

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS PONTA GROSSA

MARIANA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE INTENSIDADE DE
RADIÇÃO SOLAR E TEMPERATURA APLICADO NA
OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Ponta Grossa, PR.

2015

MARIANA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE INTENSIDADE DE
RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA APLICADO NA
OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Eletrônica, do
Departamento de Eletrônica
(DAELE), da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Mendes
Casaro

Ponta Grossa, PR

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Engenharia Eletrônica



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR E
TEMPERATURA APLICADO NA OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Por

MARIANA DE OLIVEIRA

Este (a) Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado (a) em 27 de outubro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr. Marcio Mendes Casaro
Prof. Orientador

Dr. Sergio Luiz Stevan Junior
Membro titular

Msc. Julio Cesar Guimarães
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares pela determinação e luta pela minha formação. E também pelo apoio nos momentos mais difíceis durante minha graduação.

Agradeço aos meus colegas de classe, que com certeza serão excelentes profissionais.

Agradeço meu orientador Marcio Mendes Casaro, que por ser um excelente profissional, só me proporcionou muito aprendizado durante minha trajetória. Eu não conseguiria concluir este trabalho sem seu apoio, paciência e imensa dedicação.

Agradeço à Instituição e seu corpo docente pela oportunidade de realização do curso.

E finalmente agradeço a Deus, pois sem ele não teria forças para a conclusão dessa longa jornada.

RESUMO

OLIVEIRA, M. DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA APLICADO NA OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS. 2015. 62 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Este trabalho trata do desenvolvimento um medidor aplicado na operação de painéis fotovoltaicos. O medidor utiliza um painel fotovoltaico para serem realizadas medições. O mesmo é capaz de medir a temperatura das células fotovoltaicas e da intensidade de radiação solar. As características específicas de um módulo fotovoltaico são programadas em um microcontrolador que, através do modelo matemático de uma célula solar, pode reproduzir seu comportamento elétrico. Através da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto, são encontrados indiretamente os valores de intensidade de radiação e a temperatura, respectivamente. Os resultados são atualizados em um display LCD.

Palavras-chave: Medidor. Intensidade de radiação solar. Temperatura das células fotovoltaicas. DSP. LCD.

ABSTRACT

OLIVEIRA, M. **DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA APLICADO NA OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. 2015. 62 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

This paper deals with the development an applied meter in the operation of photovoltaic panels. The meter uses a photovoltaic panel measurements to be performed. The same is capable of measuring the temperature of the photovoltaic cells and solar radiation intensity. The specific characteristics of a photovoltaic module are programmed in a microcontroller that, through the mathematical model of a solar cell, can play their electrical behavior. Through the short-circuit current and the open circuit voltage are found indirectly the radiation intensity values and temperature, respectively. Results will be updated on an LCD display.

Keywords: Meter. Solar Radiation Intensity. Temperature of the Photovoltaic Cells. DSP. LCD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica.....	17
Figura 2: Exemplos de classes de piranômetros. (1) Piranômetro de primeira classe, (2) Piranômetro de segunda classe.....	19
Figura 3: Sensor de silício para irradiação.....	22
Figura 4: Medidor de insolação e temperatura de células fotovoltaicas.....	23
Figura 5: Medidor de radiação solar da MacSolar.....	24
Figura 6: Circuito equivalente de uma célula solar.....	25
Figura 7: Curva característica de corrente e tensão.....	26
Figura 8: O tempo de processamento do método da secante foi de 40 ms. ...	29
Figura 9: O método de Newton está representado com um tempo de processamento de 44 ms.	30
Figura 10: O método da bissecção apresentou um tempo de processamento de 90 ms.....	30
Figura 11: Características da temperatura. Curvas de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e ponto de potência máximo.....	32
Figura 12: Circuito de potência para o módulo fotovoltaico.....	34
Figura 13: Fluxograma do programa utilizado no microcontrolador da Texas Instruments.....	36
Figura 14: Circuito desenvolvido para obter os valores de temperatura e intensidade de radiação.....	38
Figura 15: Amplificadores do circuito de condicionamento, do LM324N.....	40
Figura 16: Board da placa de circuito impresso, com suas trilhas e componentes.....	42
Figura 17: Teste em campo com a placa fotovoltaica, osciloscópio, fonte controlada de tensão, placa de condicionamento e termômetro.....	43
Figura 18: Formas de onda do circuito de condicionamento, em nível alto e baixo. No canal 1 são os pulsos gerados pelo microcontrolador e no canal 2 são as tensões nos terminais do módulo fotovoltaico.....	44
Figura 19: Formas de onda sobre os resistores de 1 Ω , em nível alto e baixo. No canal 1 estão os pulsos gerados pelo microcontrolador e no canal 2 a tensão sobre o resistor de 0,5 Ω	45

Figura 20: Formas de onda condicionadas, nível alto e baixo. No canal 1 estão descritos os pulsos do microcontrolador e no canal 2 a tensão de circuito aberto após o circuito de condicionamento.	46
Figura 21: Formas de onda condicionadas, nível alto e baixo. Obtidas pelos resistores de 1 Ω . No canal 1 são os pulsos de comando no microcontrolador e no canal 2 a tensão proporcional à corrente de curto-circuito, após o circuito de condicionamento.	46
Figura 22: Na primeira imagem está representado o display com a temperatura e na segunda o termômetro, confirmando as medições realizadas.	47
Figura 23: Relação dos pinos do kit do microcontrolador.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação dos medidores de radiação solar.	20
Tabela 2: Componentes utilizados no circuito elétrico da célula solar.....	39
Tabela 3: Relação de pinos utilizados no DSP da Texas Instruments.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

η	Fator de qualidade da junção p-n
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
A/D	Analógico/Digital
FV	Fotovoltaico
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
CRESESB	Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
LCD	Liquid Crystal Display
CI	Circuito Integrado
MPP	Ponto máximo de potência

SIMBOLOGIA

I	Corrente
I_{ph}	Foto corrente
I_r	Corrente de saturação reversa da célula
I_{rr}	Corrente de saturação reversa da referência
R_s	Resistência em série
R_p	Resistência em paralelo
V_{oc}	Tensão de circuito aberto, dos dados da célula
I_{sc}	Corrente de curto-circuito, dos dados da célula
I_{cc}	Corrente de curto-circuito medida
V_{ca}	Tensão de circuito aberto medida
V_t	Tensão nos terminais de saída da célula
P_{sun}	Intensidade de radiação solar
α	Coefficiente de temperatura de I_{sc}

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA	15
1.2 HIPÓTESE	15
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 JUSTIFICATIVA	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	16
2.2 DESEMPENHO DE UMA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	17
2.3 DETECTORES DE RADIAÇÃO SOLAR	18
2.3.1 Piranômetros	19
2.3.2 Medidores para Painéis Fotovoltaicos.....	21
2.4 COMPORTAMENTO FOTOVOLTAICO.....	24
2.4.1 Métodos Matemáticos	29
2.4.2 Aquisições de dados baseadas em Microcontroladores	31
3 METODOLOGIA	32
3.1 MÉTODO DA PESQUISA	32
3.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	33
4 RESULTADOS	35
4.1 PROCESSO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR.....	35
4.2 CIRCUITO ELÉTRICO DE CONDICIONAMENTO	37
4.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	41
4.4 TESTES EM CAMPO.....	43
CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A – Programação do microcontrolador.	54
APÊNDICE B – Relações de pinos do kit da <i>Texas Instruments</i>	62

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é composta basicamente por energia hidráulica e térmica. As usinas hidrelétricas requerem grandes áreas inundadas e a energia térmica apresenta um grande nível de poluição no ar, contribuindo assim para a geração do efeito estufa. (ANEEL, 2013)

Para reduzir tantos impactos ambientais, o Brasil poderia encontrar energias alternativas, como é o caso da energia fotovoltaica e da energia eólica. De acordo com Blaabjerg, Chen e Kjaer (2004), a principal vantagem do investimento em energias renováveis é a eliminação da emissão de gases nocivos para a atmosfera.

Este trabalho é focado na energia solar fotovoltaica (FV). O Brasil possui um vasto território densamente ensolarado. A maior parte está localizada na região intertropical. Nesta área o nível de incidência de radiação solar é consideravelmente maior. Segundo Salamoni e Ruther (2007), a Alemanha recebe 1,4 vezes menos insolação que o Brasil, no entanto, é um dos países com a maior potência de sistemas fotovoltaicos instalados no mundo.

Mesmo as regiões com um menor índice de radiação, apresentam grande potencial de aproveitamento energético. Existe uma vasta gama de pequenos aproveitamentos da energia solar, tais como coletores solar, concentrador solar e entre outros. (ANEEL, 2013)

O rendimento de um sistema de energia solar depende da maneira como ele vai ser explorado. São necessários planejamentos para realizar uma instalação fotovoltaica. Devem ser realizados um dimensionamento adequada para cada instalação. As células devem ser analisadas, realizando diagnósticos. A avaliação do potencial fotovoltaico de uma região também deve ser feita, para poder ter a certeza que é vantajoso a instalação do presente sistema.

Neste sentido foi projetado um medidor radiação solar e temperatura das células solares. Baseado no microcontrolador TMS320F28027 da *Texas Instruments*.

1.1 PROBLEMA

A implementação de um medidor de intensidade de radiação solar e temperatura das células. Baseado no microcontrolador TMS320F28027 da *Texas Instruments*, os resultados das medições apresentados em um display LCD, atende as necessidades de projetos envolvendo sistemas fotovoltaicos?

1.2 HIPÓTESE

Com o uso de um DSP será possível realizar medições de corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto em um painel fotovoltaico. Desta forma, pode-se implementar um algoritmo capaz de determinar a irradiação solar e a temperatura das células FV.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um medidor capaz de apresentar em um display LCD valores de intensidade de radiação solar e de temperatura das células, usando o DSP TMS320F28027, da *Texas Instruments*.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar os métodos matemáticos iterativos para a solução de equações sem soluções analíticas;
- Determinar qual dos métodos estudados é o mais rápido/eficiente;
- Desenvolver um algoritmo para a implementação dos resultados;

- Montar um protótipo do medidor para os painéis.

1.4 JUSTIFICATIVA

O medidor de painéis solares tem várias funções, tais como: capacidade de dimensionar um sistema fotovoltaico, diagnosticar algum problema nas células, projetar um processador de energia solar e avaliar o potencial fotovoltaico de uma determinada região.

Dentre as características listadas, é possível entender que o desenvolvimento de um medidor seria algo de grande utilidade para o uso com módulos fotovoltaicos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

De acordo com o Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (2008), um sistema FV pode ser classificado em três categorias: isolados, híbridos e conectados à rede. Para os sistemas isolados devem ser utilizados armazenadores de energia e controladores de carga. Os sistemas híbridos apresentam várias fontes de energia, na qual é preciso um controle de todas estas fontes para haver maior eficiência. Por último existem os sistemas conectados à rede, que precisam apenas de um inversor, pois toda a energia que é captada é entregue diretamente na rede.

