



MEDIDOR DE IRRADIÂNCIA FOTOVOLTAICO COM GEOLOCALIZAÇÃO SOLAR MONITORADA

J. V. A. Santos*¹, A. C. Souza², A. K. C. Reis¹

*¹UEMG – Universidade Estadual de Minas Gerais

²FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - O objetivo deste artigo é demonstrar o desenvolvimento de um medidor de irradiância, por meio de um microcontrolador para o processamento dos dados, tal medidor é composto por uma célula Fotovoltaica (FV) que capta a irradiância emitida pelo sol, cinco resistores foto sensíveis, que por intermédio da variação de sua resistência, estima a posição do sol, dois servos motores, os quais movem e estimam o ângulo da posição da célula FV. O medidor é composto também por uma unidade responsável em salvar os dados coletados no cartão de memória, conectado a um display, e por fim, um relógio de tempo real para catalogação dos dados salvos.

Palavras-Chave – Microcontrolador, medidor de irradiância, célula fotovoltaica.

PHOTOELECTRIC IRRADIANCE METER WITH MONITORED SOLAR GEOLOCALIZATION

Abstract – The objective of this article is to demonstrate the development of an irradiance meter, by means of a microcontroller for the data processing, such a meter is composed by a Photovoltaic (PV) cell that captures the irradiance emitted by the sun, five resistors photo sensitive, which by means of the variation of its resistance, estimates the position of the sun, two servo motors, which move and estimate the angle of the position of the PV cell. The meter is also composed of a unit responsible for saving the data collected on the memory card, connected to a display, and finally a real time clock for cataloging the saved data.

Keywords - Microcontroller, irradiance meter, photovoltaic cell.

I. INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar tanto no âmbito terrestre quanto fora da atmosfera é de fundamental importância para a compreensão das mudanças climáticas do planeta e otimização de sistemas de geração de energia [1].

A conversão da energia solar em energia elétrica alcançou nos últimos anos um estágio de desenvolvimento capaz de inseri-la na matriz energética mundial de modo bastante satisfatório [2], mas para a utilização desta forma de energia em larga escala é necessário um esforço para que haja domínio tecnológico e capacitação do parque industrial nacional na produção de dispositivos capazes de medir e monitorar a radiação solar. A ausência de uma indústria nacional destes dispositivos faz com que eles sejam importados com custos elevados. Com o objetivo de atender as necessidades de engenheiros, pesquisadores, meteorologistas e ambientalistas, foi desenvolvido neste trabalho um radiômetro para medida da radiação solar global de baixo custo e um dispositivo de aquisição de dados dedicado ao monitoramento da radiação solar [3].

Neste trabalho foi desenvolvido um sensor de radiação solar, para medidas de radiação solar fotossinteticamente ativa (radiação PAR), utilizando-se como elemento sensor células solares de silício policristalínico convencionais [4].

A resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico descreve a sua capacidade em converter a radiação incidente em corrente elétrica em função do comprimento de onda. Podemos definir a resposta espectral absoluta de um dispositivo (célula solar, fotodiodo ou radiômetro) como sendo a razão entre a densidade de corrente gerada pelo dispositivo na condição de curto circuito (A/cm^2) e a irradiância incidente (W/cm^2) em função do comprimento de onda [5].

O radiômetro é constituído basicamente por um célula FV e um circuito de condicionamento do sinal. O seu funcionamento baseia-se na medida da corrente de curto-circuito da célula. O sinal obtido é inversamente proporcional à radiação incidente recebida do hemisfério centrado na direção perpendicular ao eixo do sensor.

II. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTOS ELÉTRICOS DOS SENSORES

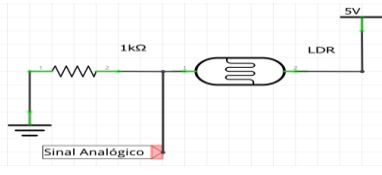
Nesta seção serão abordados os sensores utilizados para a construção do protótipo proposto, sendo eles, o LDR (*Light Dependent Resistor*) e o sensor de irradiância.

