

# Protótipo para Posicionamento Automático de Placas Fotovoltaicas Utilizando Hardware de Prototipagem Livre e Monitoramento das Grandezas

Vinicius Neves de Figueiredo, Natália Maria Chequer Abi Abib Vilaça, Carlos Phelipe Roza Andrade, Gabriel Teruaki Nichioka, Paulo de Moraes Oliveira Filho, Vitor Hugo Ferreira

Programa de Educação Tutorial Institucional do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica - PET-Elétrica

Universidade Federal Fluminense

Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

[viniciusneves@id.uff.br](mailto:viniciusneves@id.uff.br), [nataliachequer@id.uff.br](mailto:nataliachequer@id.uff.br), [cpra95@yahoo.com.br](mailto:cpra95@yahoo.com.br), [gtnichioka@gmail.com](mailto:gtnichioka@gmail.com), [paulofilho.92@hotmail.com](mailto:paulofilho.92@hotmail.com), [vitor@vm.uff.br](mailto:vitor@vm.uff.br).

**Resumo** — Este artigo apresenta resultados iniciais referentes ao projeto para desenvolvimento de um seguidor solar de baixo custo. Para tanto é necessário um dispositivo para identificação da direção de maior intensidade solar, possibilitando o posicionamento do painel no sentido de maximizar a sua produção de energia ao longo do dia. Partindo do princípio que a intensidade da radiação está diretamente atrelada à quantidade de lux que passa por um dado ponto, foi observada a utilização de sensores LDR (*Light Dependent Resistor*) ao invés de piranômetros, reduzindo sensivelmente o custo do projeto. A utilização do Arduino também visa o aspecto econômico, já que este é um hardware de prototipagem livre. Foi utilizado um servomotor para demonstrar qual será o futuro funcionamento de um protótipo em uma escala maior. Por fim, foram desenvolvidos aplicativos para monitoramento de grandezas e feitas análises que ilustrassem o funcionamento do futuro dispositivo, sendo obtidos resultados satisfatórios para a aplicação vislumbrada, i.e., identificação da direção de maior intensidade solar.

**Palavras Chave**— Arduino, Energia Solar, LDR, Microgeração de Energia, Seguidor Solar.

## I. INTRODUÇÃO

A resolução normativa número 482, criada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [1], proporcionou novos horizontes à micro e mini geração de eletricidade distribuída, capacitando os consumidores a produzir e até fornecer energia à sociedade. Ao mesmo tempo, devido às qualidades únicas de sua matriz energética, a energia fotovoltaica vem se estabelecendo como uma opção para o desenvolvimento energético sustentável.

Geralmente, painéis solares são posicionados sobre superfícies fixas, utilizando o telhado como suporte. Devido ao fato do sol ser um objeto em movimento, este tipo de instalação não se apresenta eficaz [2], com a máxima eficiência sendo obtida quando os painéis estão angulados perpendicularmente aos raios solares.

Uma solução comum adotada atualmente é a definição do posicionamento fixo ótimo de acordo com a latitude e longitude do local de instalação do painel [3]. Devido ao movimento natural do sol, esta estratégia também deve ser aprimorada uma vez que ao fixar o painel uma parte significativa da energia solar disponível é desperdiçada.

Uma inovação que visa otimizar a geração solar fotovoltaica consiste em um mecanismo que é implementado junto ao sistema fotovoltaico chamado de seguidor solar (do inglês *solar tracker*) [2]- [5]. Este tipo de tecnologia é simples e permite aumentos significativos na produção em troca de um investimento baixo, comparado ao custo dos painéis [7].

Este artigo apresenta resultados iniciais referentes ao projeto para desenvolvimento de um seguidor solar de baixo custo. Este projeto é realizado por alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFF vinculados ao PET-Elétrica com o intuito de contribuir para a consolidação de conceitos estudados ao longo do ciclo básico. Assim, além do caráter técnico, este projeto também apresenta um viés didático, provendo um ambiente onde os conceitos ministrados em sala de aula podem ser integrados na busca para solução de um problema real de Engenharia.