Carneiro (2009) explica que a principal função dos armazenadores de energia (baterias) em um sistema fotovoltaico é assegurar a alimentação de energia elétrica quando os recursos solares não estiverem disponíveis.

Quando existem os acumuladores de energia, é preciso usar controladores de carga, pois são eles que irão gerenciar a carga e descarga da bateria para um módulo solar.

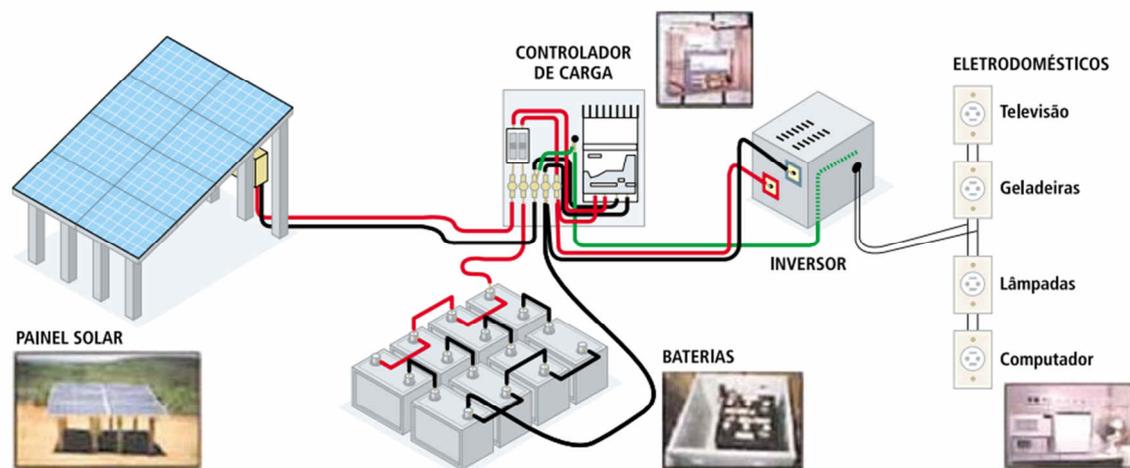


Figura 1: Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica.

Fonte: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB (2000). Disponível em: www.cresesb.cepel.br/cresesb.htm (adaptado).

Em gerações distribuídas, a função do inversor é fundamental, pois diferentemente de estações com geradores convencionais, estas fontes de energia operam com velocidades variáveis. Portanto o papel da eletrônica de potência é relacionar as unidades de geradores distribuídos com os requisitos da rede, minimizando os harmônicos, controlando a potência reativa e ativa, controlando a tensão e frequência. (BLAABJERG, CHEN e KJAER, 2004). Como ilustrado na figura 1.

2.2 DESEMPENHO DE UMA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Para se obter um bom desempenho de um sistema FV, deve haver a disponibilidade das informações relativas a meteorologia de uma determinada região. Tais como a irradiação, temperatura, umidade, o índice de claridade, a velocidade do vento, entre outros fatores. (MELLIT, KALOGIROU e HONTORIA, 2009).

As condições meteorológicas podem afetar o desempenho do sistema FV. A construção e o diagnóstico das células também influenciam no desempenho das células solares.

Kjaer, Perderson e Blaabjerg (2005) ao analisarem os processos de construção dos módulos fotovoltaicos afirmam que os modelos mais comuns na atualidade são os monocristalinos e os silício-policristalinos. Os mais caros são os monocristalinos, por exigirem um elevado grau de pureza na produção do silício.

Estes problemas causam baixos rendimentos em um arranjo fotovoltaico. Quaschnig e Hanitsch (1996) destacam que os sombreamentos parciais nos geradores solares podem causar altas perdas na sua atuação.

A investigação dos fatores que afetam a eficiência dos módulos pode ser feita antecipadamente, com o uso de medidores de intensidade de radiação e temperatura para painéis solares. Estes aparelhos podem avaliar a radiação incidente e também medir a temperatura das células.

2.3 DETECTORES DE RADIAÇÃO SOLAR

Instrumentos solarimétricos são capazes de medir a potência incidente por unidade de superfície, sobre os diversos tipos de onda. As medições padrões são a radiação total, a componente difusa no plano horizontal e a radiação direta normal. Para cada tipo de medição de radiação está correlacionado um instrumento de medida. (ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2000)

Os pireliômetros são usados apenas para medidas de radiação solar direta. Paes (2012) explica que normalmente eles seguem o movimento do Sol para focalizar melhor a região do sensor. O Atlas Solarimétrico do Brasil (2000) também relata que eles são instrumentos de precisão que possuem erros na faixa de 0,5% nas suas medições.

Os heliógrafos são instrumentos que medem a duração da insolação, que vem a ser o período de tempo que a radiação supera um dado valor referencial, afirma o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

Os pirradiômetros são usados para medidas da radiação total, no qual são utilizados detectores térmicos, pois cobrem uma ampla faixa espectral.

Pirgeômetros são instrumentos de medida de radiação que possui comprimentos de onda longos, são utilizados detectores térmicos e filtros óticos para diminuir a radiação dos comprimentos de onda curtos (radiação solar). E por fim os piranômetros que medem a radiação solar global (direta e difusa). (PAES, 2012)

Para as medições com painéis FV os tipos de radiômetros mais adequados são os piranômetros.

2.3.1 Piranômetros

A OMM (Organização Mundial de Meteorologia) estabelece normas onde constam os limites de precisão para alguns instrumentos, tais como: referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe. (OMM, 2008)

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2008) cita que os piranômetros de primeira classe apresentam 2% de precisão e os piranômetros de segunda classe apresentam 5% de precisão. A figura 2 apresenta os tipos de piranômetros, relacionando-os às classes.



Figura 2: Exemplos de classes de piranômetros. (1) Piranômetros de primeira classe, (2) Piranômetros de segunda classe.

Fonte: Romiotto Instrumentos de medição.

Disponível em: www.romiotto.com.br (adaptado)

Os piranômetros são compostos por semiesferas de vidro, uma superfície absorvente, termo elementos e concha de metal. Seu funcionamento é baseado na travessia da radiação pela esfera de vidro que, quando é inserida na superfície absorvente, é aquecida. Este aquecimento está diretamente relacionado a quantidade de radiação. (MANUAL DE ENERGIA FOTOVOLTAICA, 2004).

Existem diversas aplicações, desde medições em painéis fotovoltaicos, até para agricultores. Os produtores fazem uso dessa tecnologia para obterem melhores resultados no crescimento das suas plantações, principalmente em estufas. É aplicado também nas construções para serem combinados painéis solares com as edificações, destacam a PCE *Instruments* (2013).

Na tabela 1 estão descritos alguns aparelhos portáteis, com suas devidas especificações.

Tabela 1: Comparação dos medidores de radiação solar.

Fabricante/ Origem	Modelo	Faixa de Radiação Solar	Resposta Espectral	Resposta do Cosseno
Kimo/ França	SL 100	1 W/m ² a 1300 W/m ²	400 a 1100 nm	Correção de até 80° do ângulo de incidência
PCE/ Reino Unido	SPM 1	0 a 2000 W/m ²	400 a 1000 nm	Correção de até 60° do ângulo de incidência
Apogee/ Estados Unidos	MP 100	0 a 1999 W/m ²	380 a 1120 nm	45° ângulo zênite: ± 1% 75° ângulo zênite: ± 4%
Li-Cor/ Estados Unidos	LI 200SA	0 a 1999 W/m ²	280 a 2800 nm	Correção de até 80° do ângulo de incidência

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 1 foram exemplificadas as faixas de radiação de cada equipamento, a resposta espectral e a correção do cosseno. Essas características são muito importantes para serem realizadas as medições de irradiação solar.

Dentre os parâmetros que podem ser analisados nos medidores, a correção do cosseno é um fator que é considerado um dos diferenciais entre os aparelhos de medida. Vilela (2010) afirma que é fundamental que os aparelhos obedeçam à lei dos cossenos, caso não obedeçam há necessidade de haver um mecanismo que faça a correção dos valores medidos.

Os sensores de radiação da *Skye* têm o cosseno totalmente corrigido, significando que as medidas da luz recebidas pelo hemisfério serão independentes do ângulo do Sol. Os medidores são capazes de encontrar qual é o melhor ângulo e direção da radiação para a placa solar ser instalada. (SKYE INSTRUMENTS LTD, 2007).

Munner (2004) explica que muitos dos instrumentos de medição demonstram erros à resposta do cosseno. Devido ao ângulo de incidência dos raios solares. Quanto mais agudo for o ângulo (no nascer ou no pôr do Sol), maior será o erro que o aparelho vai mostrar.

Os outros erros que podem ser encontrados são: azimute e da temperatura, seletividade espectral, estabilidade, não linearidade, instabilidade térmica e deslocamento de origem devido ao resfriamento radiativo noturno.

2.3.2 Medidores para Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos não respondem a todas as cores de luz igualmente. O espectro de luz solar muda com a hora do dia, com a época do ano, com o albedo, localização, teor de umidade e entre outros. Além do mais, os módulos são construídos com vidros planos, no qual a reflexão é em função do ângulo de incidência da luz solar. (MEYDBRAY et al, 2012)

Meydbray (2012) relaciona que células de referência e piranômetros apresentam diferenças relacionadas as suas medições em painéis FV. Isso

ocorre pelo fato de piranômetros serem feitos com discos pretos, cobertos por vidros simples, duplos ou cúpulas de quartzo, absorvendo toda a luz solar irradiada na cúpula. Diferentemente das células solares, eles também respondem à todas as cores de luz. Eles medem a incidência dos raios na “banda larga”, no qual o autor afirma que é similar, mas não é igualmente às medições das células solares. Os piranômetros se diferem também à resposta da luz difusa e em medições em dias nublados.

Em vista destas colocações, para serem levantados dados precisos de módulos solares, são necessários dispositivos específicos para painéis fotovoltaicos, o sensor de radiação de silício é um exemplo.

A *IMT Solar* produz o sensor de silício para irradiação, o qual está apresentado na figura 3. Seus sensores utilizam células solares monocristalinas de alta precisão e qualidade. A baixa resistência à derivação faz com que estas células operem perto do ponto de curto-circuito. (IMT, 2012)



Figura 3: Sensor de silício para irradiação.

Fonte: *IMT Solar* (2012, p. 1)

Há também o modelo da *Benning Solar* (2012). O equipamento deste fabricante alemão (figura 4) é capaz de captar a insolação (W/m^2), a

temperatura do ambiente e a temperatura das células solares. Ele é ideal para o planejamento e inspeção de um sistema fotovoltaico.

O equipamento da *Benning Solar* também tem uma bússola e as funções de um inclinômetro, podendo determinar a inclinação do módulo/telhado em relação ao solo.



Figura 4: Medidor de insolação e temperatura de células fotovoltaicas.