* jv1997as@gmail.com

A. Sensor de perpendicularidade e de reinício de curso

Utilizando resistores foto sensíveis, comumente conhecido por LDR, ligados em série com os resistores de *pull-down*, tem-se por características, um divisor de tensão, assim, nos terminais onde os resistores se encontram, pode-se coletar os respectivos sinais analógicos [6], conforme indica a Figura 1.

Fig. 1. Circuito elétrico dos sensores que compõem o sensor de perpendicularidade.



A sensibilidade do sinal depende diretamente da resistência ôhmica do resistor de *pull-down*, desta maneira, testes foram realizados sobre luz solar constante em resistores de 470Ω até 20kΩ para encontrar qual valor de resistência em que forneceria um sinal em que fosse possível funcionar em diferentes períodos do dia de maneira que estourasse o fundo de escala da leitura analógica, assim, o resistor selecionado para a aplicação no protótipo foi de 1 kΩ.

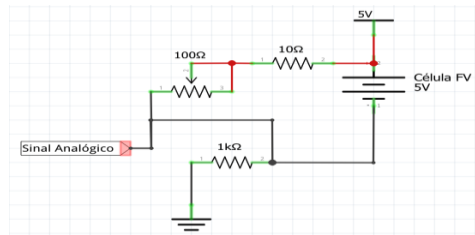
O sensor ao todo é constituído de quatro circuitos frontais e um posterior, propiciando cinco diferentes canais.

B. Sensor de irradiância

Para que seja possível traduzir a irradiância emitida pelo Sol em um sinal analógico, é necessário que uma célula fotovoltaica esteja curto-circuitada em série com um resistor de 10Ω, e o mesmo em série com um *trimpot*. A utilização deste componente, foi necessária devido a possibilidade de variar sua resistência com facilidade permitindo que ajustes sejam feitos sem maiores complicações.

Na saída negativa da célula FV, conforme ilustra a Figura 2 é conectado um resistor de *pull-down* de 1 kΩ e o terminal positivo do Arduino é conectado no terminal positivo da célula FV, desta forma, o sinal é extraído do terminal negativo da célula FV.

Fig. 2. Circuito elétrico do sensor de irradiância.



O sinal analógico, por sua vez, é inversamente proporcional a irradiância, pois quanto maior a irradiância coletada pela célula, maior será a diferença de potencial na resistência em série formada pelo resistor de 10Ω e pelo *trimpot*.

III. DISPOSITIVOS DIGITAIS UTILIZADOS

Os dispositivos digitais empregados neste protótipo serão descritos a seguir.

A. Servomotores

Possibilita que a célula FV acompanhe o movimento do Sol, além de, proporcionar a leitura do ângulo formado pela inclinação da célula FV nas direções horizontal e vertical.

B. Relógio de tempo real

Este dispositivo fornece com precisão o dia, mês, ano, hora, minutos e segundo, no instante que os sinais de posição e irradiância estão sendo processados.