Neste trabalho são apresentados os primeiros resultados da criação de um seguidor solar de baixo custo, com foco no desenvolvimento do sistema de monitoramento de intensidade solar e criação de um protótipo de bancada para o sistema de posicionamento. Mesmo sabendo que o sol também varia o ângulo que faz com o zênite através dos dias em um ano [8] sendo, portanto, necessários dois graus de liberdade para obtenção do máximo de eficiência, inicialmente neste projeto será considerado um único eixo para movimentação do painel. Foram utilizados sensores LDR (do inglês, *Light Dependent Resistor*) juntamente com a plataforma de prototipagem livre Arduino, sendo desenvolvida uma interface para monitoramento da incidência em cada LDR e o armazenamento das grandezas monitoradas.

## II. METODOLOGIA

O projeto foi dividido em duas partes: desenvolvimento da parte eletrônica e o desenvolvimento de aplicativos. A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos que resume o projeto.

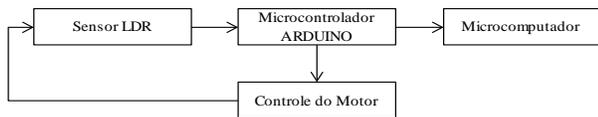


Figura 1: Diagrama em blocos do projeto.

Com o objetivo de construir um seguidor solar que fosse de baixo custo e também de prática aplicação para futuros projetos, foram pesquisados produtos de fácil acesso no mercado. Para esta fase inicial, foram utilizados cinco sensores LDR, cinco resistores de 10 [kΩ], um cabo para transferência de dados, um Arduino, um servomotor, um computador com software de programação Visual Studio instalado e um protoboard.

O LDR, também chamado de célula fotocondutiva, ou ainda de fotoresistência é composto de um material semiconductor, o sulfeto de cádmio, CdS, ou o sulfeto de chumbo [9]. O processo de construção de um LDR consiste na conexão do material fotosensível com os terminais, sendo que uma fina camada é simplesmente exposta à incidência luminosa. Conforme aumenta a intensidade de luz incidente no LDR, os elétrons presentes na estrutura recebem a energia dos fótons e têm seu nível de energia aumentado. O resultado é o aumento de elétrons livres e/ou fracamente presos ao núcleo, aumentando a condutividade e diminuindo a resistência do material.

Este dispositivo possui dois terminais, cuja resistência  $R$  varia linearmente com a intensidade de luz incidente obedecendo à equação (1), onde  $L$  é a luminosidade em [Lux]; e  $C$  e  $A$  são constantes dependentes do processo de fabricação e do material utilizado [9]:

$$R = C \cdot A \cdot L \quad (1)$$

Esta equação representa a relação entre  $R$  e  $L$  para a faixa de operação linear do LDR. Conforme apresentado na seção III, este comportamento sofre efeitos de saturação para valores elevados de luminosidade, comprometendo o uso da equação (1) para quaisquer valores de luminosidade. Assim, a partir do levantamento de dados empíricos foram estimados os parâmetros dos modelos representando a relação  $R$  e  $L$  para cada LDR utilizado no sistema de monitoramento de luminosidade. Os modelos e seus parâmetros estimados serão apresentados na seção III.

Estes dados foram captados pelo microcontrolador Arduino. O Arduino faz parte do conceito de hardware e software livre e está aberto para uso e contribuição de toda sociedade. O conceito Arduino surgiu na Itália, em 2005, com o objetivo de criar um dispositivo que fosse utilizado em projetos para a criação de protótipos construídos de uma forma menos dispendiosa do que os sistemas disponíveis no mercado.

A versão do hardware utilizado no Projeto é o Arduino Mega. Este conta com 54 entradas / saídas digitais das quais 14 podem ser usados como saídas PWM (Pulse-width modulation); e 16 entradas analógicas das quais 5 foram utilizadas no projeto.