Fonte: Manual da *Benning Solar*. (2012, p. 1)

A *MacSolar* integrou um microcontrolador e um sensor de temperatura. O sensor está acoplado no equipamento, que está representando na figura 5. Podendo assim simular características típicas de um painel fotovoltaico, tal como a corrente, a tensão e saída em MPP (máximo ponto de potência). (MACSOLAR, 2011)



Figura 5: Medidor de radiação solar da MacSolar.

Fonte: Manual da *MacSolar* (2011, p. 1)

Outro equipamento é o TMPV. Este é capaz de medir radiação solar, tensão e corrente CA/CC, continuidade e resistência. Este medidor tem duas finalidades, pois pode ser um multímetro e um medidor de irradiação, simultaneamente. Este multímetro permite medições com rapidez da tensão de circuito aberto do módulo solar (V_{oc}) e da corrente de curto-circuito (I_{sc}). Desta forma pode-se determinar o rendimento de uma célula solar.

2.4 COMPORTAMENTO FOTOVOLTAICO

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo capaz de converter a luz diretamente em energia elétrica, pelo efeito fotovoltaico. (BENDEL E WAGNER, 2003)

Para a radiação solar ser obtida com o uso de microcontroladores, primeiramente é preciso entender o comportamento de uma célula. Assim, deve-se usar um modelo que foi criado para ser eletricamente equivalente a um módulo fotovoltaico. Representado na figura 6. (CASARO, 2009).

Neste circuito, há um diodo de silício. Este diodo corresponde à junção PN de uma célula solar fotovoltaica. Quando iluminada, são gerados pares de cargas P e N capazes de fluir por um circuito fechado. Logo, é necessário

incluir uma foto corrente. Há uma queda de tensão, quando os portadores de carga migram do semiconductor para os contatos elétricos, assim a resistência R_s é inserida. A resistência em paralelo descreve a corrente de fuga inversa.

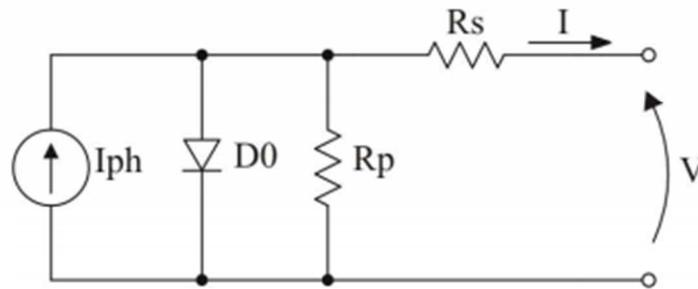


Figura 6: Circuito equivalente de uma célula solar.

Fonte: Marcio Mendes Casaro (2009).

O equacionamento do circuito elétrico da figura (6) está representado na fórmula (1).

$$I = I_{ph} - I_r \left[e^{q \cdot \frac{V+I.R_s}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

- I é a corrente do terminal de saída;
- I_{ph} é a foto corrente;
- I_r é a corrente de saturação reversa da célula;
- q é a carga do elétron. $1,6 \times 10^{-19}$ C;
- V é a tensão do terminal de saída;
- R_s, R_p é a resistência em série e em paralelo;
- η é o fator de qualidade de junção p-n;
- k é a constante de Boltzmann. $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;
- T é a temperatura da célula, K.

A solução desta equação resulta em uma curva IV, ilustrada na figura 7, porém não pode ser resolvida analiticamente. Para a resolução da equação solar, no presente trabalho, são necessárias a temperatura e a radiação como entradas.

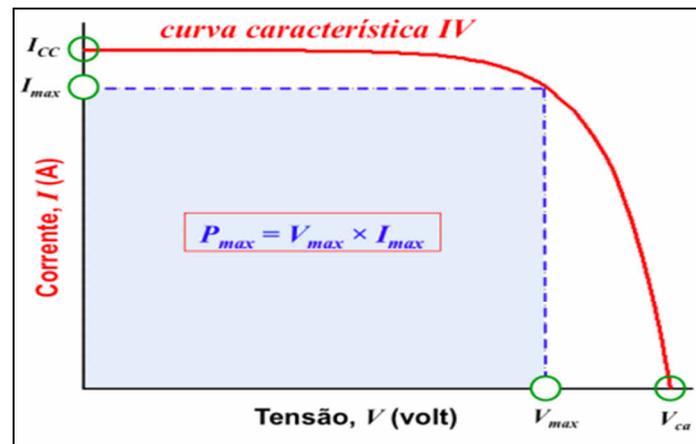


Figura 7: Curva característica de corrente e tensão.

Fonte: Mukaro (1998).

Como há necessidade de ser encontrada a temperatura e a intensidade de radiação, serão necessárias algumas equações matemáticas.

A equação 1, que já foi descrita será utilizada para todas as manipulações que serão realizadas.

Na equação 2 está representada a foto corrente:

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha * (T - T_r)] * \frac{P_{sun}}{1000} \quad (2)$$

Onde:

I_{ph} é a foto corrente;

I_{sc} é a corrente de curto circuito, dos dados da célula;

α é o coeficiente de temperatura de I_{sc} ;

T é a temperatura da célula;

T_r é a temperatura de referência;

P_{sun} é a intensidade de radiação.

Na equação 3 será calculada a corrente de saturação reversa da célula, a partir da equação 1.

$$I_r = I_{rr} * \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 * e^{\frac{q*EG}{\eta*k} * \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)} \quad (3)$$

Onde:

I_r é a corrente de saturação reversa da célula;

I_{rr} é a corrente de saturação reversa de referência;

EG é energia de banda proibida: 1,1 eV;

η é o fator de qualidade da junção p-n;

k é a constante de Boltzmann: $1,38 \cdot 10^{-23}$;

Na equação 4, I_{rr} precisa ser calculada, as demais podem ser obtidas por catálogo ou são estimadas. Sendo assim, I_r será calculada a partir da equação 1, onde I será igual a 0, V será igual a V_{oc} e T será igual a T_r .

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\frac{q*V_{oc}}{e*\eta*k*T_r} - 1} \quad (4)$$

Na equação 5, sendo I_{rr} uma constante, pode-se estimar P_{sun} e T . Para estimar P_{sun} , considera-se $V=0$ e $I=I_{cc}$, partindo da equação 1.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_r * \left(e^{\frac{q * I_{cc} * R_s}{\eta * K * T}} - 1 \right) - I_{cc} * \frac{R_s}{R_p} \quad (5)$$

Isolando I_{ph} tem-se:

$$I_{ph} = I_{cc} + I_r * \left(e^{\frac{q * I_{cc} * R_s}{\eta * K * T}} - 1 \right) + I_{cc} * \frac{R_s}{R_p} \quad (6)$$

Sendo I_{ph} definido na equação 2, só isolar P_{sun} .

$$P_{sun} = 1000 * \frac{I_{ph}}{I_{sc} + \alpha(T - T_r)} \quad (7)$$

Repete-se o mesmo processo para estimar T , agora considera-se $V = V_{ca}$ e $I = 0$, a partir da equação 1.

$$0 = I_{ph} - I_r * \left(e^{\frac{q * V_{ca}}{\eta * K * T}} - 1 \right) - \frac{V_{ca}}{R_p} \quad (8)$$

Para obter a equação 9, substitui a equação 2 e 3 na equação 8.

$$f(T) = [I_{sc} + \alpha * (T - T_r)] * \frac{P_{sun}}{1000} - I_{rr} * \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 * e^{\frac{q * E_g}{\eta * k} * \left(\frac{T}{T_r} \right)^3} * \left(e^{\frac{q * V_{ca}}{\eta * K * T}} - 1 \right) - \frac{V_{ca}}{R_p} \quad (9)$$

Com os dados de equacionamento de uma célula solar, agora podem ser implementados algoritmos que resolvam o modelo matemático proposto acima e assim ser feito o projeto de um medidor.

2.4.1 Métodos Matemáticos

Ao serem realizados cálculos para o microcontrolador, primeiramente foram estudados os métodos matemáticos existentes. Os métodos foram o da bissecção, da secante, da falsa posição e o de Newton.

Para cada método foi realizado um teste com o osciloscópio. Foram testados os tempos de processamento do programa no osciloscópio, sendo possível obter qual dos tempos responderia melhor. A justificativa para a escolha do melhor método foi baseada na garantia de convergência e rapidez nos resultados.

O método da falsa posição não obteve convergência nos testes, porém os outros métodos apresentaram bons resultados. O da secante apresentou um tempo de processamento de 40 ms (figura 8), o método de Newton apresentou um tempo de 44 ms (figura 9) e o método da bissecção obteve um tempo de 90 ms, ilustrado na figura 10.

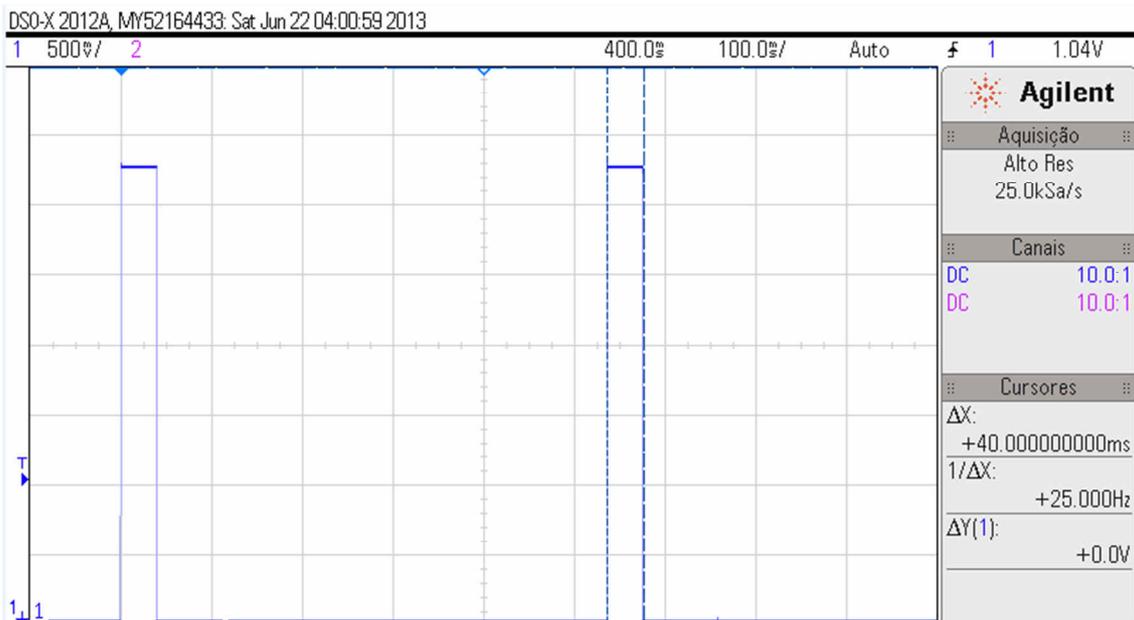


Figura 8: Tempo de processamento do método da secante: 40 ms.

Fonte: Autoria própria.

