

PROTÓTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO COM SEGUIDOR SOLAR PARA APLICAÇÃO DIDÁTICA

André dos Santos Renosto – andre.renosto@gmail.com

Diego Neves da Silva – diego_n.s@hotmail.com

Felipe Alves Cardenete – felipecardenete@hotmail.com

Gustavo Matias Cotta – gmcotta34@gmail.com

Mauricio Yuji Murakami – mauricioymurakami@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Engenharia de Controle e Automação

Patrícia Abdala Raimo – patricia_ar@hotmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Departamento de Elétrica

Resumo. Este trabalho apresenta a proposta de um protótipo de geração fotovoltaica com seguidor solar, sua montagem e resultados, para ser utilizado em aplicações didáticas. Utiliza-se um painel fotovoltaico monocristalino de 10 Wp, um controlador de carga, uma bateria de 12 V e um seguidor solar de dois eixos. O algoritmo de seguimento foi desenvolvido utilizando controle Fuzzy em LabVIEW e a interface entre o modelo e o controle supervisionado em software é realizada através da plataforma Arduino Mega 2560, possibilitando três configurações: fixo, seguimento polar e polar-equatorial. Através de sensores, o protótipo monitora as seguintes informações para controle e registro: tensão, corrente, temperatura do painel solar, angulação do suporte e diferenças de tensão no sensor fotossensível, ocasionadas pela incidência luminosa no rastreador solar. O protótipo se mostrou estável e confiável, o qual permitirá o seu uso na transferência de conhecimentos dos sistemas fotovoltaicos aos profissionais egressos do Instituto Federal de São Paulo.

Palavras-chave: Seguidor Solar, Controle em LabVIEW, Controle Fuzzy

1. INTRODUÇÃO

Devido à redução dos custos dos painéis fotovoltaicos e ao desenvolvimento tecnológico dos sistemas fotovoltaicos, a energia solar fotovoltaica vem crescendo em participação na matriz energética brasileira. O balanço energético nacional aponta um aproveitamento da fonte solar fotovoltaica com uma parcela de 0,01%, taxa essa que teve um crescimento de 45% entre 2015 e 2016 (MME - EPE, 2017), e que gera uma expectativa de crescimento ainda maior. De acordo com a perspectiva anunciada no plano decenal de energia para 2024, é esperada a expansão da matriz fotovoltaica em 4 GW (MME - PDE, 2014).

Nesse contexto, entre 2013 e 2014 o Ministério de Minas e Energia promoveu leilões de energia de reserva (LER, 2014-2015), para a contratação da produção de energia solar fotovoltaica. Estas usinas somam a potência instalada de aproximadamente 3 GW. Como resultado destes leilões, verifica-se que do total de 94 empreendimentos de usinas solares fotovoltaicas vencedores, 61 possuem rastreamento por seguidor solar, sendo 24 no leilão de 2014 (EPE, 2014), 27 no 1º leilão de 2015 (EPE, 2015) e 10 no 2º leilão de 2015 (EPE, 2016). Observa-se então um grande interesse na implantação de usinas solares fotovoltaicas com seguimento solar.

Esse tipo de usina solar se difere do modelo convencional por utilizar um dispositivo eletromecânico chamado seguidor solar, que movimenta e orienta a superfície dos painéis de maneira que a incidência da radiação solar seja perpendicular aos mesmos, maximizando assim a incidência de radiação solar na superfície do painel e por consequência aumentando a produção de energia elétrica. Pesquisas realizadas mostram que o uso de um seguidor solar aumenta a energia gerada de um sistema fotovoltaico de 15 a 35% (APPLEYARD, 2009), desconsiderando a presença dos motores e do sistema de medição que causam um aumento no consumo de energia.

Além disso, com o cenário de crescimento em número de instalações de sistemas fotovoltaicos, em plantas de grande porte e na geração distribuída, surge uma maior necessidade por profissionais qualificados. A Rede Federal, pelos institutos e centros de educação, ciência e tecnologia, deve incluir os conhecimentos dos sistemas fotovoltaicos em seus cursos da área elétrica. Para auxiliar nesse processo de ensino-aprendizagem, foi desenvolvido um protótipo de sistema fotovoltaico com seguidor solar de dois eixos (atualmente disponível no IFSP), conjuntamente com um sistema de monitoramento das grandezas elétricas e solarimétricas necessárias para a determinação de desempenho do sistema.

O protótipo, inicialmente, é formado por um sistema isolado de geração fotovoltaica, sistema de monitoramento e o seguidor solar propriamente dito. O sistema isolado é composto pelo painel solar de 10 W, por um controlador de carga e uma bateria de 12 V. Já o sistema de monitoramento é composto por todos os sensores envolvidos na coleta de dados, tais como os sensores de tensão, corrente, temperatura, acelerômetro e giroscópio. Por fim, o seguidor solar é composto pela estrutura, que suporta o painel e que permite sua movimentação nos dois eixos, e pelo rastreador solar (foto-resistores). A confecção e funcionamento do protótipo serão abordados nos próximos tópicos.

2. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

2.1 Arquitetura da Parte Mecânica

O seguidor solar proposto possui a estratégia de rastreamento solar polar-equatorial. O eixo alinhado com o eixo Norte-Sul acompanhará o movimento diário do Sol, estando alinhado com a latitude do local, e o eixo alinhado com o eixo Leste-Oeste acompanhará a declinação solar. As principais vantagens são o rendimento energético, que pode ser até 75% superior se comparado a um sistema fixo (KHALIFA, 1998), e versatilidade, pois o seguidor obtido pode simular o movimento característico de outros tipos de seguidores. Com isso, pode-se fazer uma comparação do rendimento das estratégias disponíveis, comprovando didaticamente a superioridade da estratégia polar-equatorial.

O seguidor precisa ser leve, resistente e capaz de resistir às intempéries. Assim, o principal material para a confecção é o alumínio, pois é um material com uma relação peso/resistência alta, ou seja, leve e resistente, e possui também uma resistência à corrosão ambiental. Outro material utilizado é o aço galvanizado, devido à sua resistência à corrosão. Além disso, o seguidor precisa realizar um movimento lento e robusto para poder rastrear o Sol com precisão. Dessa forma, é necessário de um motor de baixa rotação e alto torque.

O mecanismo de movimento é baseado em um sistema de direção de veículos automotivos. Nesse caso, o motor está preso em uma barra fixa, cuja extremidade está presa à barra do painel. A parte girante do motor está presa em uma extremidade da barra motora, paralela à barra do painel, e a barra de ligação, paralela à barra fixa, conecta a barra do painel com a barra motora. À medida que a barra motora é rotacionada através do acionamento do motor, a barra do painel acompanha esse movimento, mantendo-se paralela àquela barra, tal como descrito na Fig. 1.

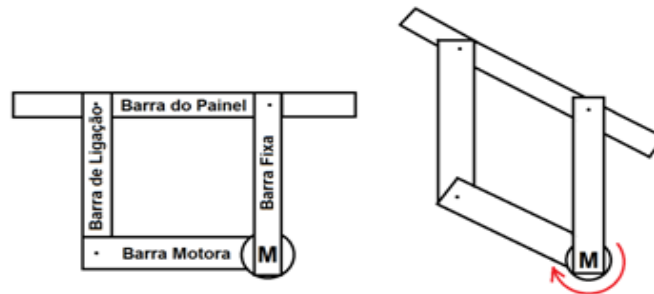


Figura 1 - Mecanismo de movimento do sistema do seguidor solar

O seguidor é dividido em quatro partes principais: parte inferior, responsável pelo movimento diário; parte superior, responsável pela declinação solar; placa, que conecta o módulo fotovoltaico e os sensores de posição e iluminação; e pedestal, que faz a conexão das partes citadas anteriormente com a base, além de acomodar o sistema de controle e armazenamento de energia.

A parte inferior possui angulação de -60° a 60° em relação ao horizonte e a parte superior possui angulação de -30° a 30° . Chaves fim-de curso são acionadas para garantir que o seguidor não ultrapasse os ângulos descritos acima; as chaves estão ligadas diretamente no circuito de controle e, quando acionadas, o seguidor para de se mover para o lado ativado. Para um módulo fotovoltaico de 36 cm de comprimento e 24 cm de largura, o seguidor tem 51,3 cm de comprimento, 41,5 cm de largura, 40 cm de altura e 5 kg.

O seguidor completo pode ser encontrado na Fig. 2, sendo o sensor de iluminação identificado como 1, IMU como 2, os motores como 3 e 4 e a bateria como 5.

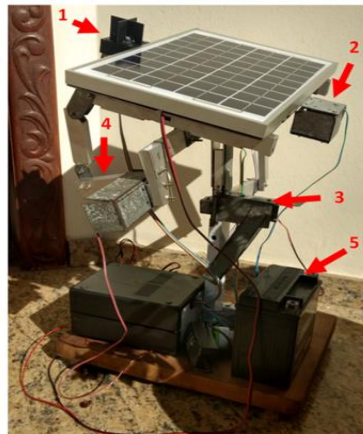


Figura 2 - Seguidor solar completo

2.2 Rastreador solar

Ao se projetar um rastreador solar, é importante entender e considerar os conceitos de geometria solar. Quando a esta é abordada, a referência do observador está sujeita à dinâmica dos corpos celestes.

O planeta Terra passa a se localizar no centro de uma esfera celeste, e o observador consegue ver apenas uma metade dessa esfera, já que o plano em que ele se encontra, chamado de horizonte, limita a visualização da outra metade. Quando se traça uma linha perpendicular ao horizonte, tendo como origem o observador, em direção ao céu, o ponto mais alto é chamado de zênite. De maneira oposta, o ponto mais baixo da esfera é chamado de nadir. Os polos Norte e Sul Celestes são pontos da esfera celeste que são interseccionados pelo eixo de rotação da Terra. Para o observador, esses polos estão fixos no céu, e a altura na qual ela se encontra coincide com a latitude do observador. Já o Equador Celeste, que é perpendicular ao eixo dos polos celestes, possui uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação ao Equador terrestre. Para o observador, o movimento aparente do Sol vai do ponto cardinal Leste para o Oeste (GUTIÉRREZ, CHAVÉZ, 2012).