Cada uma das entradas analógicas está ligada a um conversor analógico-digital de 10 bits, que transforma a leitura analógica em um valor digital dentre 1024 possibilidades (de 0 a 1023). Usualmente, elas medem de 0 a 5 V. Entretanto é possível mudar o limite superior usando o pino AREF [10]. A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático do circuito de cada LDR utilizado, e a partir da aplicação da regra do divisor de tensão ao circuito da Figura 2:

$$V_{arduino} = \frac{R}{R_1 + R} \cdot 5 \Rightarrow R = R_1 \frac{V_{arduino}}{5 - V_{arduino}} \quad (2)$$

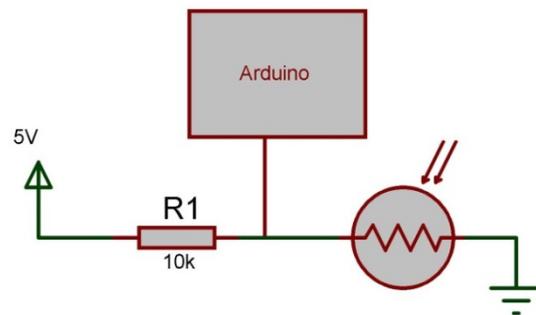


Figura 2: Diagrama esquemático do circuito de monitoramento de cada LDR

Portanto, ao obter a tensão medida pelo Arduino ( $V_{arduino}$ ) é possível estimar a resistência  $R$  do LDR, e de posse da relação desta grandeza com a intensidade luminosa, pode ser obtido o valor de intensidade luminosa incidente no LDR monitorado. Estes valores de tensão são repassados para um computador via conexão serial onde serão trabalhados simultaneamente por um aplicativo baseado na plataforma .NET [11], o Visual Studio C#. Desta maneira, foi possível criar um aplicativo para monitoramento das grandezas recebidas.

O Arduino também é responsável por fazer o controle de um Servomotor, que é uma máquina eletromecânica que executa um movimento de acordo com um comando específico, verificando sua atual posição e chegando até o local desejado, diferentemente dos motores de rotação contínua. A Figura 3 apresenta o protótipo de bancada desenvolvido, sendo ilustrados os principais componentes utilizados (LDRs, Arduino e servomotor).

### A. Eletrônica

Tendo como premissa o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo, foram utilizados LDRs em detrimento de piranômetros na coleta dos dados relacionados com a luminosidade. Uma discussão sobre esta metodologia pode ser encontrada no artigo de Dhanabal e colaboradores[8].

Para capturar os dados recebidos pelos sensores, foram conectados fios dos LDRs até a porta analógica do Arduino.

Desta maneira, é possível fazer com que o hardware leia valores variáveis que serão interpretados tanto pelo Arduino quanto pelo computador.

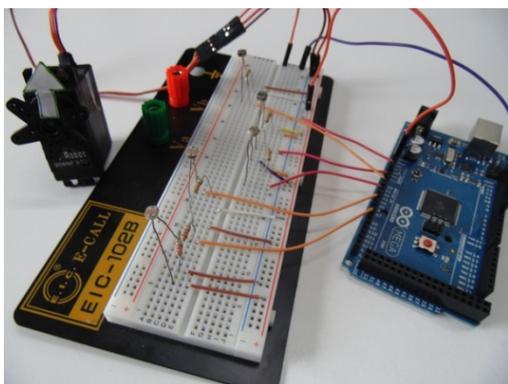


Figura 3: Protótipo de bancada – LDRs, Arduino e servomotor

### B. Aplicativos e programação

A programação foi dividida em dois enfoques: desenvolvimento da metodologia de controle de posição no Arduino e programação da interface de monitoramento no computador. No Arduino, os dados são processados captando as informações recebidas pelos sensores LDR e são enviadas através de uma conexão serial para um computador, como é mostrado no esquema da Figura 2. Após isso, o hardware compara estes dados para decidir qual dos sensores está recebendo maior iluminação, e posteriormente aciona o motor até que este aponte para a direção de maior luminosidade. Isso possibilita aos painéis sempre estarem posicionados corretamente. A Figura 4 apresenta um fluxograma resumindo a lógica de controle implementada no Arduino utilizando linguagem C.