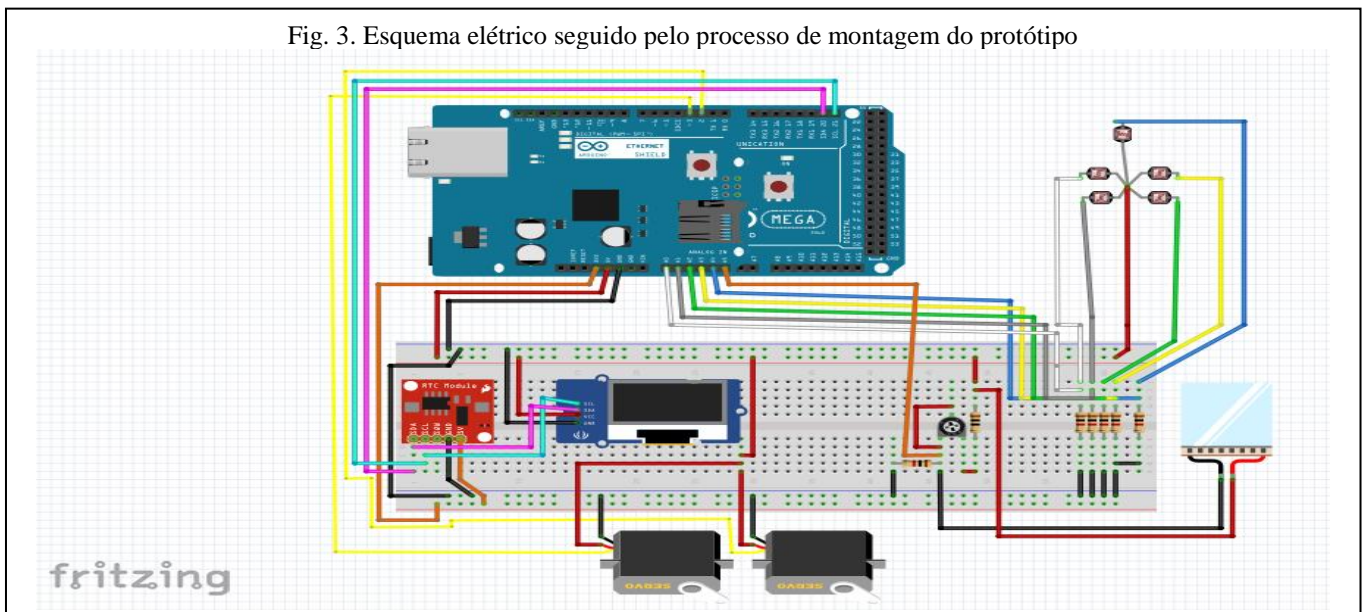
C. Shield Ethernet w5100

Após dos sinais de posição e irradiância serem codificados em dados, este dispositivo permite que os sinais interpretados sejam arquivados em um cartão de memória.

D. Display Oled

Disponibiliza em tempo real, a leitura dos dados que estão sendo coletados.

Fig. 3. Esquema elétrico seguido pelo processo de montagem do protótipo



IV. IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO PROPOSTO

Uma vez explicado os componentes que compõem o protótipo proposto, a Figura 3 indica todo o arranjo elétrico do equipamento.

A primeira etapa da montagem do medidor de irradiância, consiste na criação do sensor de perpendicularidade, vale destacar que sua montagem não foi efetuada no *proto-board*, contudo, em uma placa de circuito universal. Assim, os quatro *LDR's* frontais foram soldados em quatro pontos distintos e separados por pás seletoras de luz, conforme ilustra a Figura 4.

Fig. 4. Sensor de perpendicularidade.



Após concluído a etapa do sensor de perpendicularidade, segue-se a montagem da estrutura móvel de sustentação da célula FV, esta já foi adquirida pronta, com os devidos encaixes para os servomotores, entretanto, como sua finalidade era de um suporte de câmera rotacional para drone, modificações na estrutura foram necessárias, para que a célula consiga ser acoplada, conforme exibe a Figura 5.

Fig. 5. Suporte rotacional de câmera para drone.



A construção do circuito da célula FV foi efetuada em uma placa de circuito universal, onde também foram acoplados os resistores de *pull-down* dos *LDR's*, juntamente com os pinos de alimentação dos servomotores.

Em seguida foi fixada a base da estrutura móvel na superfície superior do *proto-board*, e em sequência a célula FV na estrutura móvel e o Arduino na lateral do *proto-board*.