A Fig. 3 mostra geometricamente os principais ângulos solares, que são o ângulo zenital (θ_z), ângulo de azimute (γ) e ângulo de altitude solar (α) além de mostrar como seriam esses ângulos em uma superfície inclinada (β): incidência solar (θ_s) e ângulo de azimute solar (γ_s) (OLIVEIRA, 2008):

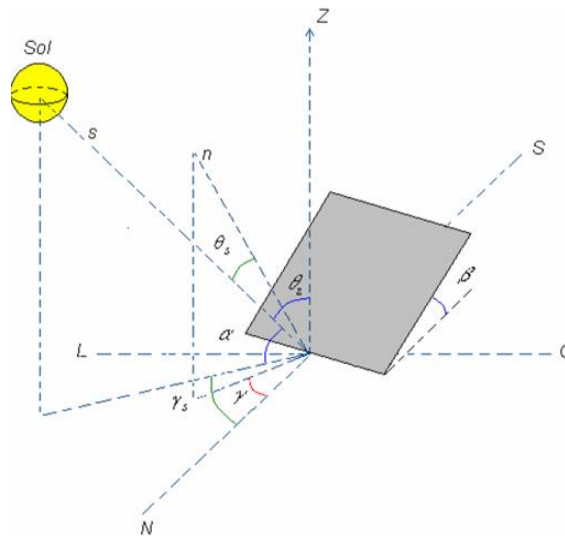


Figura 3 - Representação do ângulo zenital, incidência solar e inclinação da superfície (OLIVEIRA, 2008).

Para o rastreamento solar foi projetado um sistema baseado no princípio de balanceamento de sombra, este utiliza da comparação entre os valores de tensão de dois LDR (*Light Dependent Resistor*, ou resistor dependente da luz) que, de acordo com a posição do sol, ficam totalmente ou parcialmente iluminados/sombreados graças à presença do elemento de sombra.

O LDR é um resistor o qual a sua resistência elétrica varia de acordo com a intensidade de luz que incide sobre ele. São feitos a partir de um pedaço de material semicondutor exposto, geralmente uma lâmina de Sulfeto de Cádmio, envolto em uma cápsula plástica, que quando exposto a luz melhora sua condutividade e diminui a sua resistência.

Na confecção do sensor foram utilizados 4 fotoresistores na configuração de divisores de tensão; onde V_s é a tensão de saída a ser medida e é obtida matematicamente a partir da Eq. (1).

$$V_s = V_e * \left(\frac{R_{ldr}}{R_1 + R_{ldr}} \right) \quad (1)$$

Sendo que:

V_e : tensão de entrada.

V_s : tensão de saída.

R_{ldr} : resistência ôhmica do LDR que varia em função da luz recebida.

R_1 : resistência fixa.

Pela comparação entre dois LDRs é possível rastrear o posicionamento do Sol para um dos eixos de movimentação do suporte; assim, para o rastreamento de dois eixos, o rastreador foi adequado para trabalhar com dois pares de LDRs conforme a Fig. 4. A utilização de dois pares de LDR melhora a confiabilidade do rastreamento solar, ao utilizar a média de tensão entre os pares de LDRs.

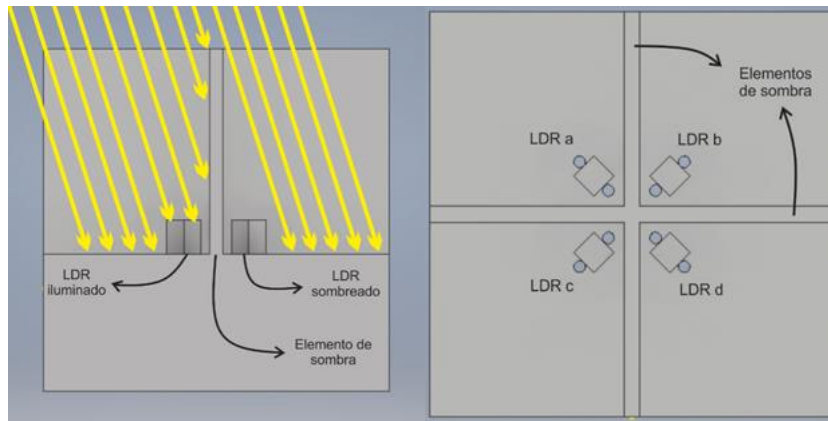


Figura 4 – Funcionamento do elemento de sombra e vista superior do rastreador

Os LDRs foram fixados no rastreador solar, no qual cada LDR foi posto na configuração de divisor de tensão com um resistor de 1k ohm. O rastreador pronto está ilustrado na Fig. 5.



Figura 5 - Rastreador solar

2.3 Unidade de medição inercial

A unidade de medição inercial (IMU) é um sensor composto por um módulo acelerômetro e giroscópio (e no caso do componente utilizado neste trabalho, também constituído por um termômetro). Ela como função principal, a medição de valores de velocidade e aceleração angular; porém, nesse caso, a grandeza de importância é a posição angular, calculada a partir dos valores aferidos. O sensor GY-521, que utiliza como chip principal o MPU-6050, é alimentado com 5 Vdc, e a partir daí realiza aferições constantemente e as salva em 7 endereços de memória (7 medidas de 16 bits). Esses valores são encaminhados ao programa supervisor através da interface I²C (InvenSense, 2013).