Para construir uma interface que fosse simples, intuitiva e com disponibilização dos dados em tempo real, foi desenvolvido um aplicativo no Visual Studio C# [11], em que é possível observar um gráfico dinâmico apresentando os dados recebidos do Arduino. Esta interface é vista na

Figura 5, onde é apresentado o valor instantâneo da luminosidade medida por cada LDR juntamente com os históricos com as medições recebidas de cada sensor. Para facilitar a percepção das condições do aparelho através do aplicativo, o programa mostra em sua interface um polígono que é uma alusão à estrutura física onde serão embutidos os LDRs. Esta estrutura é apresentada na Figura 6.

Visto que o Arduino efetivamente mede a queda de tensão em cada LDR, faz-se necessário o levantamento da relação entre resistência ( $R$ ) e luminosidade ( $L$ ) para conversão da medida de tensão na informação desejada de luminosidade. Estas questões serão discutidas na próxima seção.

### III. RESULTADOS

Foram abertas duas linhas de investigação de dados: a primeira visa o levantamento do comportamento do LDR em função da luminosidade (dada em lux) apresentada no ambiente; e a segunda cobre os dados disponibilizados pelo

Arduino, relacionando-os com a corrente que passa pelo circuito em tal instante de tempo e consequentemente com a luminosidade.

O levantamento dos parâmetros da relação entre  $R$  e  $L$  em cada LDR utilizado foi iniciado a partir da equação (1), sendo necessário o levantamento de medidas para estimação da constante  $CA$  apresentada na equação (1).

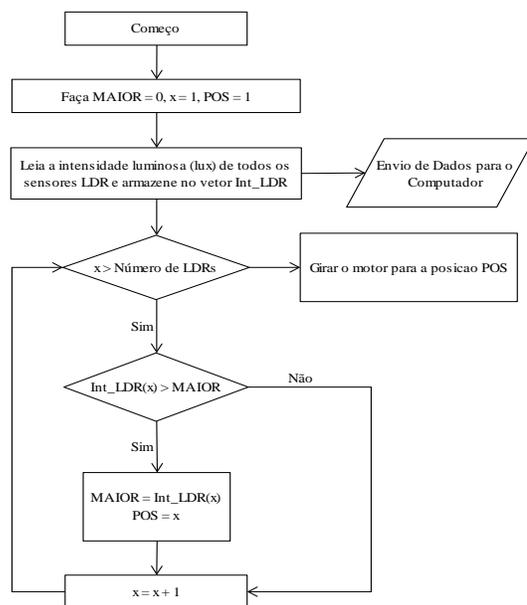


Figura 4: Fluxograma com a lógica de atuação do seguidor solar

O método adotado para analisar o comportamento do LDR foi variação da intensidade de luz sobre a bancada. Ao lado do LDR havia um luxímetro que estava bem próximo e a mesma altura, reduzindo a diferença de intensidade de luz entre os dois equipamentos. O LDR foi ligado a um multímetro para medição da resistência. Os dados obtidos para um dos LDRs são apresentados na Tabela I e apresentados graficamente na Figura 7.

Além do gráfico relacionando  $R$  e  $L$  medido em um dado LDR, nesta Figura são apresentados os parâmetros de três modelos estimados via regressão linear a partir destes dados, juntamente com a estatística  $R^2$  (coeficiente de determinação) [12] relacionada ao ajuste de cada modelo. A reta azul, cujos parâmetros são apresentados no retângulo azul da Figura 7, foi estimada considerando todos os pontos coletados. Já o modelo linear apresentado em laranja teve seus parâmetros estimados considerando somente os pontos com os cinco maiores valores de resistência, (cinco menores valores de luminosidade) desprezando assim a faixa não linear. A diferença entre os coeficientes de determinação  $R^2$  obtidos entre estes modelos evidencia o efeito da saturação mencionado na seção II, visto que para uma faixa limitada de intensidade luminosa a relação linear entre  $R$  e  $L$  foi estimada produzindo um coeficiente  $R^2$  igual a 0,9357; considerando todos os pontos, a estatística  $R^2$  foi igual a 0,7129. Cabe destacar que o coeficiente  $R^2$  varia dentro do intervalo [0,1] e quanto maior o seu valor, maior o ajuste do modelo à amostra [12].

