

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE CORRENTE E TENSÃO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Development of an acquisition system of current and voltage data for photovoltaic modules

Claodomir Antonio Martinazzo¹; Tailan Orlando².

¹ Professor do Departamento de Ciências Exatas e da Terra. URI Erechim. E-mail: mclao@uricer.edu.br

² Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica da URI Erechim.

Data do recebimento: 08/05/2017 - Data do aceite: 21/07/2017

RESUMO: A necessidade de obter os valores das grandezas físicas relacionadas aos painéis fotovoltaicos, faz-se de suma importância, considerando as suas não linearidades devido às variações ambientais aos quais estes módulos estão expostos. O desenvolvimento de um sistema para aquisição de dados dessas grandezas físicas foi o foco deste trabalho. O sistema é capaz de obter os valores de tensão elétrica e intensidade de corrente elétrica, bem como calcular a energia elétrica convertida diariamente nos painéis fotovoltaicos. O sistema foi desenvolvido utilizando a plataforma Arduino MEGA 2560, um módulo gravador de cartão microSD, sensores de tensão comerciais, sistema de medição de intensidade de corrente elétrica e diversos componentes eletro-eletrônicos. O sistema foi projetado para o módulo fotovoltaico KOMAES de 5W. O circuito foi implementado no software Proteus® a fim de comprovar o seu funcionamento. Depois de validado, o sistema foi construído e utilizado na comparação de módulos experimentais, sendo um módulo fixo e outro módulo em um sistema de seguimento solar. Os dados obtidos de tensão e intensidade de corrente elétrica do sistema de aquisição de dados desenvolvido foram comparados com os dados de um sistema comercial, indicando erro relativo inferior a 0,6% para tensão elétrica e inferior a 1,2% para a intensidade de corrente elétrica. Portanto, o sistema de aquisição de dados desenvolvido mostrou-se exato e totalmente funcional.

Palavras-chave: Aquisição de dados. Sistema fotovoltaico. Arduino.

ABSTRACT: The necessity to obtain the values of the physical quantities related to the photovoltaic panels is extremely important, considering their

non-linearities due to the environmental variations to which these modules are exposed. The aim of this study was to develop a data acquisition system of these physical quantities. The system is able to obtain electric voltage values and current intensity as well as calculate the electric energy converted daily in the photovoltaic panels. The system was developed using the Arduino MEGA 2560 platform, a microSD module card recorder, commercial voltage sensors, electric current intensity measurement system and other electronic components. The system was designed for the 5W KOMAES module. The circuit was implemented in the Proteus® software to verify its operation. After validation, the system was constructed and used in the comparison of experimental modules, consisting of a fixed module and another module in a solar tracking system. The voltage and current data of the data acquisition system were compared to the data from a commercial system, indicating relative error of less than 0.6% for electrical voltage and less than 1.2% for electric current intensity. Therefore, the data acquisition system proved to be accurate and fully functional.

Keywords: Data acquisition. Photovoltaic systems. Arduino.

Introdução

O aproveitamento da energia solar, que é inesgotável, na escala de tempo da Terra, tanto como fonte de calor quanto de luz, é uma das alternativas mais promissoras e sustentáveis para fornecer energia necessária para o desenvolvimento da tecnologia humana. Praticamente todas as outras fontes de energia da Terra têm o Sol como responsável.

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no Planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica. (PINHO; GALDINO, 2014).

As fontes de energia limpas, hoje, estão entre os principais assuntos quando se trata de engenharia. Projetar sistemas de maneira limpa e sustentável são alvo de muitos estu-

dos. A produção de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos é um desses temas. Quando se trata da eficiência de geração, estudos são feitos na parte de características estruturais dos painéis, bem como em melhorar os modos de captação da energia solar.

Em relação a geração de energia fotovoltaica mundial, Machado; Miranda (2015) constataram que os países que no ano de 2015 possuíam um maior avanço na área de utilização da energia proveniente do sol eram a Alemanha, a Itália, o Japão, a Espanha e os Estados Unidos. Esses países chegaram a corresponder a 88% da potência instalada no mundo. De acordo com a ANEEL (2017), a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, que seria uma alternativa para complementar a matriz energética brasileira, é muito pequena, ou seja, aproximadamente 172 MW em capacidade instalada, representando apenas 0,11% na capacidade do país. Por isso é importante que se pesquise sobre o assunto e se invista nesta fonte de energia renovável.

Segundo Fuentes, 2014, adquirir os valores das grandezas associadas aos painéis fotovoltaicos é uma forma de entender e analisar o seu comportamento de geração. As principais grandezas a serem observadas são a tensão elétrica e a intensidade de corrente elétrica por meio das quais verifica-se a potência fornecida pelo painel. Além disso, sistemas de coleta de dados normalmente têm custos elevados além de necessitarem a comunicação contínua com um computador.