Cálculo dos Ângulos e Temperatura. Uma das formas de calcular os ângulos da IMU é coletar os valores brutos do chip através do protocolo I²C e fazer o tratamento desses valores através de equações e filtros. Os valores brutos obtidos pelo acelerômetro são os vetores de aceleração do chip (A_x , A_y e A_z) de acordo com o vetor gravidade ($1g = 9,8 \text{ m/s}^2$), enquanto os valores brutos obtidos pelo giroscópio se referem à velocidade angular do chip (V_x , V_y e V_z) em cada eixo (InvenSense, 2013).

Segundo Bhuyan e Mallick (2014), para obter os ângulos do chip através do acelerômetro, em graus, utilizam-se as seguintes equações, sendo Eq. (2) a equação do ângulo do acelerômetro em X (θ), e Eq. (3) o ângulo do acelerômetro em Y (ψ):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (2)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad (3)$$

Entretanto, o acelerômetro é muito sensível a perturbações; com isso, os ângulos calculados através do mesmo tornam-se imprecisos quando há uma rápida variação nos vetores de aceleração. Por outro lado, o giroscópio pode ter valores precisos nesses casos já que não sofre interferência com distúrbios; porém, com o passar do tempo, os valores do giroscópio começam a sofrer um desvio devido à integração pelo tempo, fazendo com que o ângulo não retorne a 0 quando a IMU volta a sua posição original, o que é chamado de drift. Ou seja, o acelerômetro apresenta valores confiáveis em longo prazo, enquanto o giroscópio apresenta valores confiáveis em curto prazo (Alasiry et al, 2016).

A solução para esse problema é implementar um filtro complementar, onde utiliza as vantagens do acelerômetro e do giroscópio para determinar um ângulo mais preciso. Ele combina os valores de curto prazo do giroscópio, pois não sofre interferências externas, e os valores de longo prazo do acelerômetro, pois não acontece o drift. O cálculo para esse filtro é realizado através da Eq. (4) (Alasiry et al, 2016).

$$\hat{\text{Angulo Filtrado}} = \alpha \cdot \hat{\text{Angulo do Giroscópio}} + (1 - \alpha) \cdot \hat{\text{Angulo do Acelerômetro}} \quad (4)$$

Onde α é uma constante em função da taxa de amostragem e uma constante de tempo, que geralmente é de 1 segundo, e o ângulo do giroscópio é o valor medido V_x e V_y dividido por 131 (Bhuyan e Mallick, 2014).

Por fim, o cálculo da temperatura se dá pela divisão do valor bruto pela sensibilidade do chip e somar por um offset, valores provenientes da documentação do fabricante do MPU6050 (InvenSense, 2013), representados na Eq. (5).

$$\text{Temperatura} = \frac{\text{Valor bruto}}{340} + 36,53 \quad (5)$$

3. MONITORAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 Circuito elétrico

O circuito elétrico tem por finalidade conectar o sistema de supervisão e controle aos atuadores e sensores presentes no sistema. É composto pelo circuito de acionamento dos motores, pela interface com a IMU, pela interface de leitura dos LDRs, pela interface de medição de tensão e corrente, e pela interface de potência.

Circuito de acionamento dos motores. Para a movimentação do suporte foram utilizados dois motores de 12 V (alimentados com 9 V) com 3 rpm, 15 kgf.cm e 1,85 W em plena carga, cujo acionamento consiste em chavear 2 MOSFETs simultaneamente (um IRF640 e um IRF9640), tal como em uma ponte H, de forma a determinar o sentido de rotação.

Medições de tensão e corrente. O dimensionamento dos sensores foi determinado pela potência do módulo fotovoltaico: o voltímetro cobre os 17 V em circuito aberto que o painel proporciona, e os 0,6 A de corrente nominal. As faixas de leitura de tensão abrangem os valores entre 0 a 20 V (com resolução de 0,00488 V). Já para as medições de corrente, utilizou-se um módulo ACS712 que afere valores entre -5 A e 5 A (com resolução de 9,766 mA), transcrevendo esse valor em uma faixa de leitura de 0 a 5 V.

Interface de potência. A interface de potência é responsável pela conexão entre o painel, o controlador de carga, a bateria e a carga. O elemento central dessa interface é o controlador de carga CMP12 (PWM), que tem como função principal a proteção contra surtos, tanto de sobretensão quanto de subtensão, que podem danificar a bateria. Também é o componente que interliga o módulo fotovoltaico com a bateria e a carga do sistema (10 W).

3.2 Interface de controle e supervisão

Sistema supervisão é o nome dado à interface gráfica que fornece ao usuário uma visão geral da planta e das variáveis envolvidas no processo; neste trabalho, o software que cumpre esse papel é o LABVIEW, da National Instruments (NI), que é voltado para aplicações focadas em teste, medição e controle (NI, 2017). Foi desenvolvida uma interface virtual (será chamada de VI daqui em diante) que coleta os dados obtidos pelo arduíno através de uma porta serial, trata esses dados, efetua o controle de setpoint de rastreamento da posição solar e de posição do suporte e salva esses valores em um arquivo de extensão txt.