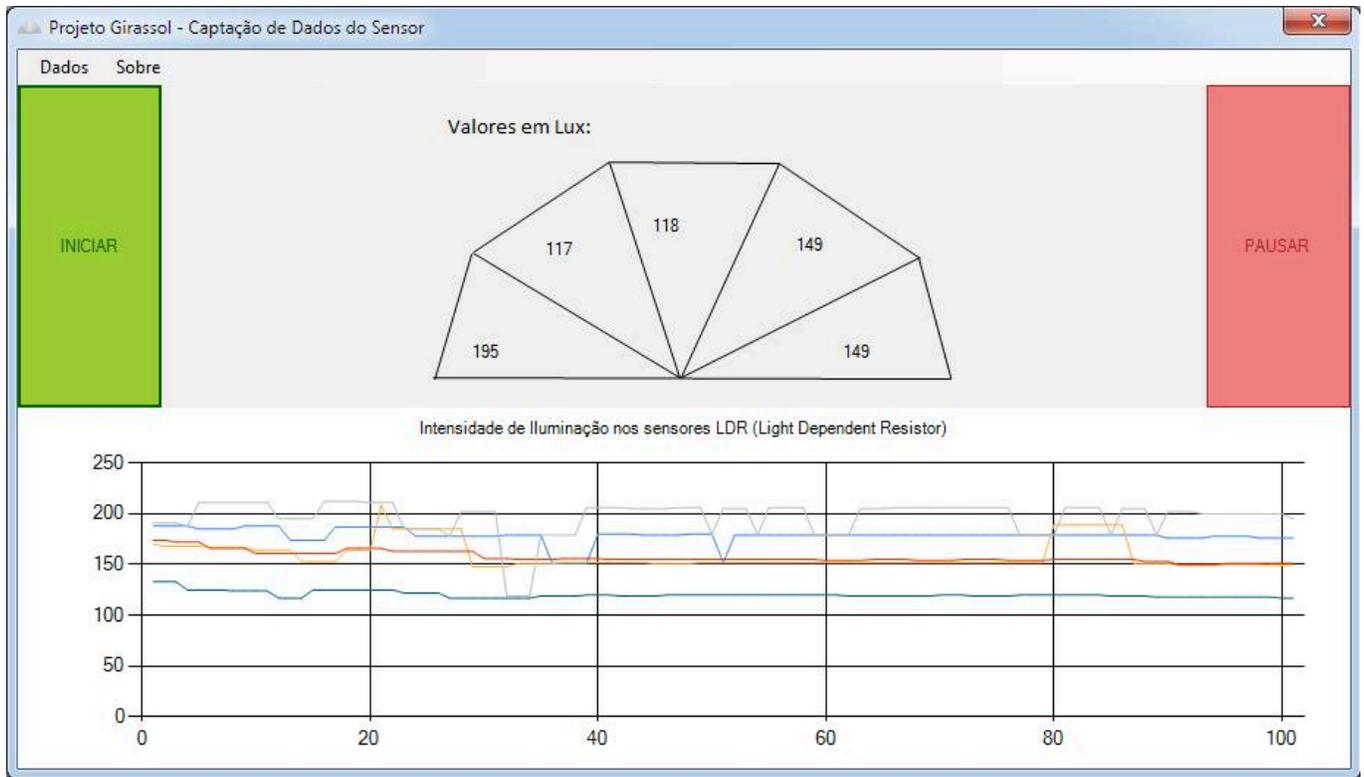


Figura 5: Interface desenvolvida para monitoramento da luminosidade recebida por cada LDR