Partindo da necessidade de realizar essas medidas, desenvolveu-se um sistema para coleta desses valores. O sistema consiste em amperímetros e voltímetros analógicos que podem ser acoplados junto a microcontroladores para mostrar ou gravar os valores das grandezas em um dispositivo de armazenamento. No caso deste projeto, o microcontrolador utilizado foi o Atmega 2560 que está disponível na plataforma Arduino.

A placa desenvolvida foi projetada para ser utilizada em 3 painéis fotovoltaicos, um módulo estático, um módulo móvel com um grau de liberdade e um módulo móvel com dois graus de liberdade. A fim de comparar suas eficiências, ela conta com 3 sensores de corrente. Além disso, foram instaladas conexões para facilitar o acoplamento dos sensores comerciais de tensão no sistema, também dimensionou e instalou-se a carga que dissipa a potência gerada pelos painéis. A carga é formada por 3 resistores de 120 ohms, um para cada sistema de painel, dois possuem potência de 5W e um, o qual dissipa a potência do painel móvel (dois eixos), possui potência de 10W, pois após testes em campo, foi percebido que uma quantidade de calor excessivo era emanada do resistor devido estar dissipando, aproximadamente, 4W durante o maior período do dia, para não sobrecarregar o sistema foi utilizado o resistor de maior potência e a ele acoplado um dissipador de alumínio.

A construção de um amperímetro, como é chamado o sensor que faz a leitura da corrente elétrica, parte da lei de Ohm, onde uma corrente elétrica passando por uma resistência gera uma tensão elétrica em seus terminais. Ao fixar-se um valor para a resistência, é possível encontrar o valor da corrente através da leitura da tensão.

O módulo do amperímetro é constituído de duas partes principais, uma fonte simétrica de ± 5 V, e de um sistema amplificador de tensão. A fonte simétrica é necessária para a alimentação dos amplificadores operacionais e foi construída baseada em Boylestad (1998). Ela possui um pequeno transformador 220/12+12Vac que garante a tensão mínima de 7,3 V para os reguladores de tensão fixa, sendo eles um LM7805 que regula a tensão da saída de +5 V e um LM7905 que regula a tensão da outra saída de -5 V, além de um circuito retificador em ponte de diodos e capacitores.

O sistema amplificador de tensão é o responsável por tornar o nível de tensão adequado para a entrada analógica da placa Arduino. O circuito conta com três resistores *shunt* de 0,05 ohms cada, ligados em série com a carga de cada circuito. O resistor *shunt* tem a função de não alterar as características do circuito, pois irá dissipar apenas uma parcela insignificante da potência gerada pelo sistema.

Ao realizar testes com o circuito, notou-se um aumento no valor da resistência *shunt*, isso pode ser causado devido à resistência em série dos fios e das soldas que compõem o circuito. A resistência final chegou a um valor próximo de 0,132 ohms.

A tensão produzida na resistência obedece à Equação 01, portando, tendo o valor de 0,132 ohms para R e obtendo o valor dessa tensão, chega-se a fórmula para encontrar o valor da corrente I (Equação 02).

$$V = R.i \quad (01)$$

$$I = \frac{V}{0,132} \quad (02)$$

O valor de tensão de circuito aberto do painel utilizado no projeto é de 21,5 V, que no circuito irá gerar uma corrente de 0,18 A. Essa corrente gera uma tensão muito baixa na resistência *shunt*, aproximadamente 24 mV, e a porta analógica do Arduino não possui resolução suficiente para detectar uma variação nesse valor, surge então a necessidade de amplificar esse valor. O amplificador escolhido para essa finalidade foi o AD623.

O AD623 é um integrado fabricado pela *Analog Devices*, que possui um amplificador de instrumentação constituído de três amplificadores internos. O AD623 oferece flexibilidade, permitindo a programação de ajuste de ganho com um único resistor. Sem resistência externa, o AD623 é configurado para ganho unitário ($G = 1$), e com uma resistência externa, o AD623 pode ser programado para ganhos de até 1000.

A relação entre a resistência e o ganho pode ser obtida por meio da Tabela I, encontrada no *datasheet* fornecido pela fabricante *Analog Devices*. (ANALOG DEVICES, 2016). Para valores mais específicos pode ser calculada por meio da Equação 03, também encontrada no referido *datasheet*.

$$R_G = \frac{100k\Omega}{(G-1)} \quad (03)$$

O ganho de 190 foi calculado para que a tensão na saída do amplificador não ultrapassasse 4,5 V para evitar danos à placa Arduino. Ao aumentar a tensão, aumentou-se a sensibilidade do sistema, pois devido à

resolução da porta analógica do Arduino ser de, aproximadamente, 4,88 mV e a tensão máxima gerada no resistor *shunt* ser de, aproximadamente, 24 mV, o que não permitia cinco valores diferentes de leitura, ao ter o seu valor máximo em 4,5 V permitiu uma quantidade de 922 valores diferentes e uma resolução de, aproximadamente, 0,195 mA.