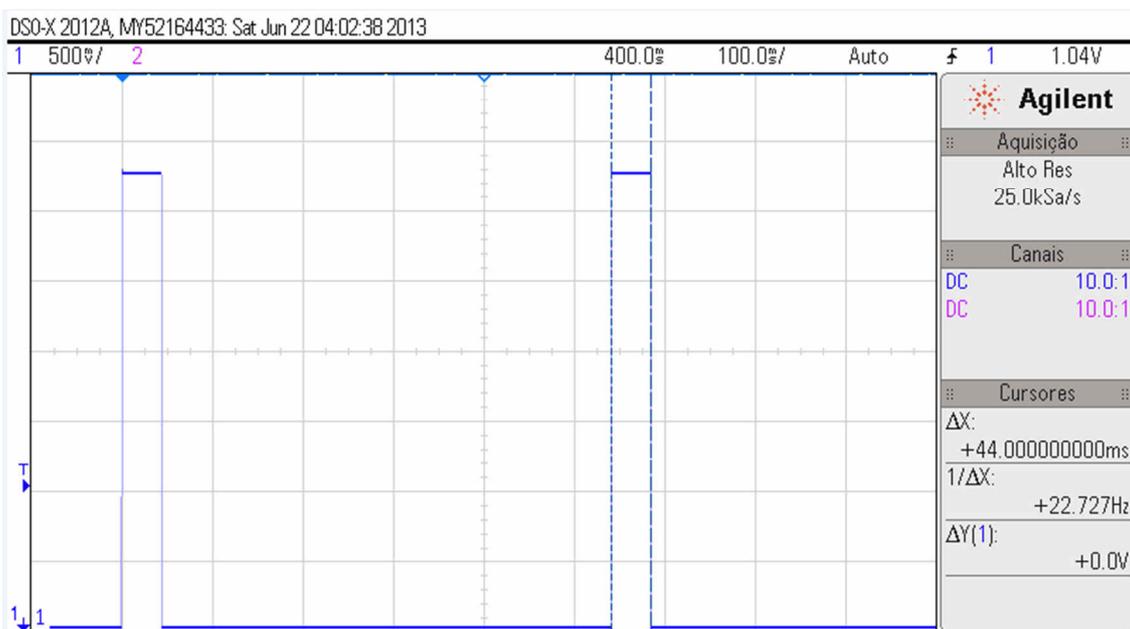


Figura 9: Tempo de processamento para o método de Newton: 44 ms.

Fonte: Autoria própria.

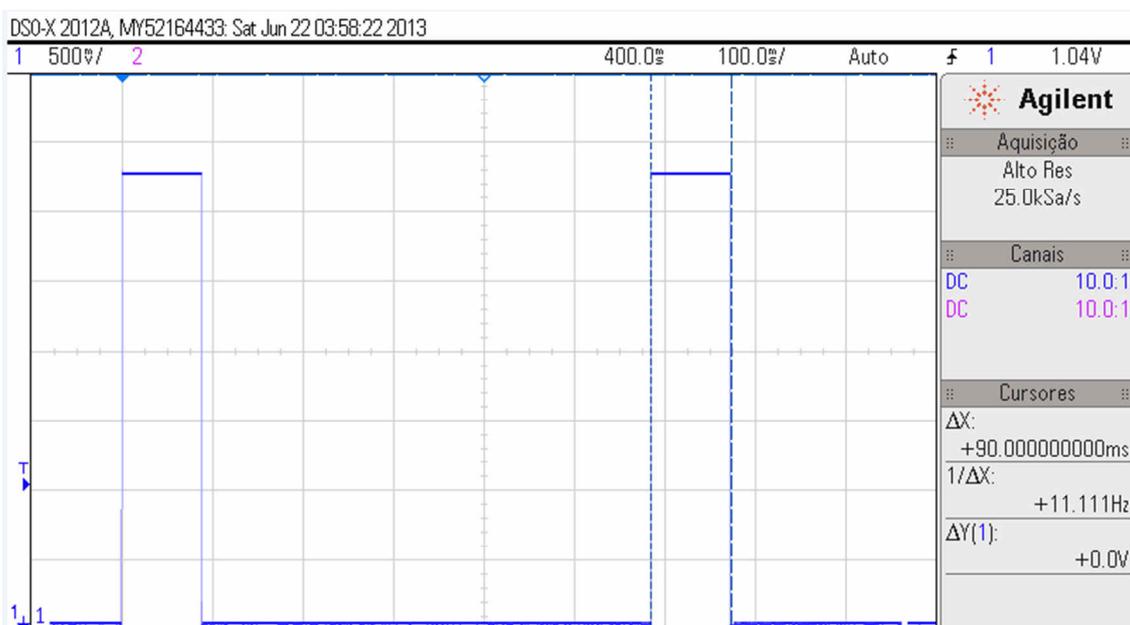


Figura 10: Tempo de processamento para o método da bissecção: 90 ms.

Fonte: Autoria própria.

Se fosse considerado o menor tempo, o melhor método seria o da secante. Porém deve ser considerado a convergência dos métodos, neste caso o que apresenta uma convergência mais aceitável é o método da bissecção.

2.4.2 Aquisições de dados baseadas em Microcontroladores

Muitos instrumentos podem ser usados para a aquisição de dados em medições de painéis fotovoltaicos. Mas, o uso de microcontroladores faz com que possam ser construídos sistemas de monitoramentos de baixo custo. (PEREIRA e BRITO, 1990)

Koutroulis, Kalaitzakis e Voulgaris (2001) explicam que a variação de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico são relacionados com a mudança de temperatura e radiação. Desta forma, um microcontrolador pode ser programado para quando a corrente de saída sofrer variação, logo significa que a radiação solar foi alterada. Quando a tensão de saída for variada, o parâmetro modificado foi a temperatura.

Na figura 11 estão demonstradas curvas características de um arranjo fotovoltaico. Cada curva tem seu ponto máximo. O ponto máximo da V_{oc} aproximadamente 1,25%. O ponto máximo de P_{max} é 1,35% e o ponto máximo de I_{sc} é aproximadamente 1. Cada ponto máximo, é o melhor ponto para o uso eficiente do painel solar. Quando a temperatura é aumentada, a tensão de circuito aberto e a energia máxima diminuem. Porém, a corrente de curto-circuito é aumentada lentamente. (HUA, LIN e SHEN, 1998)

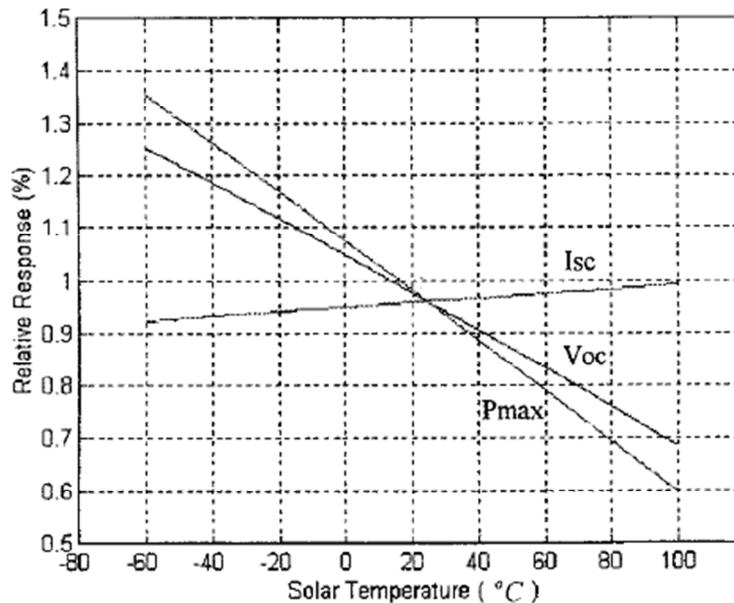


Figura 11: Características da temperatura. Curvas de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e ponto de potência máximo.

Fonte: Hua, Lin e Shen (1998, p. 100)

Em projetos de alguns medidores com o uso de DSPs, são usados controladores digitais, com conversores A/D. Os conversores têm a função de amostrar quando a corrente e a tensão estiverem variando.

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODO DA PESQUISA

O presente trabalho enquadra-se em uma pesquisa classificada como aplicada, pois terá uma aplicação na prática. Na abordagem, a pesquisa é exploratória. Afinal, tem o objetivo de desenvolver algo novo para a tecnologia. Em relação a forma de análise dos dados é classificada como explicativa, pois também define modelos teóricos e os explica no contexto desenvolvido.

Os objetos de estudos são considerados experimentais, pois os procedimentos das coletas de dados são realizados em laboratórios nos quais são criadas técnicas e condições adequadas para a aquisição dos resultados.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

As etapas para o desenvolvimento do presente trabalho consistem em primeiramente analisar os medidores de radiação solar e de temperatura, bem como, suas especificações em manuais do fabricante. Esses medidores foram analisados para serem comparados com o projeto que foi realizado.

Após esta etapa, torna-se necessário analisar o equacionamento de um modelo da corrente de uma célula fotovoltaica. Esta equação apresenta uma solução que não é analítica. A qual pode ser resolvida numericamente.

A próxima etapa foi desenvolver um novo algoritmo. Este fez a comparação das grandezas lidas (V_{oc} e I_{sc}) de um painel real com as grandezas geradas digitalmente.

As mencionadas grandezas são influenciadas pela temperatura e pela intensidade de radiação solar. Assim, espera-se que, da comparação, se possa determinar indiretamente os valores de temperatura e radiação solar. Esses valores foram apresentados em um display LCD de 2x16.

Para que possam ser feitas as medições de V_{oc} e I_{sc} , foi implementado um circuito eletrônico de potência que foi feito para periodicamente curto-circuitar os terminais do painel fotovoltaico. Em estudos preliminares, montou-se um protótipo deste circuito. O mesmo se mostrou capaz de curto-circuitar os terminais de um painel fotovoltaico de 65 W a partir dos comandos recebidos do microcontrolador. A figura 12 ilustra o esquemático do circuito proposto.