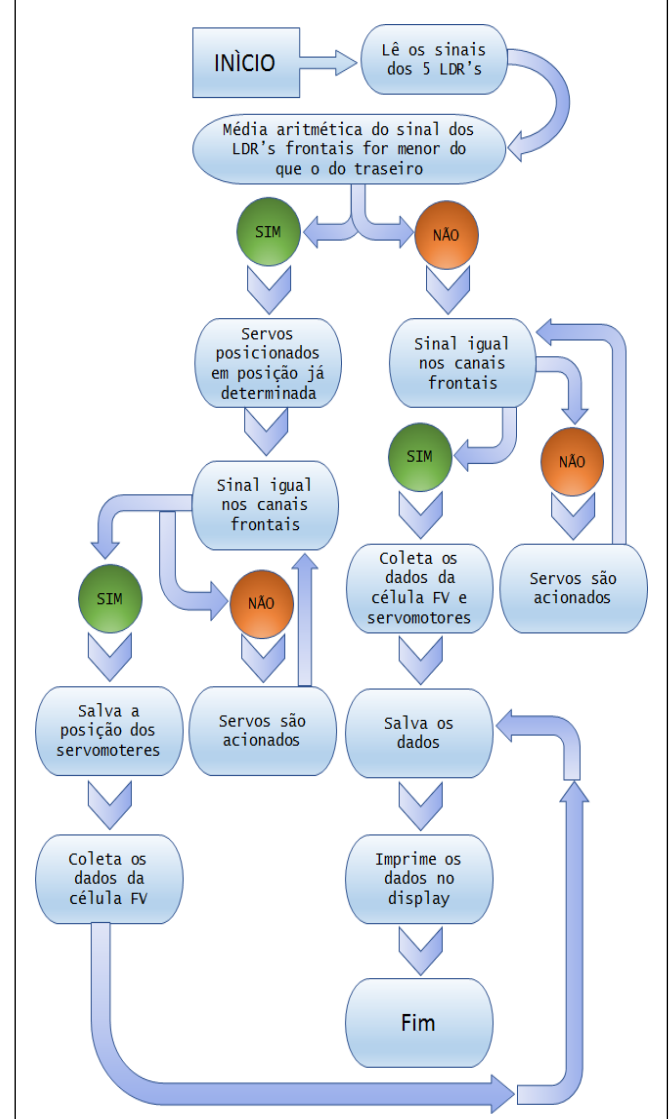
Por fim, serão conectados no Arduino, as saídas dos sensores às portas analógicas, os dispositivos digitais nas portas digitais e a alimentação nos pinos de energia.

V. PROCESSAMENTO DE DADOS

Para que o protótipo colete e exponha os dados no *display*, ele deve interpretar as condições da exposição luminosa nos *LDR's*, e efetuar os comandos de calibração da posição se for

necessário, assim, após o término da calibração, o sinal da célula é interpretado. Para um melhor entendimento do controle implementado, a Figura 6 mostra uma representação detalhada por meio de um fluxograma, o funcionamento do *software* do Arduino, ao receber os sinais fornecidos pelos sensores.

Fig. 6. Fluxograma representativo dos processos realizados pelo Arduino.



A. Correção de ângulo de derivação

A leitura feita pelo posicionamento do eixo dos servos motores é bem precisa, entretanto, na montagem da estrutura pode ocorrer um deslocamento na conexão entre a estrutura e o eixo do servo motor, a fim de possibilitar o reajuste é preciso conectar um módulo giroscópio ligado a outro Arduino com o *Serial-Monitor*, apresentando assim, os ângulos computados pelo módulo.

Na correção do ângulo vertical deste protótipo, fixa-se o giroscópio temporariamente ao lado da célula FV, de maneira que esteja coplanar a esta, em seguida, o servo vertical deve ser programado para permanecer em um ângulo de 45°.

A leitura do giroscópio demonstrará, quanto o ângulo real está atrasado ou adiantado em relação ao ângulo do servo,

assim, torna-se possível a criação de uma equação para corrigir o ângulo real, antes de ser salvo ou apresentado no *display*, o mesmo pode ser feito para o servo horizontal, no entanto, o módulo giroscópio deverá ser acoplado na lateral da célula FV, perpendicular a essa.

O servo horizontal deve ser programado na posição de 90°, em seguida, gire toda a estrutura do protótipo em 90°, de maneira que o módulo fique paralela ao chão, posto assim, faça a leitura e corrija o adiantamento ou atraso do ângulo do servomotor.

B. Curva de calibração

Para transformar os dados de irradiância coletados em um sinal analógico do Arduino, é necessário gerar uma função que utiliza comparações entre dados coletados pela entrada analógica e um medidor solar calibrado que esteja no mesmo instante e local do protótipo. Os dados coletados pela entrada analógica do protótipo devem ser acondicionados na coluna respectiva ao eixo X e os dados do medidor solar na coluna respectiva ao eixo Y, computa-se os dados em um gráfico de dispersão no *software Excel*, desta forma, é elaborada a linha de tendência.