Tabela I – Valores requeridos de resistências de ganho.

Ganho desejado	Valores de Rg (k ohm), 1%	Ganho calculado usando resistores de 1%.
2	0,100	2,00
5	24,900	5,02
10	11,000	10,09
20	5,230	20,12
33	30,090	33,36
40	2,550	40,21
50	2,050	49,78
65	1,580	64,29
100	1,020	99,04
200	0,499	201,4
500	0,200	501,00
1000	100,000	1001,00

Fonte: adaptado de: ANALOG, 2016.

Como resistor de ganho foi utilizado um resistor variável para possibilitar a adaptação do sensor a outros projetos que tenham correntes maiores ou menores, além de ter maior flexibilidade no ajuste do ganho, já que o valor da resistência calculada não era um valor comercial facilmente encontrado, aproximadamente 530 Ω .

Material e Métodos

Primeiramente, os circuitos dos módulos de medição e de alimentação foram inteiramente simulados no ambiente ISIS do *software* Proteus (Figura 1). Na sequência, com o próprio Proteus foi feito o *layout* para a placa de circuito impresso através do ambiente ARES. A Figura 2-a mostra o *layout* do módulo de medição e a Figura 2-b mostra o *layout* da fonte simétrica de 5 V.

Figura 01 - Circuito projetado no software Proteus.

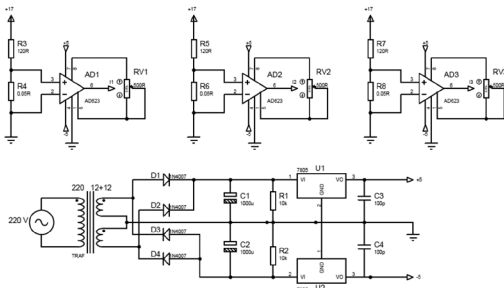
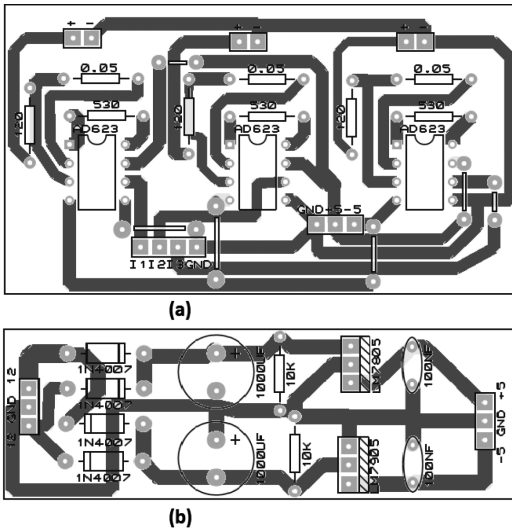


Figura 02 - Layout de impressão com as trilhas elaboradas no software Proteus.

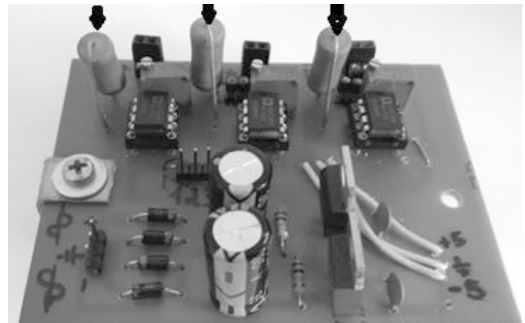


A Figura 3 mostra a placa pronta com todos os componentes eletrônicos soldados. Dois dos resistores (cargas) apontados na foto foram retirados da placa e fixados em um dissipador externo, pois aqueciam excessivamente (Figura 6).

Para a leitura do valor da tensão elétrica foram utilizados sensor de tensão de 0 a 25 V CC. Estes foram adquiridos pela internet e consistem em um sensor divisor resistivo que rebaixa a tensão em uma proporção 5 vezes menor, tornando o nível de tensão aceitável para a porta do microcontrolador.