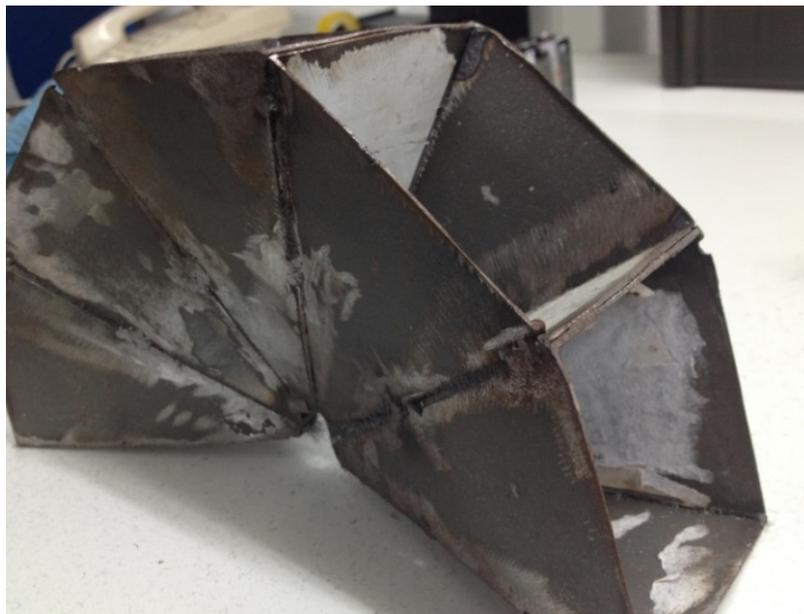


Figura 6: Estrutura física onde serão fixados os LDRs

TABELA I: VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DO LDR

Nº	Resistência [kΩ]	Intensidade Luminosa (Lux) [lx]
1	2,30	480
2	2,94	320
3	3,07	306
4	3,28	275
5	3,60	240
6	4,59	168
7	5,32	135
8	6,40	108
9	10,43	45
10	12,44	38

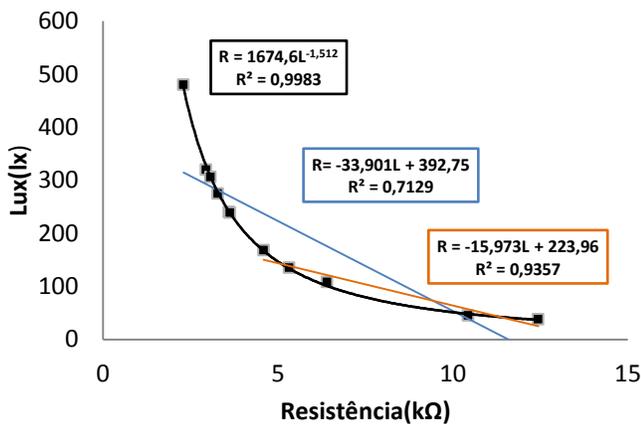


Figura 7: Relação entre intensidade luminosa (lux) e resistência (kΩ) do LDR

Visto que os LDRs em questão serão utilizados em ambientes com luminosidade não limitada, i.e., instalados junto a painéis fotovoltaicos, o uso da equação (1) para conversão do valor de resistência em luminosidade produzirá erros consideráveis para valores elevados de intensidade luminosa. Assim, a partir da análise visual dos gráficos obtidos para cada LDR (similares ao apresentado na Figura 7), foram estimados os parâmetros de um modelo exponencial dado por:

$$R = C_{exp} L^{-A_{exp}} \quad (3)$$

O retângulo preto da Figura 7 apresenta os parâmetros  $C_{exp}$  e  $A_{exp}$  estimados considerando os valores da Tabela I, juntamente com a estatística  $R^2$  obtida para este ajuste. Para utilização de regressão linear na estimativa de  $C_{exp}$  e  $A_{exp}$  foi aplicada uma transformação logarítmica à equação (3). Conforme ilustrado na Figura 7, este modelo apresentou o maior coeficiente de determinação  $R^2$ , igual a 0,9983, representando assim um ajuste mais adequado que os modelos lineares estimados. Assim, para os LDRs considerados no projeto e visto que a aplicação em tela não permite o controle

da intensidade luminosa recebida por cada LDR, o modelo apresentado na equação (3) se apresenta como o mais adequado para estimativa da relação entre  $R$  e  $L$ , sendo necessária a estimativa das constantes  $C_{exp}$  e  $A_{exp}$  para cada LDR.