Nesse projeto, os dados dos sensores são coletados por intermédio de um arduíno Mega 2560, que serve como interface entre os elementos sensores, atuadores e o sistema supervisão. O código utilizado no arduíno é o código base da biblioteca do arduíno no LABVIEW, chamada de LABVIEW Interface for Arduino - LIFA, que possui 3 rotinas básicas: sincronizar com o programa, esperar por comandos e amostrar continuamente. As demais funções requisitadas do sistema foram programadas no LABVIEW, em um código de alto nível se comparado com a linguagem que é utilizada tipicamente no arduíno. A interface gráfica do supervisão está ilustrada na Fig. 6:

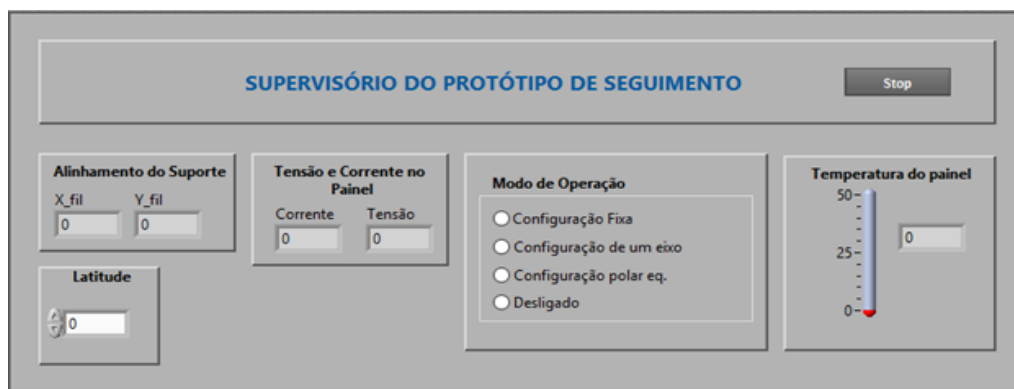


Figura 6 - Interface do software de supervisão

O supervisório possibilita 3 modos de operação do painel (fixo, seguimento em um eixo e seguimento em 2 eixos) e um estado desligado, permite uma rápida visualização dos valores de tensão e corrente no painel, valor de temperatura e uma entrada para o valor de latitude (modo de operação fixa).

Programação. A programação do supervisório consiste em diversas sub-rotinas realizadas de maneira serial que se iniciam pelo barramento de recurso do arduíno. A execução das rotinas segue a ordem: inicialização do recurso do arduíno, inicialização da comunicação com a IMU, leitura de posição e temperatura, leitura de tensão e corrente, leitura de tensão nos LDRs, controle de seguimento (Fuzzy), controle da posição do suporte, escrita na saída dos PWMs e escrita em arquivo. Os modos de operação do suporte alteram o fluxo de dados entre os blocos, mas a estrutura básica é a mesma.

Controle fuzzy de seguimento. Dá-se o nome de lógica Fuzzy (ou nebulosa) ao método de inteligência artificial que traduz numericamente uma informação imprecisa (Tanscheit, 2004). A maneira que essa lógica é aplicada em algum processo é conhecida como controle Fuzzy.

O controle Fuzzy é realizado em três estágios: entrada, processamento e saída. A entrada consiste no mapeamento dos sensores; o processamento é etapa na qual as pertinências são calculadas (denomina-se pertinências as informações tidas como imprecisas, descritas entre 0 a 1) e na qual se selecionam regras que o sistema irá obedecer, e a saída é onde são convertidos os resultados da etapa de processamento para determinar o valor da saída (UEM, 2017).

O algoritmo de controle fuzzy utilizado nesse programa consiste em, através de uma diferença de bits, determinar as pertinências referentes a um conjunto de 7 regras pré-definidas que apontam para um diferente valor angular de saída: -15° , -6° , -3° , 0° , 3° , 6° e 15° . Ele é preferível ao controle PID na obtenção de um valor de angulação solar devido à natureza não linear da variável aferida.

Os sensores LDRs têm seus valores de tensão coletados através de uma porta analógica, e são comparados dois a dois: seu valor é somado com o respectivo LDR do par, e subtraído da soma do par análogo. Dessa forma, é possível determinar a posição do sol em um dado momento. Para as variáveis de entrada diff1 e diff2 (ambas as diferenças de tensão obtidas na comparação das medidas dos pares de LDRs), as variáveis linguísticas definidas foram:

- Correção grande negativa: corresponde às variações inferiores à $-0,75$ V, tendo pertinência não nula até $-0,2$ V;
- Correção média negativa: corresponde às variações próximas à $-0,2$ V, tendo pertinência não nula entre $-0,75$ V e $-0,1$ V;
- Correção pequena negativa: corresponde às variações próximas à $-0,1$ V, tendo pertinência não nula entre $-0,2$ V e 0 V;
- Correção nula: idealmente próximo de 0 V, tem pertinência não nula entre $-0,1$ V e $0,1$ V;
- Correção pequena positiva: correspondem às variações próximas a $0,1$ V, tendo pertinência não nula entre 0 V e $0,2$ V;
- Correção média positiva: correspondem às variações próximas a $0,2$ V, tendo pertinência não nula entre $0,1$ V e $0,75$ V;
- Correção grande positiva: correspondem às variações próximas a $0,75$ V, tendo pertinência não nula para valores maiores que $0,2$ V;

Para os demais valores é aplicada uma saturação.