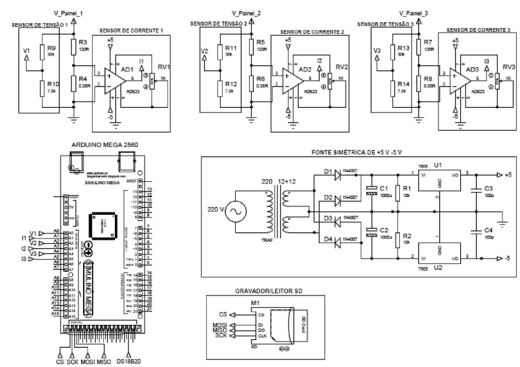
Ambos os sensores foram implementados junto a plataforma Arduino para efetuar as medidas. O sistema, ainda, utiliza de um módulo para a gravação dos dados obtidos em

Figura 3 - Foto da placa do módulo sensor de corrente.



um cartão MicroSD por meio um módulo *MicroSD Card Adapter* da Catalex. O programa interno do microcontrolador lê e interpreta as entradas analógicas e converte-as para os valores de tensão e corrente, o programa também calcula a potência instantânea e a energia gerada durante o período de funcionamento. A Figura 6 mostra o esquemático de todo o sistema de leitura e gravação descrito.

Figura 4 - Esquemático do sistema de leitura e gravação.



Para realizar o cálculo da energia acumulada produzida em cada painel, utilizou-se a ferramenta do cálculo numérico chamada *integração numérica pela regra dos trapézios repetida*, Segundo Ruggiero; Lopes, 1996, que consiste em aproximar a área entre uma curva e o eixo x em pequenos trapézios. O período de tempo entre cada leitura foi de 0,5 segundos e faz referência à altura do trapézio, as duas bases são os valores lidos entre

os intervalos de tempo um valor instantâneo e o valor da última leitura. Para fazer a integração durante todo o período de tempo foi utilizado acumuladores para armazenamento dos valores anteriores e, posteriormente, somá-los junto como valor instantâneo.

A potência instantânea foi calculada pela lei de Ohm da potência dada pela Equação 04. A energia é dada pela integração da potência em função do tempo. Utilizando o cálculo numérico, a área do trapézio “A” pode ser calculada pela Equação 05, onde o comprimento das bases ”B” e “b” são os valores da potência instantânea e a da leitura anterior, a altura “h” é referente ao intervalo de tempo das leituras, nesse caso 0,5 segundos. Transformando o tempo de segundos para horas é possível obter uma constante que relaciona a soma das potências com a energia gerada no período de tempo.

$$P = V.I \quad (04)$$

$$A = \frac{(B + b).h}{2} \quad (05)$$

A Equação 06 mostra a transformação da Equação 05 (matemática), na equação para o cálculo da Energia.

$$E = \frac{(P_1 + P_2) \left(\frac{0,5}{3600} \right)}{2} = (P_1 + P_2) 0,00006944 \quad (6)$$

O *Software* faz a gravação de todos os dados obtidos durante o funcionamento do protótipo. Estes dados são gravados a cada 10 segundos em um cartão microSD por meio de um módulo específico para leitura e gravação deste tipo de dispositivo.

O sistema foi utilizado, inicialmente, para a comparação de apenas dois módulos fotovoltaicos de 5 W cada. Um módulo é estático com uma inclinação determinada pela latitude do local. O segundo módulo possui

um sistema de seguimento solar de dois eixos baseado na geometria solar. O sistema foi utilizado para permitir a comparação da energia gerada entre ambos.