Uma vez determinados os parâmetros dos LDR utilizados, como também a metodologia para estimação dos mesmos a partir da aquisição de novos dados, foi investigada a relação entre o valor informado na interface e a tensão monitorada pelo circuito da Figura 2. Assim, foi verificada a forma da conversão analógica/digital implementada pelo Arduino.

Para tanto, foram coletados os valores da queda de tensão no LDR e aqueles informados na interface do programa para o respectivo LDR. Os valores são apresentados na Tabela II e disponibilizados em forma gráfica na Figura 8. O gráfico confirma a linearidade esperada. Como a tensão é proporcional à resistência do LDR (vide equação (2)), a relação apresentada no retângulo da Figura 8 pode ser utilizada em conjunto com as equações (2) e (3) para converter o valor digital disponibilizado pelo Arduino (escala entre 0 e 1023) em valores de intensidade luminosa em [lx]. Cabe destacar também que para auxílio ao posicionamento automático de painéis fotovoltaicos não é necessária uma informação precisa sobre a intensidade luminosa, mas sim um parâmetro relativo que informe qual LDR tem maior incidência visando assim determinar a direção na qual o painel deve ser posicionado. Sendo assim, um processo que faça apenas uma medição absoluta, mas que traga de forma precisa a relação das intensidades luminosas percebidas por cada LDR atende ao interesse do projeto, justificando os materiais e a metodologia utilizada.

TABELA II: VALORES OBTIDOS NO SEGUNDO ENSAIO DO LDR

Nº	Valor Recebido	Tensão(V)
1	49	0,263
2	35	0,192
3	18	0,0792
4	12	0,0569
5	8	0,0411
6	5	0,0227
7	0	0,002

#### IV. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a primeira etapa do Projeto Girassol, desenvolvido por alunos de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense vinculados ao Programa de Educação Tutorial Institucional do Curso de Engenharia Elétrica da UFF (PET-Elétrica) e que visa a construção de um seguidor solar de baixo custo. Para tanto, foram utilizados materiais sob este enfoque, tais como LDR, Arduino e servomotor.

Ao longo desta etapa inicial do projeto foi desenvolvida a parte eletrônica e de sensoriamento da intensidade luminosa,

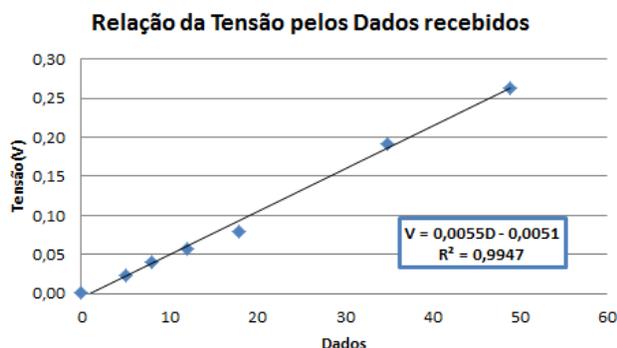


Figura 8: Relação entre tensão no resistor de 330  $\Omega$  e valor apresentado na interface

como também um algoritmo para identificação da direção de máxima intensidade e posicionamento do servomotor, interface para aquisição e apresentação de dados e um protótipo de bancada para teste do sistema como um todo.

Em suma, os resultados obtidos em todos os seguimentos desta primeira fase foram satisfatórios, uma vez que tanto o estudo dos sensores e ligações eletrônicas, quanto do sistema de supervisão de dados, atingiram as metas estabelecidas ao longo do projeto permitindo a sua aplicação no protótipo em escala real que está sendo desenvolvido.