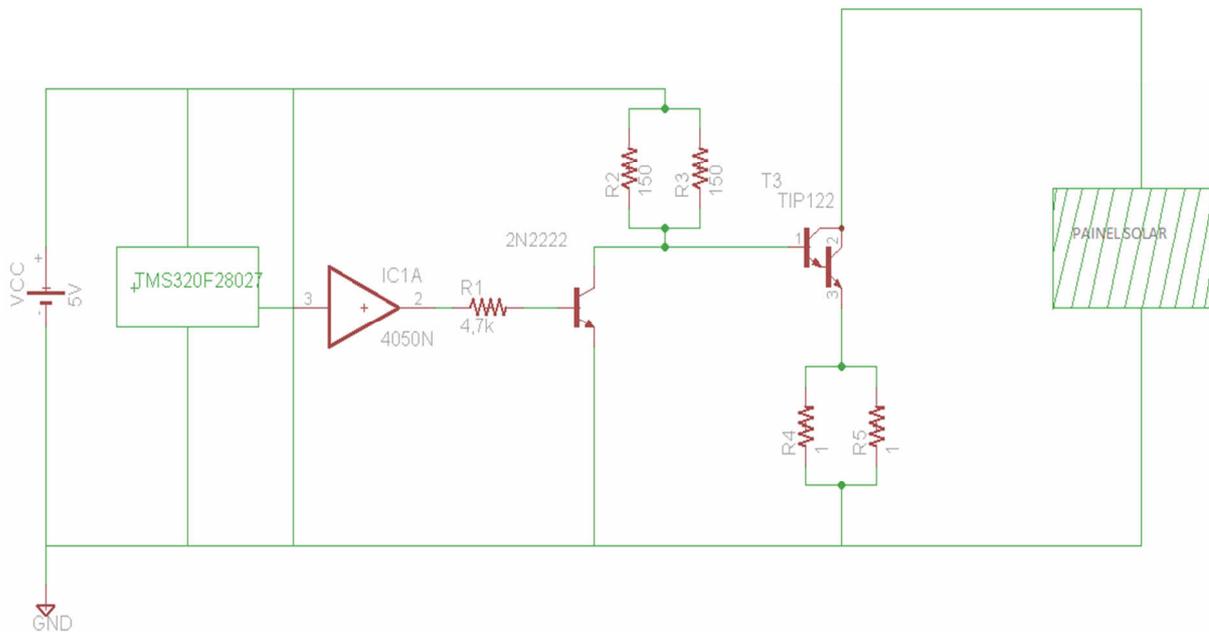


Figura 12: Circuito de potência para o módulo fotovoltaico.

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se na figura anterior que o transistor TIP122 representa o estágio de potência. Porém, para evitar sobrecargas no microcontrolador, o sinal de comando passa pelo CD4050 e 2N2222. Os pontos nos quais foram monitoradas a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito ficaram entre o coletor e o emissor do TIP122, respectivamente. Podem ser necessários filtros antes que essas variáveis sejam lidas pelo conversor analógico/digital do microcontrolador.

Após todos esses processos, foram feitas as medições com o medidor e um painel fotovoltaico. O mesmo foi localizado no Câmpus Ponta Grossa da UTFPR.

4 RESULTADOS

4.1 PROCESSO PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR

Recapitulando o que foi realizado no projeto: foram adquiridos valores de temperatura e intensidade de radiação de uma célula solar. Esses valores foram adquiridos indiretamente, ou seja, quando os terminais da placa fotovoltaica estavam com tensão de circuito aberto, foi monitorada a temperatura. Quando os valores do painel estavam com seus valores de corrente em curto-circuito, foi adquirida a intensidade da radiação solar.

Esses valores foram transferidos ao DSP, pelas entradas analógicas e serão transformados em grandezas digitais. Essas grandezas serão lidas no painel LCD.

Assim, para entender o processo como um todo, está representado na figura 13 um fluxograma. Este apresenta desde da inicialização das variáveis até o envio dos valores para o display. Essa programação foi desenvolvida em linguagem C e está representada no apêndice A.

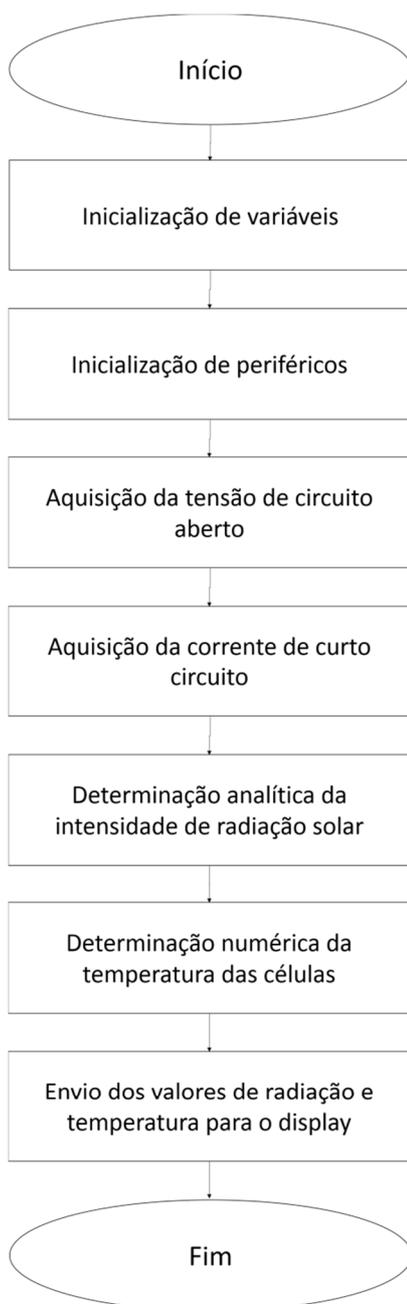


Figura 13: Fluxograma do programa utilizado no microcontrolador da Texas Instruments.

Fonte: Autoria própria.

Como o painel têm seus terminais abertos, de acordo com o fluxograma, o primeiro passo foi obter os dados de V_{ca} . Esse valor foi transferido para o DSP e após isso o painel foi curto-circuitado, I_{cc} foi medida e convertida em grandeza digital.

Assim a primeira estimativa foi feita com P_{sum} , com um valor pré-definido de temperatura (T). Como o valor da intensidade (P_{sun}) se aproximou do real, foi possível ser usado em uma nova estimativa de T , a qual foi bem precisa.

Para esses valores de temperatura e intensidade de radiação serem obtidos, houve a necessidade de construir um circuito elétrico. Este foi responsável pela obtenção dos dados.

4.2 CIRCUITO ELÉTRICO DE CONDICIONAMENTO

O circuito elaborado, descrito na figura 14, apresenta um DSP que foi o gerador de pulsos, um CI LM324N e dois transistores, como principais componentes do circuito elétrico.

Tabela 2: Componentes utilizados no circuito elétrico da célula solar.

Componente	Descrição	Valor
X9	Conector de três entradas	
X2, X3 e X4	Conector de duas entradas	
T1	2N2222	
R1	Resistor	4,7k Ω
R2	Resistor	270 Ω
R3	Resistor	1 Ω
R4	Resistor	3,3k Ω
R5	Resistor	3,3k Ω
R6	Resistor	100 Ω
R7	Resistor	3,3k Ω
R8	Resistor	100 Ω
R9	Resistor	5,6k Ω
R10	Resistor	1 Ω
R11	Resistor	3k Ω
R12	Resistor	100 Ω
R13	Resistor	8,2k Ω
R14	Resistor	2,2k Ω
C1	Capacitor	10n F
C2	Capacitor	10n F
C4	Capacitor	100n F
U\$3	LM324N	

Fonte: Autoria própria.

No diagrama elétrico também foi incluído um circuito de condicionamento. Este circuito foi adicionado pois as grandezas têm que ser padronizadas para serem lidas pelo DSP, pois o microcontrolador trabalha com corrente máxima de 4 mA e tensão abaixo de 3 V.

Os amplificadores que fazem parte deste circuito foram representados na figura 15. Eles amplificam corrente e tensão. Os amplificadores estão divididos em três circuitos. No circuito 1 há dois amplificadores, sendo um

buffer e o outro não inversor. O circuito 2 também apresenta um amplificador não inversor e no circuito 3 está sendo usado um amplificador comparador.

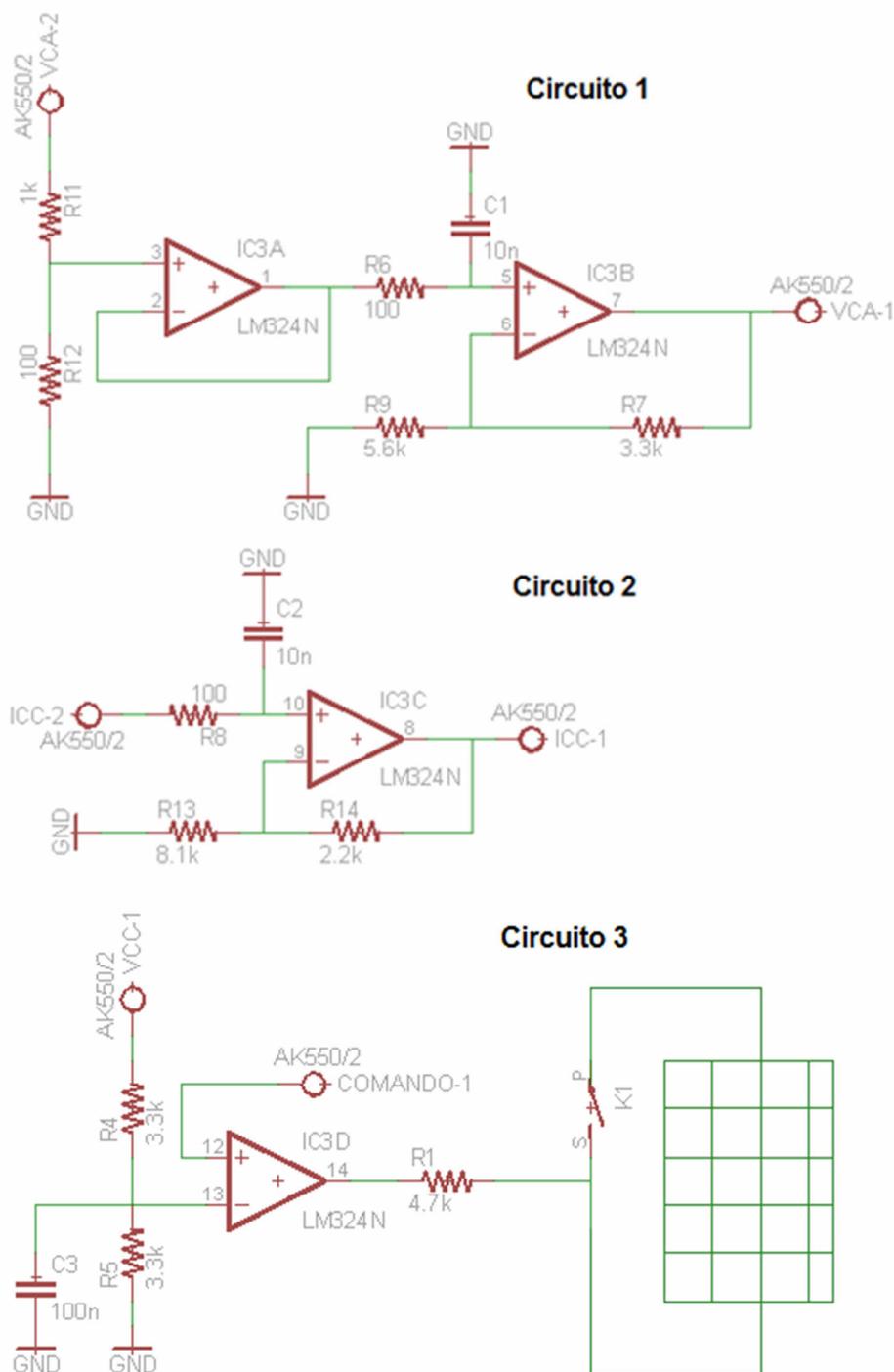


Figura 15: Amplificadores do circuito de condicionamento, do LM324N.