Na sequência, apresenta-se o código escrito para a Plataforma Arduíno que faz a leitura e o registro dos dados lidos pelos sensores de tensão e de Intensidade de corrente elétrica.

```
#include <SD.h> //Biblioteca SD
#include <SPI.h> //Biblioteca comunicação SPI para o SD
#include "Wire.h" //Biblioteca comunicação I2C para o RTC
#define DS3231_I2C_ADDRESS 0x68
const int chipSelect = 53; // Pino do Arduino conectado ao pino CS do modulo SD

#define CORRENTE_GER A1 // corrente
float corrente_ger = 0.0;
float corrente_soma = 0.0;
#define CORRENTE_GER2 A3
float corrente_ger2 = 0.0;
float corrente_soma2 = 0.0;
#define CORRENTE_GER3 A5
float corrente_ger3 = 0.0;
float corrente_soma3 = 0.0;

#define TENSAO_GER A0 //tensão
float tensao_ger = 0.0;
float tensao_ger_soma = 0.0;
#define TENSAO_GER2 A2
float tensao_ger2 = 0.0;
float tensao_ger2_soma = 0.0;
#define TENSAO_GER3 A4
float tensao_ger3 = 0.0;
float tensao_ger3_soma = 0.0;
float POTENCIA_INST = 0.0; //potência e energia
```

```

float POTENCIA_ANT = 0.0;
float ENERGIA = 0.0;
float POTENCIA_INST2 = 0.0;
float POTENCIA_ANT2 = 0.0;
float ENERGIA2 = 0.0;
float POTENCIA_INST3 = 0.0;
float POTENCIA_ANT3 = 0.0;
float ENERGIA3 = 0.0;

byteToBcd(byte val)// Converter números decimais normais para código binário decimal
{
return( (val/10*16) + (val%10) );
}
byteToDec(byte val)// Converter código binário decimal para números decimais normais
{
return( (val/16*10) + (val%16) );
}

void setup() {
Wire.begin();
if (!SD.begin(chipSelect))
{
return;
}
File dataFile = SD.open("arquivo.txt", FILE_WRITE);
// Grava os dados no arquivo
if (dataFile) {
dataFile.println();
dataFile.println("Iniciado!");
dataFile.println("ANO MÊS DIA HORA MIN. SEG. V1 V2 V3 I1 I2 I3 P1 P2 P3 E1 E2 E3");
dataFile.close();
}

pinMode(CORRENTE_GER,INPUT);
pinMode(CORRENTE_GER2,INPUT);
pinMode(CORRENTE_GER3,INPUT);
pinMode(TENSAO_GER,INPUT);
pinMode(TENSAO_GER2,INPUT);
pinMode(TENSAO_GER3,INPUT);
}

void readDS3231time(byte *segundo, byte *minuto, byte *hora, byte *diaDaSemana, byte // Função para recuperar os dados do RTC
*diaDoMes, byte *mes, byte *ano)
{
ire.beginTransmission(DS3231_I2C_ADDRESS);
Wire.write(0); // define o registro do ponteiro do DS3231 para 00h
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(DS3231_I2C_ADDRESS, 7);
// requerer sete bytes de dados do DS3231 partindo de registro 00h
*segundo = bcdToDec(Wire.read() & 0x7f);
*minuto = bcdToDec(Wire.read());
*hora = bcdToDec(Wire.read() & 0x3f);
*diaDaSemana = bcdToDec(Wire.read());
*diaDoMes = bcdToDec(Wire.read());
*mes = bcdToDec(Wire.read());
*ano = bcdToDec(Wire.read());
}

void loop() {
byte segundo, minuto, hora, diaDaSemana, diaDoMes, mes, ano; // Recuperar dados do DS3231
readDS3231time(&segundo, &minuto, &hora, &diaDaSemana, &diaDoMes, &mes, &ano);
for(int i=0; i<20; i++){

```

```

corrente_ger = (analogRead(CORRENTE_
GER)*0.3035 + 0.5);
corrente_soma=corrente_soma+corrente_
ger;
corrente_ger2 =
(analogRead(CORRENTE_GER2)*0.3035
+ 0.5);
corrente_soma2=corrente_
soma2+corrente_ger2;
corrente_ger3 =
(analogRead(CORRENTE_GER3)*0.3035
+ 0.5);
corrente_soma3=corrente_
soma3+corrente_ger3;
tensao_ger = (analogRead(TENSAO_
GER)*0.0247233);
tensao_ger_soma = tensao_ger_soma +
tensao_ger;
tensao_ger2 = (analogRead(TENSAO_
GER2)*0.0247877);
tensao_ger2_soma = tensao_ger2_soma +
tensao_ger2;
tensao_ger3 = (analogRead(TENSAO_
GER3)*0.0247122);
tensao_ger3_soma = tensao_ger3_soma +
tensao_ger3;
delay(25);
}
corrente_ger = corrente_soma*0.05;
corrente_ger2 = corrente_soma2*0.05;
corrente_ger3 = corrente_soma3*0.05;
tensao_ger = tensao_ger_soma*0.05;
tensao_ger2 = tensao_ger2_soma*0.05;
tensao_ger3 = tensao_ger3_soma*0.05;
  POTENCIA_INST = tensao_
ger*corrente_ger*0.001;
  ENERGIA = ((POTEN-
CIA_ANT+POTENCIA_
INST)*0.00006944)+ENERGIA;
  POTENCIA_ANT = POTENCIA_INST;

  POTENCIA_INST2 = tensao_
ger2*corrente_ger2*0.001;
  ENERGIA2 = ((POTEN-
CIA_ANT2+POTENCIA_
INST2)*0.00006944)+ENERGIA2;
  POTENCIA_ANT2 = POTENCIA_
INST2;
  POTENCIA_INST3 = tensao_
ger3*corrente_ger3*0.001;
  ENERGIA3 = ((POTEN-
CIA_ANT3+POTENCIA_
INST3)*0.00006944)+ENERGIA3;
  POTENCIA_ANT3 = POTENCIA_
INST3;
corrente_soma = 0;
corrente_soma2 = 0;
corrente_soma3 = 0;
tensao_ger_soma = 0;
tensao_ger2_soma = 0;
tensao_ger3_soma = 0;

if(segundo%10==0){
  File dataFile = SD.open(“arquivo.txt”,
FILE_WRITE); // Grava os dados no
arquivo
if (dataFile)
{ dataFile.print(ano);
dataFile.print(“ “);
dataFile.print(mes);
dataFile.print(“ “);
dataFile.print(diaDoMes);
dataFile.print(“ “);
dataFile.print(hora);
dataFile.print(“ “);
dataFile.print(minuto);
dataFile.print(“ “);
dataFile.print(segundo);
dataFile.print(“ “);
dataFile.print(corrente_ger);