Especificamente sobre o sistema de monitoramento, conforme mencionado na seção II, a relação linear entre  $R$  e  $L$  é verificada somente para uma faixa limitada de luminosidade. Apesar dos LDRs serem construídos com materiais cuja condutividade é amplificada em função do aumento da intensidade luminosa incidente, estes materiais possuem limites físicos para sua condutividade. Em outras palavras, se a equação (1) fosse válida para quaisquer valores de  $L$ , existiriam valores de intensidade luminosa que produziriam condutividade elevada, fazendo com que a resistência elétrica do material passasse a ser desprezível. Este fato não ocorre na prática conforme verificado neste trabalho, sendo necessária uma modelagem não-linear para utilização do LDR em ambientes com intensidade luminosa não controlada, como o caso do projeto em questão.

Uma vez estabelecido o sistema de monitoramento da intensidade luminosa e o algoritmo para posicionamento do painel, é necessário o desenvolvimento de um protótipo em escala real, sendo necessário o dimensionamento do sistema mecânico e de automação necessário para suporte e posicionamento automático de um painel fotovoltaico. A partir desta construção, será possível avaliar os ganhos em termos de geração de energia solar oriundos do posicionamento automático do painel. Visto que estes painéis são instalados em locais de difícil acesso (telhados de residências, estabelecimentos comerciais ou indústrias), é necessário o monitoramento remoto das diversas grandezas envolvidas em um painel fotovoltaico. Neste contexto, deve ser desenvolvido um sistema de comunicação entre o Arduino e dispositivos móveis (celulares e/ou tablets), permitindo ao proprietário do painel o monitoramento e controle do equipamento de geração fotovoltaica. Estas duas atividades estão sendo desenvolvidas pela equipe envolvida no projeto, com a finalização do

protótipo em escala real contemplando todas estas funcionalidades sendo prevista para dezembro de 2014.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ (Programa Difusão e Popularização de C&T – Rio De Janeiro, Processo E-26/112.254/2012), ao CNPq (Edital Universal 2013 – Processo 476463/2013-0) e à PROGRAD/UFF (Programa ProPET-UFF) pelo apoio financeiro às atividades do projeto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, Resolução Normativa N°482 [Online]: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- [2] A. Ponniran; A. Hashim; A. Joret, "A Design of Low Power Single Axis Solar Tracking System Regardless of Motor Speed", *International Journal of Integrated Engineering*, v.3, n.3, 2011.
- [3] C. Jaen; J. Pou; G. Capella; A. Arias; M. Lamich, "On the use of sun trackers to improve maximum power point tracking controllers applied to photovoltaic systems," *Compatibility and Power Electronics, 2009. CPE '09*, pp.67-72, May 2009.
- [4] A. Al Nabulsi; A. El Nosh; A. Ahli; M. Sulaiman; R. Dhaouadi, "Efficiency optimization of a 150W PV system using dual axis tracking and MPPT," *Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International*, pp.400-405, Dec. 2010.
- [5] F. Pineda; Arredondo, C.A., "Design and implementation of sun tracker prototype for solar module positioning", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, pp.2905-2910, June 2012.
- [6] GTES, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Rio de Janeiro: CRESESB, 1999, p. 207 [Online].Disponível:
- [7] R. Cortez, "Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica", Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2013.
- [8] R. Dhanabal; V. Bharathi; R. Ranjitha; A. Ponna; S. Deepthi; P. Mageshkannan; "Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount", *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, v.5, n.2, pp. 1925-1933, 2013.
- [9] LDR – Light Dependent Resistor [Online]. Disponível: [http://www.gta.uff.br/grad/01\\_1/contador555/ldr.htm](http://www.gta.uff.br/grad/01_1/contador555/ldr.htm)
- [10] PET-Tele UFF, Introdução ao Kit de Desenvolvimento Arduino, Niterói, Rio de Janeiro, 2013 p. 57 [Online]. Disponível: [http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/arduino/Tut\\_Arduino.pdf](http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/arduino/Tut_Arduino.pdf)
- [11] J. Sharp, Microsoft Visual C# 2008 Passo a Passo, Porto Alegre: Bookman, 2008, p. 624.
- [12] D.N. Gujarati, *Econometria Básica*, 5ª. Edição, Makron Hill/Bookman, 2011.