Fonte: Autoria própria.

Os pulsos enviados pelo GPIO de comando, no circuito 3 (figura 15), passarão pelo circuito de condicionamento. A chave representada de forma simplificada no circuito 3, corresponde a um transistor TIP122. Embora esse transistor, já tenha um ganho elevado, ainda existe um 2N2222, que é responsável pela sua saturação e bloqueio.

O GPIO corresponde ao pino 34 do microcontrolador. O processo para a geração de pulsos irá ocorrer da seguinte forma: quando a chave estiver fechada a grandeza lida será a tensão de circuito aberto. Quando a chave estiver aberta, a grandeza lida será a corrente de curto-circuito.

Em série com a placa solar, foram colocados dois resistores em paralelo, com equivalência de $0,5 \Omega$. Essa resistência foi incluída para redução da tensão da placa fotovoltaica e assim permitir a leitura da corrente de curto-circuito.

Na tabela 3 do apêndice B, estão relacionadas todas as entradas que estão sendo usadas no DSP. Algumas para ADC, outras para os pinos do GPIO e também para serem usadas no display LCD. Na figura 23 do apêndice B está a relação dos pinos utilizados no presente programa.

4.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Para a elaboração do circuito elétrico, foi utilizado o *software Eagle*. De acordo com o *CadSoft* (2000) o programa é um sistema de projetos eletrônicos que permite o desenho do diagrama esquemático e a geração da placa de circuito impresso. O *layout* que foi realizado está descrito na figura 16.

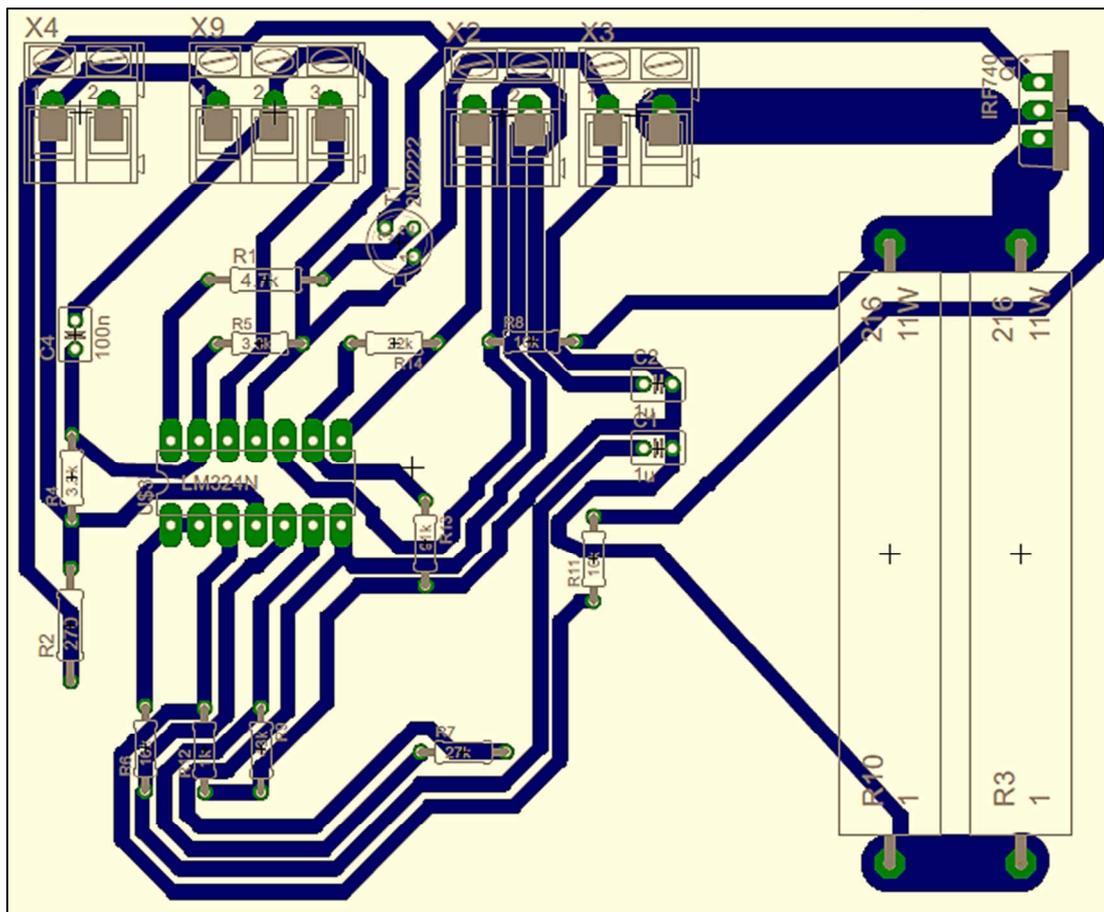


Figura 16: Board da placa de circuito impresso, com suas trilhas e componentes.

Fonte: Autoria própria.

Neste *layout* foram realizadas as trilhas de potência com espessura maior que as trilhas de comando. Para desenhar as trilhas no programa, deve-se tomar alguns cuidados para não deixar as trilhas com 90° e nem as deixar muito próximas.

Para ser elaborado este *layout* houve a necessidade de trocar o TIP122 pelo IRF740. Essa troca foi realizada pelo fato que a prototipadora não consegue realizar as furações de forma correta com os pinos do TIP122, mas o transistor não foi trocado, apenas o *layout*.

Foram soldados os componentes na placa, para assim utilizá-lo com a célula solar para os testes em campo.

4.4 TESTES EM CAMPO

Os testes foram realizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Ponta Grossa. Foram usados os seguintes equipamentos: uma placa fotovoltaica, o DSP, a placa de condicionamento construída, um osciloscópio, uma fonte controlada e um termômetro.

A placa apresentaria melhor desempenho em um dia ensolarado. Na figura 17, estão ilustrados os equipamentos utilizados.

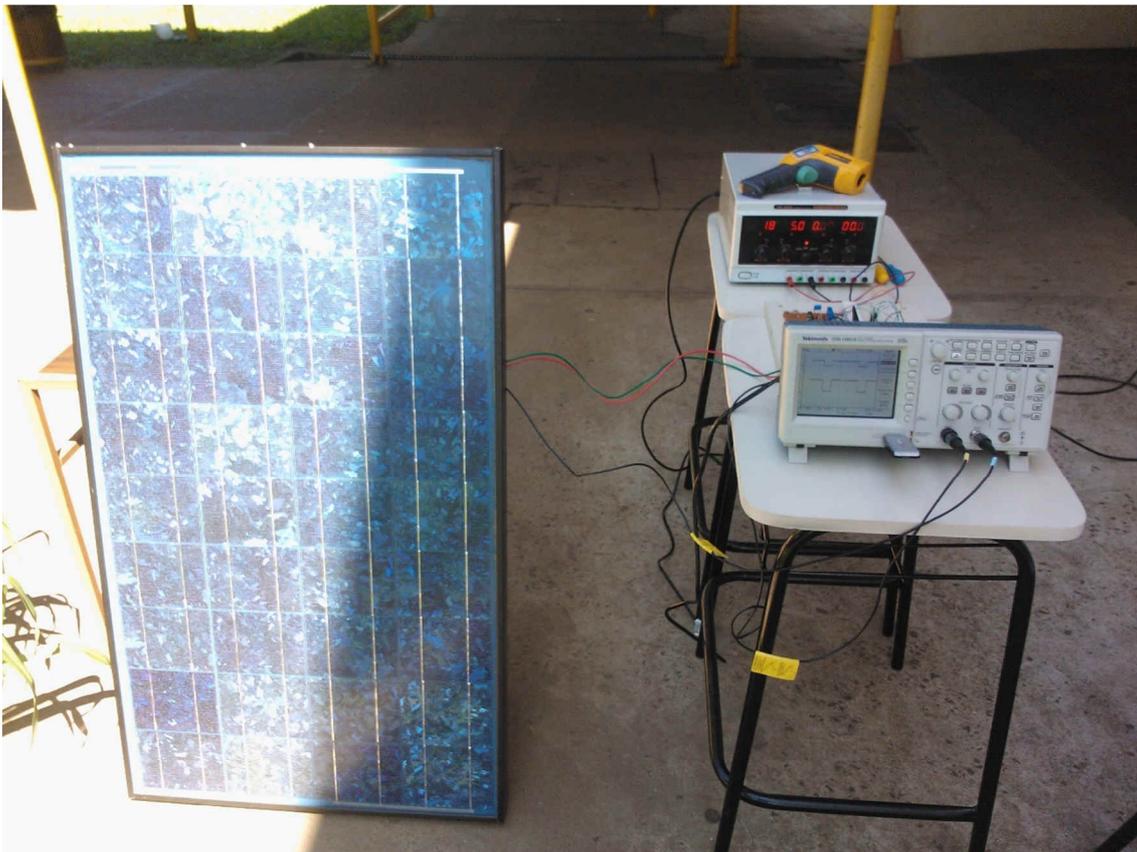


Figura 17: Teste em campo com a placa fotovoltaica, osciloscópio, fonte controlada de tensão, placa de condicionamento e termômetro.

Fonte: Autoria própria.

Após a calibragem, foram realizados novos testes e estes apresentaram bons resultados, ou seja, a temperatura das células coincidiu com a medição de um termômetro digital.

Para ilustrar melhor o trabalho, as formas de onda obtidas no osciloscópio são mais explicativas. Elas mostram o comportamento do circuito de condicionamento.

Em todas elas foram usadas o sinal de comando do microcontrolador como referência. Quando o sinal do microcontrolador estava em alta, a chave estava fechada. A grandeza que aparecia nos terminais do módulo fotovoltaico, era a de tensão de circuito aberto. Logo, a temperatura.

Quando o sinal do microcontrolador estava em baixa, o módulo fica em curto-circuito, pois a chave estava aberta. A tensão não chegava a zerar, pela queda de tensão sobre os resistores de $1\ \Omega$ e a queda de tensão na chave. A grandeza lida era o curto-circuito.

Na figura 18 estão representadas as formas de onda. No canal 1 são os pulsos gerados pelo microcontrolador e no canal 2 são as tensões nos terminais do módulo fotovoltaico.