```



```

dataFile.print("");
dataFile.print(corrente_ger2);
dataFile.print("");
dataFile.print(corrente_ger3);
dataFile.print("");
dataFile.print(tensao_ger);
dataFile.print("");
dataFile.print(tensao_ger2);
dataFile.print("");
dataFile.print(tensao_ger3);
dataFile.print("");
dataFile.print(POTENCIA_INST);
dataFile.print("");
dataFile.print(POTENCIA_INST2);
dataFile.print("");
dataFile.print(POTENCIA_INST3);
dataFile.print("");
dataFile.print(ENERGIA);
dataFile.print("");
dataFile.print(ENERGIA2);
dataFile.print("");
dataFile.println(ENERGIA3);
dataFile.close();
    }
}
}
    
```

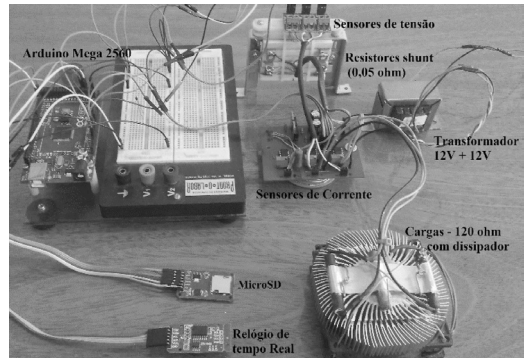
Resultados e Discussão

Os dados são gravados no formato *.txt*, e posteriormente são lançados para uma planilha no *software Excel*. Os dados gravados são: tensão no painel seguidor(V), corrente no painel seguidor(A), energia gerada pelo painel seguidor (Wh), tensão no painel estático(V), corrente no painel estático(A), energia gerada pelo painel estático (Wh). A Figura 5 mostra um instantâneo de parte de uma medição realizada.

Figura 5 - Fração do arquivo onde ficam armazenados os dados das leituras.

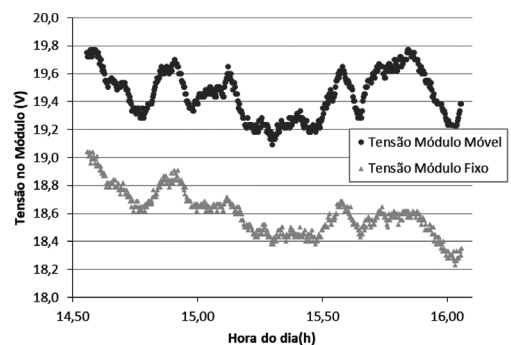
ANO	MES	DIA	HORA	MIN.	SEG.	V1	V2	V3	I1	I2	I3	P1	P2	P3	E1	E2	E3
17	2	7	15	22	20	19,99	19,28	0	191	184	0	3,82	3,68	0	0,52	0,52	0
17	2	7	15	22	30	19,97	19,18	0	187	180	0	3,73	3,59	0	0,54	0,54	0
17	2	7	15	22	40	19,89	19,21	0	188	182	0	3,74	3,61	0	0,56	0,55	0
17	2	7	15	22	50	19,92	19,21	0	186	179	0	3,71	3,57	0	0,58	0,57	0

Figura 6 –Fotografia do sistema completo.



A partir dos dados obtidos durante uma coleta, foi gerado o gráfico que pode ser visto na Figura 7. Observam-se as linhas de tensão nos dois módulos, com boa precisão e não apresentam registros de variáveis espúrias, mostrando os valores dentro da leitura esperada para o módulo utilizado. As variações e oscilações presentes nas curvas da tensão devidas a nebulosidade existente no dia da leitura, que a partir da terceira semana de fevereiro do ano de 2017 foram de presença constante, impedindo leituras a céu limpo.

Figura 7 - Tensão elétrica registrada nos dois módulos fotovoltaicos.



A Figura 8 mostra os dados de intensidade de corrente elétrica registradas pelo sistema desenvolvido para o mesmo período de leitura exposto na Figura 09. Devido ao desenho do programa desenvolvido, a apresentação da leitura ficou discretizada em 0,01A.