A Fig. 7 ilustra os valores que o conjunto linguístico assume na entrada do sistema:

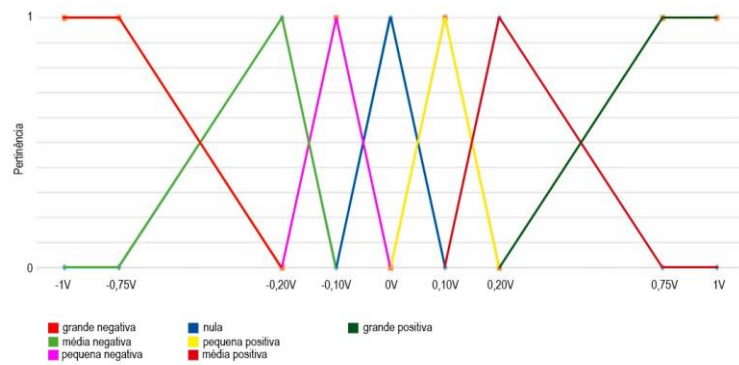


Figura 7 - Diagrama de pertinências da entrada

De maneira análoga, o conjunto linguístico adotado como saída assume um valor angular, descrito na Figura 8:

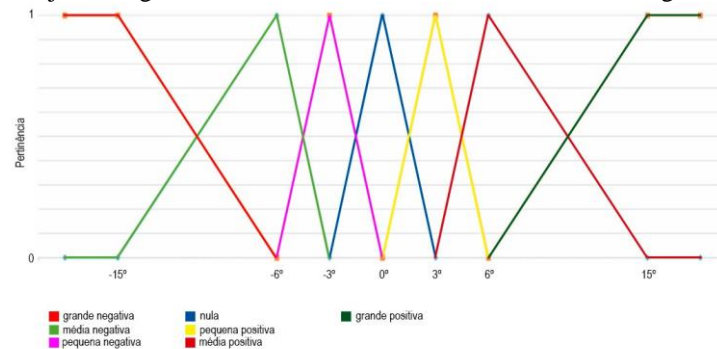


Figura 8 - Diagrama de pertinências da saída

O conjunto de regras adotado para a saída foi:

- Se a correção é grande e negativa, deve-se utilizar a curva com pico em -15° ;
- Se a correção é média e negativa, deve-se utilizar a curva com pico em -6° ;
- Se a correção é pequena e negativa, deve-se utilizar a curva com pico em -3° ;
- Se a correção é nula, deve-se utilizar a curva com pico em 0° ;
- Se a correção é pequena e positiva, deve-se utilizar a curva com pico em 3° ;
- Se a correção é média e positiva, deve-se utilizar a curva com pico em 6° ;
- Se a correção é grande e positiva, deve-se utilizar a curva com pico em 15° ;

Por fim, utiliza-se das pertinências calculadas da entrada para cálculo do valor angular referente a cada regra utilizando do método do centroide, ilustrada na Eq. (8):

$$X_0 = \frac{\sum M_n x_n}{\sum M_n} \quad (8)$$

Sendo M_n a área do trapézio determinada pela pertinência μ_n no gráfico de pertinência de saída e x_n o valor da saída para essa pertinência n .

Esse controle é feito para cada um dos eixos do suporte; logo, há duas malhas de controle fuzzy idênticas no programa, com estrutura igual, mas entradas e saídas diferentes. A entrada é constituída por uma array com as pertinências das 7 regras, e a saída é um valor de ângulo limitado entre -15° e 15° .

Controle de posição do suporte. A malha de controle de posição se refere ao algoritmo que possibilita, através de um setpoint dado de posição no programa, que o suporte assumira esses valores fisicamente. Para tanto, são necessários um setpoint, um controlador, uma planta, um sensor de posicionamento e um filtro para as leituras do sensor.

O suporte pode ser posicionado entre -60° e 60° na direção do seguimento diário e entre -30° e 30° no eixo de elevação; tal posição deriva de um movimento provido por dois motores, e é realimentado na malha de controle por um sensor IMU. O setpoint é provido pela diferença entre a posição atual do suporte e a variação desejada, determinada por um algoritmo de controle Fuzzy. O elemento restante a ser trabalhado é o controlador, que recebe um valor de erro na entrada e manipula esse valor de maneira a estabilizar o sistema no setpoint desejado.

O controlador escolhido foi o proporcional integrativo derivativo (PID) que tem como algoritmo base a Eq. (9):

$$E(k) = E(k-1) + (Kp + Ki + Kd).x(k-1) + (-Kp - 2Kd).x(k-1) + Kd.x(k-2) \quad (9)$$

Sendo: $E(k)$ o valor da saída do controlador no instante k ; $E(k-1)$ o valor da saída do controlador no instante $k-1$; $x(k)$ o erro de ângulo no instante k ; $x(k-1)$ o erro de ângulo no instante $k-1$; Kp o ganho proporcional; Ki o ganho integrativo; Kd o ganho derivativo.

Após uma sequência de testes o controlador foi sintonizado, tendo dois valores de ganho, um para erros maiores que 5° ($Kp=1, Ki=0$) e um para erros menores que 5° ($Kp=1, Ki=0,01$). Dessa forma, o sistema consegue se aproximar rapidamente quando está longe do valor correto e manter precisão para erros pequenos.