A equação concebida pelo *software Excel*, será incrementada ao código do Arduino, para que o mesmo possa interpretar o sinal analógico advindo da célula em irradiância.

VI. GEOLOCALIZAÇÃO

Para que seja possível determinar a localização do sol, é utilizado o princípio de controle dos servos motores

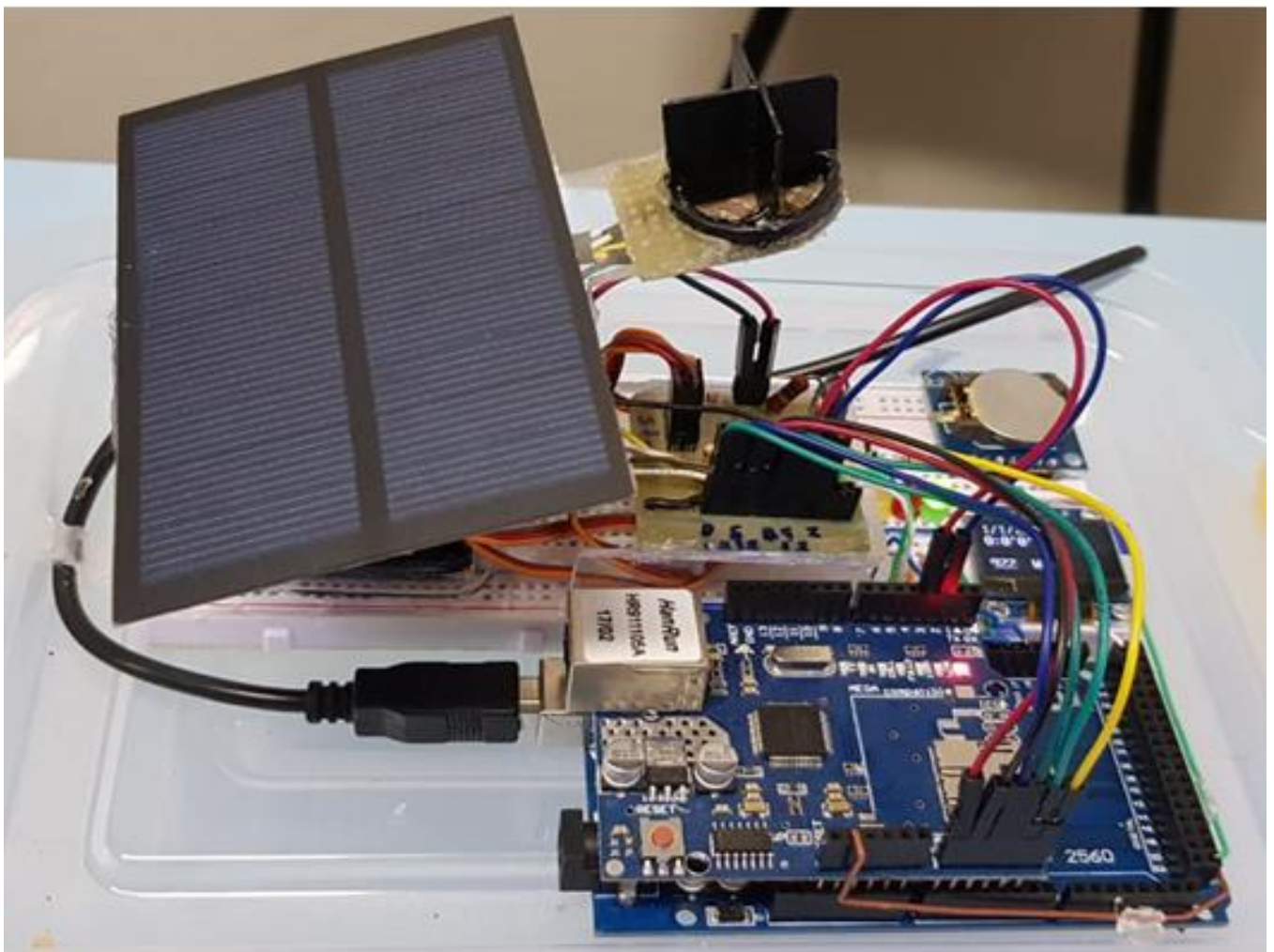
No funcionamento dos servo motores deste sensor o dispositivo mestre(Arduino) envia os comandos para o servo para corrigir o ângulo para que a placa fique perpendicular ao sol, assim ao final do movimento é possível ler em qual ângulo o eixo do servo se encontra, ao alinhar o dispositivo apontando-o ao no sentido e direção de um vetor norte-sul cartográfico.