Figura 8 - Intensidade de corrente elétrica registrada nos dois módulos fotovoltaicos.

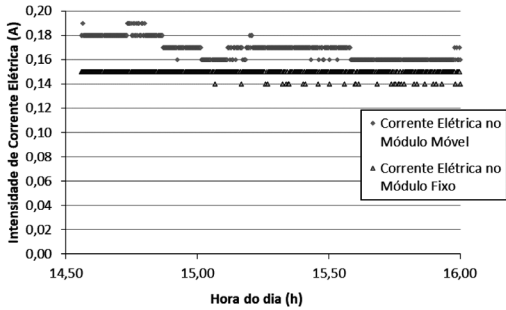


Figura 9 - Energia elétrica produzida registrada nos dois módulos fotovoltaicos.

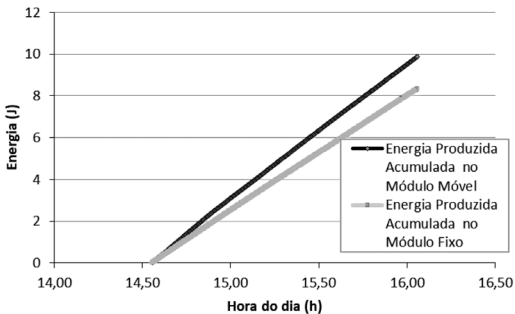
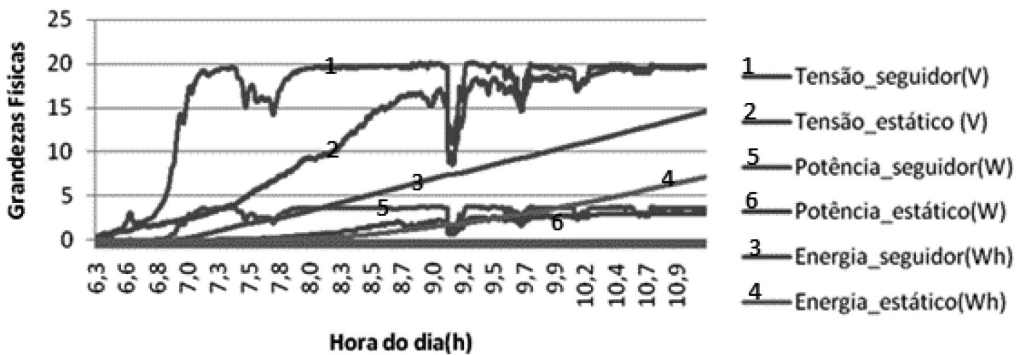


Figura 10 - Gráficos da tensão, potência e energia, gerados pelos módulos: móvel e estático (período da manhã).

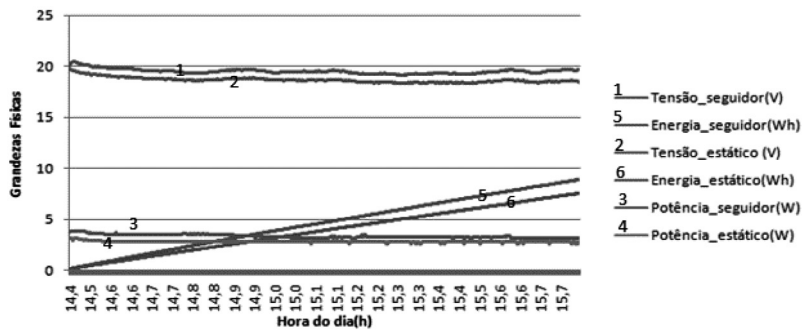


A Figura 9 mostra os dados de energia elétrica produzida e registradas pelo sistema desenvolvido para o mesmo período de leitura exposto na Figura 7. O programa desenvolvido vai somando a energia produzida acumulada durante o período de registro, indicando, assim, a diferença de conversão entre os dois sistemas testados.

O sistema é capaz de calcular e registrar, também, a potência instantânea em cada painel. A Figura 10 mostra, para outro dia de leitura, também em fevereiro de 2017, as linhas de tensão, potência instantânea e da energia acumulada nos dois módulos fotovoltaicos em testes. Verifica-se que os dados são coerentes, pois os painéis utilizados podem converter no máximo 5 J/s de energia. E as duas linhas indicam potências inferiores a 5W.

A Figura 11 mostra mais um gráfico da tensão, potência instantânea à energia para outro dia de medição. Verifica-se que, neste período, após o meio dia solar, entre aproximadamente 14h 20 min e 15h50min, a produção de energia entre os dois módulos foi muito próxima, ou seja, a produção do módulo estático produziu o correspondente a 84,49% da energia produzida pelo painel móvel. Essa medida foi feita no dia 07/02/2017, uma tarde de sol sem nuvens.