4. MONITORAMENTO E RESULTADOS

4.1 Procedimento para coleta de dados

O local de coleta escolhido foi no município de Guarulhos, onde a latitude é de $-23,44^\circ$. Foi considerada a variação sazonal e o suporte foi posicionado em azimute 0° . Os critérios de operação escolhidos foram: configuração fixa, com declinação posicionada na latitude local e seguimento diário posicionada em 0° ; seguimento de 1 eixo, com utilização do seguimento diário e com declinação posicionada na latitude local; e seguimento de 2 eixos, com utilização do seguimento diário e sazonal (de declinação).

Quanto à coleta de dados, gerou-se um arquivo de texto que funciona como banco de dados para as medições realizadas no dia. Os dados são salvos em blocos de 7 linhas, repetindo-se a cada ciclo de coleta, na seguinte ordem em: data, horário, temperatura, ângulo de declinação solar, ângulo de seguimento diário, tensão e corrente.

4.2 Dados coletados

Conforme os critérios de operação, a coleta foi realizada em 3 dias, sendo no dia 11/06/2017 a configuração fixa, no dia 31/05/2017 o seguimento de 1 eixo e no dia 02/06/2017 o seguimento de 2 eixos.

Na configuração fixa, representada na Fig. 9, a potência média produzida variou entre 0,5 e 2 W no início do dia, no meio do dia entre 1,5 e 2 W e no fim do dia entre 0 e 1 W. O ponto máximo da potência foi de 2 W, observado entre 13:00 e 13:15.

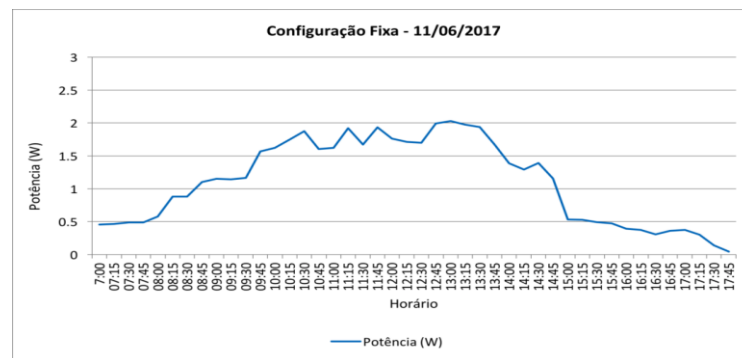


Figura 9 - Curva de potência medida para configuração fixa

No seguimento de 1 eixo (representado na Fig. 10) a curva em azul demonstra a que potência variou no início do dia entre 0,5 e 2 W, no meio do dia entre 1,5 e 3 W e no final do dia entre 0 e 1,5 W; já a curva em vermelho demonstra o seguimento diário como tendo variação entre de -50° a 60° . O ponto máximo de potência foi em torno de 2,8 W nos horários de 12:15, 13:45 e 14:00.

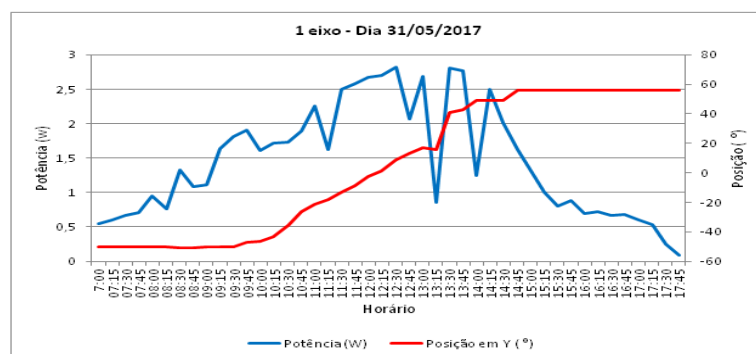


Figura 10 - Curva de potência e ângulo de seguimento diário para 1 eixo

No seguimento de 2 eixos (representado na Fig. 11), a curva em azul demonstra que a potência variou no início do dia entre 0 e 2 W, no meio do dia entre 1,5 e 2 W e no final do dia entre 0 e 1,5 W; já a curva em vermelho, do seguimento diário, possui variação em torno de -50° e 50° , e por fim a curva em verde, que se refere ao seguimento sazonal com variação em torno de -50° e -20° . O ponto máximo de potência foi em torno de 2,5 W no horário de 12:45.

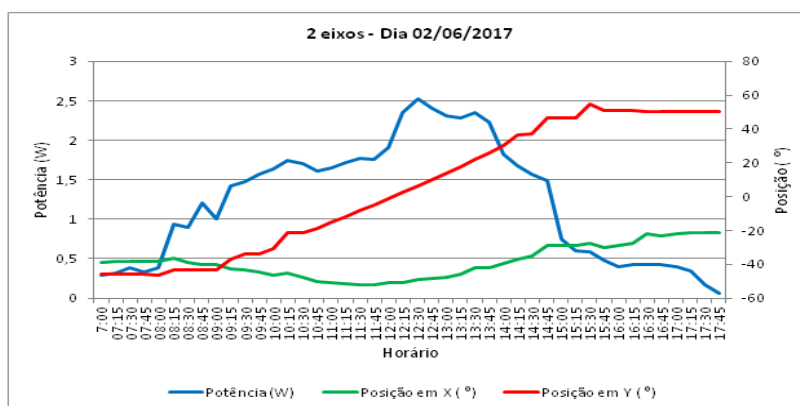


Figura 11 - Curva de potência e ângulos de seguimento diário e declinação

5. CONCLUSÃO

O protótipo de um sistema fotovoltaico com seguidor solar, cujo objetivo principal é de monitorar e controlar as variáveis envolvidas no seguimento solar, se mostrou satisfatório e confiável. O protótipo está à disposição do IFSP – Campus São Paulo e pode ser utilizado nas aulas práticas referentes à geração solar fotovoltaica. Pode ser aplicável aos cursos técnicos, de graduação e mestrado da área da elétrica do Campus, especialmente.