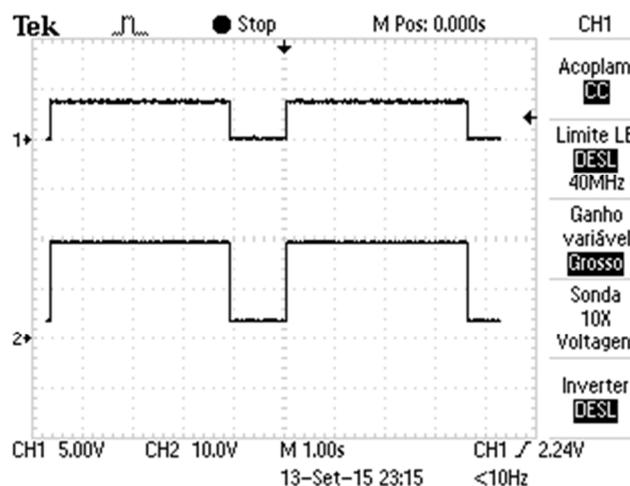


Figura 18: Formas de onda do circuito de condicionamento, em nível alto e baixo. No canal 1 são os pulsos gerados pelo microcontrolador e no canal 2 são as tensões nos terminais do módulo fotovoltaico.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 19, estão descritos os valores que apareceram nos resistores de $1\ \Omega$. A tensão foi baixa, logo apareceu uma corrente próxima a corrente de curto-circuito do módulo.

No canal 1 são os pulsos gerados pelo microcontrolador e no canal 2 a tensão sobre o resistor de $0,5 \Omega$.

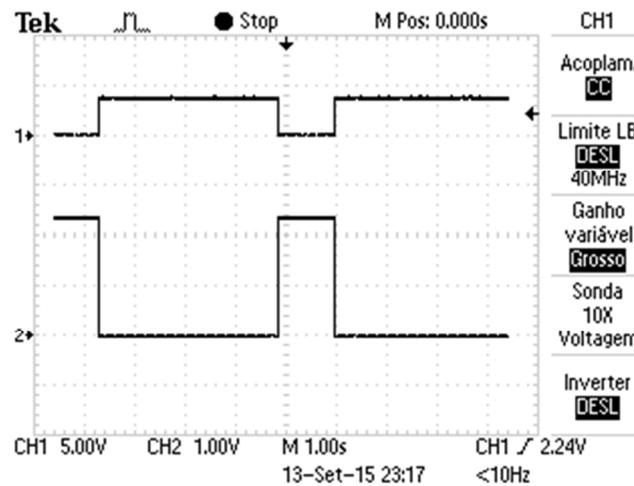


Figura 19: Formas de onda sobre os resistores de 1Ω , em nível alto e baixo. No canal 1 estão os pulsos gerados pelo microcontrolador e no canal 2 a tensão sobre o resistor de $0,5 \Omega$.

Fonte: Autoria própria.

Nas figuras 20 estão descritas as formas de ondas destes sinais condicionados. Assim, eles podem ser entregues ao conversor A/D do microcontrolador, que ele só lê sinais entre 0 e 3,3 V.

No canal 1 estava descrito os pulsos do microcontrolador e no canal 2 a tensão de circuito aberto após o circuito de condicionamento.

Após ilustradas todas as formas de onda, foi preciso comparar as grandezas testadas com um equipamento de medição.

Foi colocado um termômetro atrás da placa fotovoltaica para ser comparado com a grandeza lida pelo microcontrolador.

De acordo com a figura 22, o termômetro apresenta uma temperatura igual do display LCD. No display está uma temperatura de 52° C e no termômetro está apresentando a mesma temperatura. Dessa forma, pode-se dizer que o microcontrolador foi desenvolvido com sucesso.

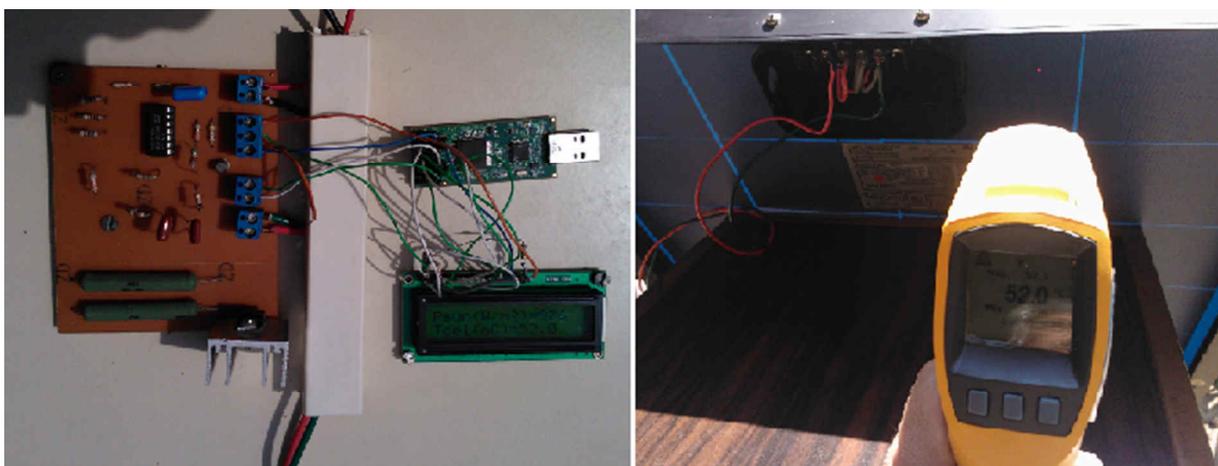


Figura 22: Display com a temperatura (esquerda) e termômetro confirmando a medição realizada (direita).

Fonte: Autoria própria.

Assim, a intensidade de radiação que aparece no display é de 841 W/m². Infelizmente a intensidade não foi possível ser comparada com outro equipamento, pelo fato de não ter medidor para este cálculo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um medidor para realizar medições de temperatura e intensidade de radiação solar sobre uma placa fotovoltaica.

São poucos medidores de painéis fotovoltaicos que podem realizar medições com tanta precisão como este medidor. Piranômetros e outros que foram selecionados, estes medem a temperatura e a radiação, porém não são tão confiáveis.

O presente medidor, pode apresentar valores reais pelo fato que são medidos os valores através da programação do microcontrolador e das variáveis de tensão de circuito aberto e curto-circuito da placa solar. Elas são realizadas indiretamente, através das entradas A/D do microcontrolador da *Texas Instruments*.

Pode ser concluído que é possível realizar as medições com o auxílio da programação de um microcontrolador. Foi possível aplicar algumas disciplinas que foram ministradas durante a graduação com o presente trabalho, adquirindo assim, um maior aprendizado.

REFERÊNCIAS

BACKES, André R. **Linguagem C: Completa e Descomplicada**. 1 ed. Rio de Janeiro: Campus – Elsevier, 2012.

BENDEL, Christian; WAGNER, Andreas. Photovoltaic measurement relevant to the energy yield. In: **Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003**. IEEE, p. 2227 – 2230, 2003.

BLAABJERG, Frede; CHEN, Zhe e KJAER, Soeren Baekhoej. Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**. n. 5, p. 1292 – 1306, 2004.

CARNEIRO, Joaquim. **Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos**. Universidade do Minho. 2000.

CASARO, Marcio Mendes. **Inversor Trifásico De Dois Estágios Modificado Aplicado No Processamento Da Energia Solar Fotovoltaica Em Sistemas Conectados À Rede Elétrica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

DORNELLES, Adalberto A. F. **Fundamentos de linguagem C**. Centro Tecnológico de Mecatrônica. Caxias do Sul. 1997.

HUA, Chihchiang; LIN, Jongrong; SHEN, Chihming. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. n. 1, p. 99 – 107, 1998.

KJAER, Soeren Baekhoej; PEDERSEN, John K.; BLAABJERG, Frede. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. **IEEE Transactions on Industry Applications**. n. 5, p. 1292 – 1306, 2005.

KOUTROULIS, Eftichios; KALAITZAKIS, Kostas; VOULGARIS, Nicholas C. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. **IEEE Transactions On Power Electronics**. p. 46 – 54, 2001.

MELLIT, A. et al. Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 2, p. 406 – 419. 2009.

MEYDBRAY, J.; EMERY, K.; KURTZ, S. Pyranometers And Reference Cells: Part 2: What Makes The Most Sense For Pv Power Plants? **NREL Journal Article**. n. 5

MOREIRA, Miguel. **Métodos Numéricos - Resolução Numérica de Equações não Lineares**. Escola Superior de Tecnologia de Setúbal. 2004.

MUKARO, Raphael; CARELSE, Xavier Francis. A microcontroller-based data acquisition system for solar radiation and environmental monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. n. 6, p. 1232 – 1238. 1999.

MUKARO, R.; CARELSE, X. F.; OLUMEKOR, L. First performance analysis of a silicon-cell microcontroller-based solar radiation monitoring system. **Solar energy**. n. 5, p. 313 – 321. 1998.

MUNNER, T. **Solar Radiation and Daylight Models**. Burlington: Elsevier, 2004.

PAES, Tiago Franca. **Sistemas de Caracterização de Elementos Sensores para Radiômetros Fotovoltaicos**. 2012. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2012.

PEREIRA, Antonio Carlos; SOUZA BRITO, Antonio Augusto. A microprocessor-based semiconductor solar radiometer. **Solar energy**. n. 3, p. 137 – 141. 1990.

QUASCHNING, Volker; HANITSCH, Rolf. Influence of shading on electrical parameters of solar cells. In: **Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty Fifth IEEE**. IEEE, 1996. p. 1287-1290.

RUGGIERO, Márcia A. Gomes; LOPES, Vera Lúcia da Rocha. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. Makron Books do Brasil, 1997.

SALAMONI, Isabel T.; RÜTHER, Ricardo. O Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede. In: **IX Encontro Nacional E V Latino Americano De Conforto No Ambiente Construído**, n. 9. 2007. Ouro Preto. p. 1658 – 1667.

VETTER, Narã Vieira; SANTOS, Guilherme Paiva Silva; MARQUES, Rafael Pereira. **Método da Secante Para Resolução de equações do tipo $f(x)=0$** . Faculdade de Engenharia de Resende. Rio de Janeiro. 2006.

VILELA, Waldeir Amaral. **Estudo, Desenvolvimento e Caracterização de Radiômetros para Medidas da Radiação Solar**. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José Dos Campos. 2010.

ANEEL. Disponível em: < www.aneel.gov.br > Acesso em: 20 out. 2015.

APOGEE INSTRUMENTS. Disponível em: < www.apogeeinstruments.com >
Acesso em: 19 ago. 2013.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL – CEPEL. < www.cresesb.cepel.br >
Acesso em 1 ago. 2013.

BENNING SOLAR. Disponível em: < www.benning.de > Acesso em: 17 ago. 2013.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/cresesb.htm> > Acesso em: 1 ago. 2013.

GUIA TÉCNICO – MANUAL ENERGIA FOTOVOLTAICA. Disponível em: < www.portal-energia.com > Acesso em: 1 ago. 2013.

IMT SOLAR. Disponível em: < www.imtsolar.com > Acesso em: 20 ago. 2013.

KIMO INSTRUMENTS. Disponível em: < www.kimo.fr > Acesso em: 17 ago. 2013.

LI-COR. Disponível em: < www.licor.com > Acesso em 18 ago. 2013.

MORS SMITT. Disponível em: < www.morssmitt.com > Acesso em: 20 ago. 2013.

PCE INSTRUMENTS. Disponível em: < www.pec-instruments.com >. Acesso em:
16 ago. 2013.