VII. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o término da montagem com a realização de alguns ajustes para a compactação do dispositivo, tem-se o protótipo pronto para a calibração, como demonstra a Figura 7.

Com a finalidade de coletar dados necessários para a calibração do protótipo, fora utilizado o medidor solar conforme ilustra a Figura 8. As informações fornecidas pelo

Fig. 7 – Protótipo após a finalização da montagem e dos ajustes técnicos.



equipamento propiciaram a criação de uma tabela contendo os valores de irradiância emitida pelo sol e os valores apresentados no protótipo em um mesmo local. Mediante a tabela elaborada, tem-se a possibilidade da aquisição do gráfico, no qual permite o acesso a equação necessária para a calibração do protótipo.

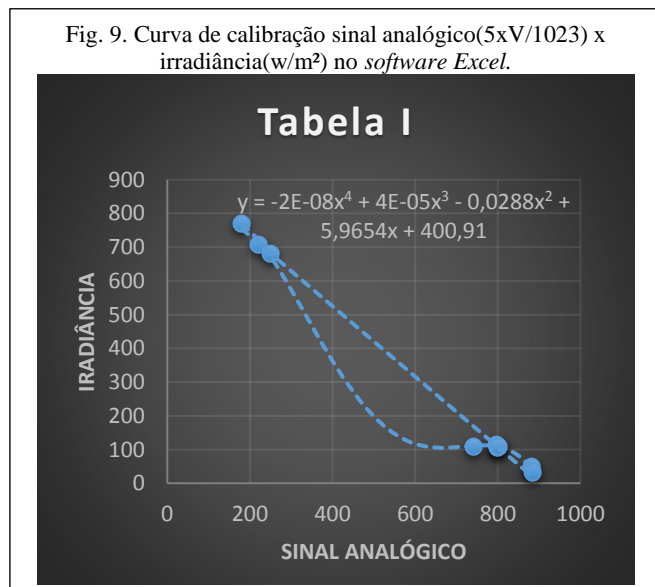
Fig. 8 - Equipamento Solar IV 400 da HT Instruments empregados nos estudos em campo [4].



Para que o protótipo possua grande precisão em suas medições, é necessário que haja várias coletas de irradiância de diferentes intensidades solares e horários, obtendo assim, uma grande quantidade de dados para a realização da calibração.

Devido o protótipo ainda estar em fase de desenvolvimento, e também ao fato, de existir dificuldades em ter acesso ao medidor solar em certos horários, conseqüentemente, poucos dados foram coletados, desta forma, o gráfico levantado possui vãos, conforme exibe a Tabela I, que por sua vez, reduz precisão proporcionada pela equação característica do protótipo.

Fig. 9. Curva de calibração sinal analógico(5xV/1023) x irradiância(w/m²) no software Excel.



VIII. CONCLUSÕES

A criação deste protótipo demonstra que por meio de ferramentas simples e acessíveis, juntamente, com conhecimentos básicos em robótica e programação, torna-se possível a criação de um sensor de irradiância, que mede a irradiância solar e a posição do sol. Desta maneira, tal projeto permite aprimorar os conhecimentos para possíveis aplicações em sistemas fotovoltaicos reais. Sendo assim, os módulos FVs sempre se orientarão para a posição que tiver o maior grau de irradiância, conseqüentemente, uma maior geração de potência quilowatt pico.