Este é um primeiro protótipo, o qual pode ser alterado, de acordo com a grade curricular dos cursos e o interesse de docentes e discentes. Outras informações podem vir a ser coletadas e processadas em futuros trabalhos, tais como dados solarimétricos, possibilitando uma maior transferência de conhecimentos dos sistemas fotovoltaicos.

Agradecimentos

Aos familiares de todos os integrantes do grupo, que nos proporcionaram tudo o possível e necessário para a realização desse projeto e não nos deixaram faltar incentivo.

Aos nossos professores que nos acompanharam durante esses anos de graduação e nos proporcionaram a oportunidade de aprendizado necessária para hoje estarmos realizando esse trabalho.

E por fim nosso sincero obrigado aos nossos amigos, companheiros de aulas e trabalhos, que fizeram parte da nossa formação e que vão continuar presentes em nossas vidas.

REFERÊNCIAS

- Alasiry, A. H., Ningrum, E. S., Utomo, E.B., Nugroho, L. N. B., 2016. Prototype Design of EDR (Event Data Recorder) on Motorcycle. Electronics Symposium (IES), 2016 International, Indonesia.
- Appleyard, D. Solar Trackers: Facing the Sun. 2009. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/06/solar-trackers-facing-the-sun>>. Acesso em: 15/05/2016.
- Bhuyan, A. L., Mallick, T. C., 2014. Gyro-Accelerometer based control of a robotic Arm, 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Bangladesh, pp. 409-413.
- Controle Fuzzy. UEM, Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/~ia/intelige/fuzzy/controle.htm>> Acesso em: 25/06/2016.
- EPE. Leilão de Energia de Reserva de 2014. Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p.13. 2014.
- EPE. Expansão da geração: 1º Leilão de energia de reserva de 2015. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p.13. 2014.

- EPE. Expansão da geração: 2º Leilão de energia de reserva de 2015. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p.17. 2014.
- Gutiérrez, D. H. G., Chávez, V. E. R. Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES. Universidad de El Salvador, 2012.
- Khalifa A. N., Al-Mutawalli S. S. Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators. Energy Conversion and Management. Vol. 39, pp. 1073-79, 1998.
- MPU-6050. InvenSense. Disponível em:
<<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em 22/05/2017.
- Ministério de Minas e Energia (MME), EPE (Empresa de Pesquisa Energética), BEN (Balanço energético Nacional), Relatório Síntese, ano base 2016. Rio de Janeiro, junho 2017. Disponível em:
<<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx?anoColeta=2017&anoFimColeta=2016>>
- Ministério de Minas e Energia (MME), Energia Elétrica no Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2013. Edição de 11/09/2014. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143612/06+-+Eletricidade+no+Plano+Decenal+de+Expans%C3%A3o+de+Energia+\(PDE+2023\)+\(PDF\)/832775ea-d478-41df-af75-2c880d90f22;jsessionid=D576137CD312EC9B6EF1D15F04F9BD14.srv154](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143612/06+-+Eletricidade+no+Plano+Decenal+de+Expans%C3%A3o+de+Energia+(PDE+2023)+(PDF)/832775ea-d478-41df-af75-2c880d90f22;jsessionid=D576137CD312EC9B6EF1D15F04F9BD14.srv154)>. Acesso em Nov 2016.
- Oliveira, Maurício Madeira. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Acesso em: 15/05/2016.
- Resultado 1º LER. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), 2014. Disponível em:
<https://ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_321418>. Acesso em 26/05/2017.
- Resultado 1º LER. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), 2015. Disponível em:
<https://ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_357767>. Acesso em 26/05/2017.
- Resultado 2º LER. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), 2015. Disponível em:
<https://ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_359558>. Acesso em 26/05/2017.
- Tanscheit, Ricardo. Sistemas Fuzzy. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, 2004. Acesso em: 25/06/2016.

PHOTOVOLTAIC SYSTEM PROTOTYPE WITH SOLAR TRACKER FOR DIDACTIC PURPOSES

Abstract. *This paper describes the elaboration, confection and testing of a photovoltaic generation prototype with solar tracker to be used in didactic applications. The project uses a 10 Wp monocrystalline photovoltaic panel, a load controller, a 12 V lead acid battery and a 2-axis solar tracker. The algorithm of solar tracking was developed using Fuzzy control on LabVIEW, and the interface between the model and the software supervisor control is done by the platform arduino Mega 2560, allowing three main configurations: fixed mount, polar and polar-equatorial. Through the usage of sensors, the prototype monitors the following information for record and control: panel voltage, current and temperature, mechanical tilt, declination and photoresistor voltage, occasioned by the solar incidence on the solar tracker. The prototype was shown to be stable and reliable, which allows its usage in the teaching of photovoltaic systems concepts to the professionals graduated from Instituto Federal de São Paulo.*

Keywords: *Solar Tracker, Control using LabVIEW, Fuzzy Control*