ROMIOTTO INSTRUMENTOS. Disponível em: < www.romiotto.com.br > Acesso
em 20 ago. 2013.

SKYE INSTRUMENTS. Disponível em: < www.skyeinstrument.com > Acesso em 19 ago. 2013.

SOLARC. Disponível em: < www.solarc.de > Acesso em: 20 ago. 2013.

TMPV. Disponível em: < www.test-meter.co.uk > Acesso em: 16 ago. 2013.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Disponível em: < www.wmo.int > Acesso em: 15 ago. 2013.

APÊNDICE A – Programação do microcontrolador.

```

#include "DSP2802x_Device.h" // DSP2802x Headerfile Include File
#include "DSP2802x_GlobalPrototypes.h" //Global function prototypes
#include "math.h"
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "string.h"
#define EN GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO18
#define RS GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO19

// Prototype statements for functions found within this file.
void tempo(int k);
void executa(int k);
void escreve(void);

//Variables
float Psun, T, Rs=0.005, Rp=7, Iterat, Icc, Vca,
Ns=54, Voc = 21.0, Isc=4.97, a=3.18e-3,
n=1.2, k=1.38e-23, q=1.6e-19, EG=1.1, Tr=298, Vt,
lph, Irr, Ir, f, res=0.01, TL, TH, valor2;
char power[16], temp[15];
int valor1;

void main(void)
{
// Initialize System Control:
// PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
// This function is found in the DSP2802x_SysCtrl.c file.
    InitSysCtrl();

// Disable CPU interrupts
    DINT; // Global Disable all Interrupts

```

```
// Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
IER = 0x0000;    // Disable CPU interrupts
IFR = 0x0000;    // Clear all CPU interrupt flags

// Initialize GPIO:
// This function is found in the DSP2802x_Gpio.c file and
// illustrates how to set the GPIO to it's default state.
InitGpio();

// Only used if running from FLASH (MemCopy and InitFlash)
// Copy time critical code and Flash setup code to RAM
// The RamfuncsLoadStart, RamfuncsLoadEnd, and RamfuncsRunStart
// symbols are created by the linker. Refer to the linker files.
MemCopy(&RamfuncsLoadStart, &RamfuncsLoadEnd, &RamfuncsRunStart);
// Call Flash Initialization to setup flash waitstates
// This function must reside in RAM
InitFlash(); // Call the flash wrapper init function

// Initialize the PIE control registers to their default state.
// The default state is all PIE interrupts disabled and flags
// are cleared.
// This function is found in the DSP2802x_PieCtrl.c file.
InitPieCtrl();

// Initialize the PIE vector table with pointers to the shell Interrupt
// Service Routines (ISR).
// This will populate the entire table, even if the interrupt
// is not used in this example. This is useful for debug purposes.
// The shell ISR routines are found in DSP2802x_DefaultIsr.c.
// This function is found in DSP2802x_PieVect.c.
InitPieVectTable();

// Initialize the Device Peripheral. This function can be
// found in DSP2802x_CpuTimers.c
```

```

InitCpuTimers());

// Configure ADC
InitAdc(); //Ajusta registrador de controle
AdcOffsetSelfCal(); //Calibra o adc
EALLOW;
AdcRegs.ADCSOC0CTL.all = 0x246; //Canal ADC-B1
AdcRegs.ADCSOC1CTL.all = 0x386; //Canal ADC-B6
AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1SEL = 0;           //Connect ADCINT1 to
EOC0 (end of conversion)
AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT2SEL = 1;         //Connect ADCINT2 to EOC1
AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1E = 1;          //Enable ADCINT1
AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT2E = 1;          //Enable ADCINT2
EDIS;

// Configure GPIO34 as a GPIO output pin
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPBMUX1.bit.GPIO34 = 0;
GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO34 = 1;
EDIS;
GpioDataRegs.GPBSET.bit.GPIO34 = 1;

// Configure Port A as GPIO output pins
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO6 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO7 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO18 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO19 = 0;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO0 = 1;

```

```
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO1 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO2 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO3 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO4 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO5 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO6 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO7 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO18 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO19 = 1;
EDIS;
GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFF00; //apaga os bits 0 a 7 da porta A.
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO18 = 0;
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO19 = 0;

// Configure CPU Timer
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 60, 1000); //temporização base de 1ms

// Temporiza
tempo(5000);

// LCD initialization
EN = 1;
tempo(15);
GpioDataRegs.GPADAT.all |= 0x38; //8bits; 2 linhas; matriz 5x7
executa(15);
executa(15);
GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFF00;
GpioDataRegs.GPADAT.all |= 0x6; //cursor desloca para direita e mensagem
fixa
executa(15);
GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFF00;
GpioDataRegs.GPADAT.all |= 0xD; //liga display e cursor piscante
executa(15);
GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFF00;
```

```
GpioDataRegs.GPADAT.all |= 0x1; //limpa display e posiciona cursor na
primeira posição da primeira linha
```

```
executa(15);
```

```
// Cálculos preliminares
```

```
Voc = Voc/Ns;
```

```
Irr = (Isc-Voc/Rp)/(exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
```

```
// IDLE loop.
```

```
while(1)
```

```
{
```

```
    // Acquisitions
```

```
    //Force start of conversion on SOC0
```

```
    AdcRegs.ADCSOCFRC1.bit.SOC0 = 1;
```

```
    //Wait for end of conversion.
```

```
    while(AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1 == 0){} //Wait for ADCINT1
```

```
    AdcRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;    //Clear ADCINT1
```

```
    Vca = (AdcResult.ADCRESULT0)/4095.0*3.3*6.36;
```

```
    GpioDataRegs.GPBCLEAR.bit.GPIO34 = 1; //curto-circuita o painel.
```

```
    tempo(1000);
```

```
    //Force start of conversion on SOC1
```

```
    AdcRegs.ADCSOCFRC1.bit.SOC1 = 1;
```

```
    //Wait for end of conversion.
```

```
    while(AdcRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT2 == 0){} //Wait for ADCINT2
```

```
    AdcRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT2 = 1;    //Clear ADCINT2
```

```
        GpioDataRegs.GPBSET.bit.GPIO34 = 1;    //abre os terminais do
painel.
```

```
    Icc = (AdcResult.ADCRESULT1)/4095.0*3.3*1.5;
```

```
    Vca = Vca/Ns;
```

```
    T = Tr;    //valor inicial para a temperatura das células.
```

// Algoritmo usado na determinação da temperatura das células e da intensidade da radiação solar

```

for(Iterat = 0; Iterat < 3; Iterat++)
{
    Vt = n*k*T/q;
    Ir = Irr*pow((T/Tr),3)*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T));
    Iph = Icc*(Rs+Rp)/Rp+Ir*(exp(Icc*Rs/Vt)-1);
    Psun = 1000*Iph/(Isc+a*(T-Tr));
    TH = 100+273;
    TL = -100+273;
    f = (Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000-
Irr*pow((T/Tr),3)*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T))*(exp(Vca/Vt)-1)-Vca/Rp;
    while (fabs(f) > res)
    {
        if (f < 0) TH = T;
        else TL = T;
        T = (TL + TH)/2;
        f = (Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000-
Irr*pow((T/Tr),3)*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T))*(exp(Vca/Vt)-1)-Vca/Rp;
    }
}
valor1 = Psun;
valor2 = T-273;
escreve();
tempo(3000);
}
}

void tempo(int k)
{
    while (k > 0)
    {
        CpuTimer0Regs.TCR.bit.TRB = 0;
    }
}

```

```

        CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 0;
        while (CpuTimer0Regs.TCR.bit.TIF == 0);
        CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 1;
        CpuTimer0Regs.TCR.bit.TIF = 1;
        k--;
    }
}

```

void executa(int k) //k é uma variável local da função executa. Não terá seu valor alterado pela função tempo.

```

{
    tempo(k);
    EN = 0;
    tempo(k);
    EN = 1;
    tempo(k);
}

```

void escreve(void)

```

{
    int i;
    RS = 0; //instrução
    tempo(2);
    GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFFFFF00;
    GpioDataRegs.GPADAT.all |= 0x1; //primeira posição da primeira linha.

```

Apaga display.

```

    executa(2);
    GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFFFFF00;
    RS = 1; //dado
    tempo(2);
    sprintf(power, "Psun(W/m2)=%-4d", valor1);
    sprintf(temp, "Tcel(oC)=%-4.1f", valor2);
    for(i=0; i < strlen(power); i++)
    {

```

```

    GpioDataRegs.GPADAT.all |= power[i];
    executa(1);
    GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFFFFF00;
}
RS = 0; //instrução
tempo(2);
GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFFFFF00;
GpioDataRegs.GPADAT.all |= 0xC0; //primeira posição da segunda linha
executa(2);
RS = 1; //dado
tempo(2);
GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFFFFF00;
for(i=0; i < strlen(temp); i++)
{
    GpioDataRegs.GPADAT.all |= temp[i];
    executa(1);
    GpioDataRegs.GPADAT.all &= 0xFFFFFFFF00;
}
}

//=====
=====
// End of SourceCode.
//=====
=====

```

APÊNDICE B – Relações de pinos do kit da *Texas Instruments*

Tabela 3: Relação de pinos utilizados no DSP da *Texas Instruments*.

Pinos	Função	Descrição
7	GPIO 19	DB7
6	ADC B1	I _{cc}
10	ADC B0	V _{ca}
11	GPIO 18	DB6
15	GPIO 17	DB5
16	5 V	Fonte de alimentação
19	GPIO 16	DB4
25	GPIO 33	RS
28	GND	Terra do circuito
29	GPIO 32	Enable
30	GPIO 34	Comando
32	GND	Terra do circuito

Fonte: Autoria própria.

1 ADC-A6 COMP3(+VE)	2 ADC-A2 COMP1 (+VE)	3 ADC-A0	4 3V3
5 ADC-A4 COMP2 (+VE)	6 ADC-B1	7 EPWM-4B GPIO-07	8 TZ1 GPIO-12
9 SCLA GPIO-33	10 ADC-B6 COMP3(-VE)	11 EPWM-4A GPIO-06	12 ADC-A1
13 SDAA GPIO-32	14 ADC-B0	15 EPWM-3B GPIO-05	16 5V0 (Disabled by Default)
17 EPWM-1A GPIO-00	18 ADC-B4 COMP2 (-VE)	19 EPWM-3A GPIO-04	20 SPISOMIA GPIO-17
21 EPWM-1B GPIO-01	22 ADC-A5	23 EPWM-2B GPIO-03	24 SPISIMOA GPIO-16
25 SPISTEA GPIO-19	26 ADC-B2 COMP1 (-VE)	27 EPWM-2A GPIO-02	28 GND
29 SPICLKA GPIO-18	30 GPIO-34 (LED)	31 PWM1A-DAC (Filtered)	32 GND

Figura 23: Relação dos pinos do kit do microcontrolador.

Fonte: Kit do *ControlStick* da *Texas Instruments*. (2015)