

- Sefa, I, D Mehmet, e I Colak. “Application of one-axis sun tracking system.” *Energy Conversion Magazine*, 2009.
- Skour, S, A. B. H. Ali, S Bouadila, M. B Salah, e S. B Nasrallah. “Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement.” *Renewable Sustainable Energy Review*, 2016.
- Stine, W. B, e M Geyer. *Power From The Sun*. 2001.
- Tolmasquim, M. T. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.
- Woolf, H. M. “On the Computation of Solar Evaluation Angles and the Determination of Sunrise and Sunset Times.” *NASA Report TM-X-164*, 1968.

SPECIFICATION AND PROTOTYPING OF A PHOTOVOLTAIC MICROGENERATION SYSTEM WITH SOLAR TRACKING

Abstract. *The generation of electricity from solar energy is a viable proposal to solve part of the world's energy problems. Among the main factors influencing the performance of photovoltaic panels in power generation is their orientation with respect to the Sun. If the system is consistently and exactly oriented towards the star, the increase in efficiency is significant. To this end, solar trackers steer the panel constantly towards the Sun, and compensate for changes in the daily altitude angle, the seasonal latitude deviation, and the star's azimuth angle. In order to accomplish proper performance, there must be an appropriate compromise between the energy gain of the automatic positioning and the energy expenditure to move the panel, as well as the wear of the moving parts and the necessary maintenance. The system must operate steadily and without oscillations, and the design focus should be the configuration of the tracking angles and the optimization of the moving parts, while a suitable configuration of the control system tends to increase its efficiency. In this context, this paper presents the fundamental concepts of solar tracking, as well as the specification and prototyping of an energy microgeneration system with this capacity. The validation of the performance of the prototype is performed based on the comparison of the measurements made with a fixed solar panel of similar specifications, and with other works found on the literature. The results prove the feasibility and usefulness of the proposed system.*

Keywords: *Solar tracker, Photovoltaic generation, Prototyping.*