Figura 11 - Gráficos da tensão, potência e energia, gerados pelos módulos: móvel e estático (Período do meio dia).



A Tabela II apresenta os dados comparativos entre as leituras feitas, concomitantemente, por um voltímetro comercial (Wavetek 27XT) e os três módulos sensores de tensão, ambas comerciais (B25 - WELSONG). Foi utilizada uma fonte de alimentação Rizzi – CC estabilizada, ref. 6028, para os testes em laboratório. É possível verificar que o erro relativo médio, na leitura da tensão, ficou abaixo de 0,60% em relação ao voltímetro comercial. Nos valores inferiores de tensão, a leitura ficou menor do que a do voltímetro comercial, mas nas tensões superiores, onde há maior conversão fotovoltaica nos painéis, a diferença ficou muito próxima de zero.

A Tabela III mostra os dados comparativos entre as leituras feitas, concomitantemente, por um amperímetro comercial (Wavetek 27XT) e dois módulos sensores de corrente,

desenvolvidos neste projeto (Ainda não foi implementado o terceiro módulo). Foi utilizada uma fonte de alimentação Rizzi – CC estabilizada, ref. 6028, para os testes em laboratório. É possível verificar que o erro relativo médio, na leitura da intensidade de corrente elétrica, ficou abaixo de 1,2% em relação ao voltímetro comercial. Nos valores inferiores de corrente, a leitura ficou menor do que a do amperímetro comercial, mas nas correntes superiores, onde há maior conversão fotovoltaica nos painéis, a diferença ficou muito próxima de zero. O segundo sensor apresenta erro relativo mais elevado, mas este é fortemente influenciado pelo erro na faixa de corrente de 25 a 50 mA, justamente no período de menor incidência solar, trazendo menor prejuízo no registro dos dados.

Tabela II - Tensão lida no voltímetro e nos sensores do protótipo e os correspondentes erros relativos.

Tensão (V)		Erro Relativo (%)				
Voltímetro	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	2,44	2,43	2,43	-2,40	-2,80	-2,80
5,00	4,95	4,94	4,96	-1,00	-1,20	-0,80
7,50	7,46	7,46	7,47	-0,53	-0,53	-0,40
10,00	9,98	9,96	9,98	-0,20	-0,40	-0,20
12,50	12,49	12,47	12,49	-0,08	-0,24	-0,08
15,00	15,00	14,98	15,02	0,00	-0,13	0,13
17,50	17,50	17,49	17,53	0,00	-0,06	0,17
20,00	20,02	20,00	20,04	0,10	0,00	0,20
22,50	22,52	22,51	22,55	0,09	0,04	0,22
Erro Relativo Médio (%)				-0,45	-0,59	-0,39

Tabela III - Intensidade de Corrente Elétrica lida no amperímetro e nos sensores do protótipo e os correspondentes erros relativos.

Intensidade de Corrente Elétrica (mA)			Erro Relativo (%)	
Amperímetro	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
0,00	0,50	0,50	0,00	0,00
25,00	24,10	23,40	-3,60	-6,40
50,00	49,50	48,70	-1,00	-2,60
75,00	74,80	74,20	-0,27	-1,07
100,00	99,90	99,70	-0,10	-0,30
125,00	125,20	124,80	0,16	-0,16
150,00	150,40	149,80	0,27	-0,13
175,00	175,80	175,10	0,46	0,06
200,00	201,30	201,00	0,65	0,50
Erro Percentual Médio (%):			-0,38	-1,12

Considerações Finais

Após cuidadoso trabalho de cálculos, montagens, exaustivos testes em laboratório e em campo é possível afirmar que o sistema de aquisição e registro de dados para painéis fotovoltaicos de até 5W é perfeitamente funcional e exato para o estudo da energia solar fotovoltaica. O erro relativo nas leituras de tensão elétrica e de intensidade de corrente

elétrica, em comparação com um sistema comercial, respectivamente, ficou abaixo de 0,60% e 1,20%.

A partir deste protótipo implementado, é possível desenvolver outros sistemas de leitura e registro de dados para sistemas de maior potência e também para outras aplicações, como monitoramento de residências, de estufas de vegetais, estações meteorológicas entre outras.

REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES. “AD623”. Disponível em: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD623.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. **Banco de Informações de Geração:** capacidade de geração do Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 03 ago. 2017.

FUENTES, M.; VIVAR, M.; BURGOS, J. M.; AGUILERA, J.; VACAS, J. A. Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino that complies with IEC standards. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 130, p.529-543, 2014.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p.126-143, 2015.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES V. L. R. **Cálculo numérico, aspectos teóricos e computacionais**. São Paulo: Makron Books, Ed. 4, 1996.