Devido ao protótipo apresentar-se em fase de desenvolvimento, foram coletados poucos pontos comparativos, desta forma, a calibração realizada no protótipo não possui, ainda, muita precisão nos dados emitidos. Todos os pontos apurados estão representados na Figura 9.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos na área, envolvendo o aprimoramento da precisão do sensor de irradiância, desenvolvimento de um sistema que possa ser exposto diretamente a intempéries climáticas e o emprego de um sistema de comunicação a distancia para monitoramento em regiões remotas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao suporte financeiro concedido pela FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] T. F. PAES, *Sistemas de Caracterização de Elementos Sensores para Radiômetros Fotovoltaicos*, Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Ciências e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Fevereiro de 2012.
- [2] T. F. PAES, A. F. BELOTO, L. A. BERNI, W. A. VILELA, *Sistemas De Caracterização Elétrica E Ótica De Detectores Fotovoltaicos Para Radiômetros*, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, São Paulo, vol.1, Setembro de 2012.
- [3] W. A. VILELA, *Estudo, Desenvolvimento e Caracterização de Radiômetros para Medidas de Radiação Solar*, Tese(Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Ciências e Tecnologia de Materiais e Sensores) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Agosto de 2010.
- [4] W. A. VILELA, A. F. BELOTO, M. C. SANCHEZ, C. A. S. RAMOS, C. C. VAZ, *Radiômetros Para Medidas Da Radiação Solar Par Com Elemento Sensor De Célula Solar De Silício*, XXX CBRAVI, Campos do Jordão, Setembro de 2009.
- [5] T. A. Ferreira, L. A. Berni, T. F. Paes, W. A. Vilela, A. F. Beloto, *Sistema Para Caracterização Espectral De Dispositivos Fotovoltaicos*, Revista Brasileira de Energia Solar, São José dos Campos, vol.3, p. 47-53, Julho de 2012.
- [6] NEWTON C. B., *Eletrônica Básica Para Mecatrônica*, Saber, 1ª Edição, São Paulo, 2005.

- [7] SOUZA, A. C.; Issa, L. E. ; MELO, F. C. ; FREITAS, L. C. G. ; SANTOS, I. N. . *Avaliação de Desempenho de Modelos Computacionais Representativos de Painéis Fotovoltaicos*. Ciência & Engenharia, vol. 25, p. 145-154-154, 2016.

DADOS BIOGRÁFICOS (OPCIONAL)

João Vitor Alves Santos, nascido em 05/03/1997 em Frutal-MG, é formando de engenharia elétrica(2016) pela Universidade Estadual de Minas Gerais. Atualmente trabalha em projetos de pesquisa e extensão sobre energias limpas. Suas áreas de interesse são; Microcontroladores e microprocessadores aplicados a rede neural humana e desenvolvimento de dispositivos para estímulos sensoriais humanos em próteses. É um estudante com sede de conhecimento, que faz valer cada oportunidade oferecida.

Arthur Costa de Souza concluiu sua graduação no ano de 2014 pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluno do curso de doutorado do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFU e membro do

laboratório de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Suas pesquisas se concentram na área de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica com a avaliação dos impactos acarretados ao sistema elétrico, da mesma forma, a avaliação dos sistemas armazenadores de energia. Atualmente é professor designado da Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG).

Alan Kardec candidato dos Reis, nascido em 27/11/1956 em Monte Alegre-MG, é engenheiro eletricitista (1981), mestre (1983) pela Universidade Federal de Uberlândia. De 2008 a 2017 foi coordenador do curso de engenharia elétrica da Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade de Ituiutaba, desde 2010 faz parte do grupo de pesquisa “Fotometria Portátil de Análise” do CNPQ/CAPES, onde são desenvolvidas pesquisas com fontes alternativas de energia. Atualmente é professor designado nas disciplinas de Circuitos Elétricos I (nos cursos de engenharia da computação e engenharia elétrica), Circuitos Elétricos III (curso de engenharia elétrica) e Estágio Supervisionado (Curso de engenharia elétrica da Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade de Ituiutaba).