

# **ESTUDO E MONTAGEM DE UM SISTEMA DE UM CONTROLE DE TEMPERATURA PARA CARACTERIZAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Peterson Augusto Ferreira (Unifesp, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [peterson.augusto@unifesp.br](mailto:peterson.augusto@unifesp.br)

Waldeir Amaral Vilela (LAS/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [waldeir@las.inpe.br](mailto:waldeir@las.inpe.br)

Julho de 2013

## **Resumo:**

Para caracterização elétrica de células solares fotovoltaicas um dos principais métodos é a medida da curva de corrente por tensão (curva I x V). Através deste método é possível obter vários parâmetros da uma célula solar, entre elas a sua eficiência. Existem normas que estabelecem as condições necessárias para obtenção desta curva. As normas IEC60904-1 e IEC60904-2 estabelecem critérios de medida da característica I x V, assim como requisitos para dispositivos solares de referência. Para testes de qualificação e aceitação de células solares de aplicação espacial, o dispositivo padrão e o de teste, segundo as normas, devem estar em  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , sendo que o padrão de referência deve ser um dispositivo calibrado com certificação, rastreabilidade e natureza similar ao que está sendo medido.

A curva I x V de um dispositivo fotovoltaico apresenta uma forte dependência com a temperatura, por isso a temperatura é um parâmetro que precisa ser controlado e monitorado durante a obtenção desta curva devido às exigências das normas. A obtenção de curvas para diferentes temperaturas também é de grande interesse nos processos de pesquisa e desenvolvimento destes dispositivos, pois permite análises de eficiência, degradação e comportamentos em situações de operação onde a temperatura não é controlada.

O sistema de caracterização elétrica de células solares do Laboratório de Energia Solar do LAS/INPE (Laboratório Associados de Sensores e Materiais) consiste basicamente em um simulador solar da marca Oriel Instruments, modelo 81190, dois multímetros para medir corrente (I) e tensão (V), uma fonte de tensão controlada que simula uma carga dinâmica, uma base para fixação e controle da temperatura das células em teste e referência e um sistema de aquisição de dados constituído por um microcomputador e uma placa GPIB.

O controle de temperatura das células em teste no sistema de medida IxV do LAS é obtido por um sistema convencional que consiste na circulação forçada de água na base de fixação das células. Este sistema embora apresente boa estabilidade para uma determinada temperatura de teste ele não permite mudanças de temperatura de forma

rápida e precisa, tornando o processo de caracterização dispendioso quando se deseja obter diversas curvas em diferentes temperaturas. Como o sistema utiliza água para controle da temperatura, a menor temperatura possível é próxima de zero grau não sendo possíveis temperaturas menores que a do ponto de congelamento da água e nem maiores que o seu ponto de ebulição.

Atualmente encontra-se em fase de desenvolvimento no LAS um sistema para controle de temperatura das células em teste que utiliza pastilhas Peltier. Este novo sistema apresenta uma série de características que o torna mais vantajoso em relação ao sistema convencional. Com ele será possível um controle mais preciso da temperatura das células durante as medidas atendendo as exigências das normas e também será possível obter curvas I x V para diversas temperaturas com mais facilidades, inclusive para temperatura abaixo de zero grau Celsius. Neste trabalho serão apresentados alguns dos resultados obtidos no desenvolvimento deste sistema.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
2.2.1 Células feitas de silício monocristalino -----	9
2.3.1 Pastilhas Peltier-----	10
3.1.1 Sistema do simulador solar do laboratório CELSOL/INPE -----	12
3.4.1 Sistema de Aquisição Dataworker -----	12
4.4.1.1 Teste com diversas temperaturas -----	14
4.1.2.1 Teste sem resfriamento por água -----	14
4.1.3.1 Gráfico dos dados obtidos pelo sistema de aquisição Dataworker -----	16
4.1.3.2 Gráfico da comparação base quadrada e base redonda -----	16
4.2.1.1 Variac, multímetros e equipamento de leitura de temperatura -----	17
4.2.1.2 Base de latão resfriada com pastilha Peltier e dissipador de calor -----	17
4.4.1.3 Temperatura em função da corrente -----	18
4.4.1.4 Temperatura em função da tensão -----	18

## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b> ----- 6
<b>2</b>	<b>Célula solar fotovoltaica e pastilhas Peltier</b> ----- 8
2.1	Efeito fotovoltaico ----- 8
2.2	Célula solar monocristalina ----- 9
2.3	Pastilhas Peltier ----- 9
<b>3</b>	<b>Dispositivos e Metodologias</b> ----- <b>10</b>
3.1	O sistema de caracterização ----- 10
3.2	O sistema de resfriamento atual ----- 11
3.3	Metodologia para a obtenção da curva ----- 11
3.4	Sistema de aquisição Dataworker ----- 11
3.5	Termopares ----- 13
<b>4</b>	<b>Testes e Análise dos Resultados</b> ----- 13
<b>4.1</b>	<b>Testes com o uso do simulador solar</b> ----- 13
4.1.1	Variação da Temperatura na Célula Solar ----- 13
4.1.2	Temperatura em pontos diferentes ----- 13
4.1.3	Teste com a base de latão redonda ----- 14
4.1.3.1	Comparação base quadrada e redonda ----- 16
<b>4.2</b>	<b>Testes sem utilizar o simulador solar</b> ----- 17
4.2.1	Células Peltier e base quadrada ----- 17
<b>5</b>	<b>Conclusão</b> ----- 19
<b>6</b>	<b>Agradecimento</b> ----- 19
<b>7</b>	<b>Referências</b> ----- 19

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a conversão de energia solar em eletricidade através de painéis fotovoltaicos ou módulo fotovoltaico é uma das formas de aproveitamento da energia solar que mais desperta interesse em pesquisadores, ambientalistas e empresários do setor de energia, devido a inúmeras vantagens que este sistema apresenta em relação aos meios tradicionais, embora esta ainda seja a forma de geração de energia elétrica comercial ainda com custos mais elevados comparados a outras formas de geração de energia não convencionais. O funcionamento de uma célula solar se baseia no efeito fotoelétrico, descoberto por Edmond Becquerel em 1839, ao observar uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor exposto a luz. Usando esse efeito é possível converter a radiação emitida pelo Sol diretamente em eletricidade. Essa energia foi chamada de energia fotovoltaica (foto = luz, voltaica = eletricidade).<sup>[1][3]</sup>

Com o desenvolvimento da microeletrônica e a possibilidade de aplicação aeroespacial, houve um avanço considerável na tecnologia de produção das células solares fotovoltaicas. Além da redução dos custos na produção destes dispositivos e do aumento de sua eficiência energética, houve uma significativa redução de seu tamanho e peso.

Para o desenvolvimento de células solares e uma correta avaliação de sua eficiência e necessário a realização de testes de funcionalidades destas células. Mas, devido à dificuldade de realizar testes de funcionalidade de células fotovoltaicas usando a radiação diretamente do Sol, devido às constantes alterações ambientais, tais como chuva, nuvens, etc. foram desenvolvidas fontes artificiais de irradiação que simulam a radiação solar. Essas fontes, denominadas simuladores solares, recriam dentro de certas condições a irradiação equivalente a radiação solar na superfície terrestre e fora da atmosfera.

Para a caracterização de células solares um dos métodos mais utilizados é a medida da curva de corrente por tensão (curva I x V). A obtenção da curva I x V tem como objetivo determinar: corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, corrente de potência máxima, tensão de potência máxima, eficiência e o fator de preenchimento

das células, verificar o seu funcionamento para diferentes intensidades de radiação, determinar as resistências em série e paralelo da célula e determinar o comportamento destes dispositivos para diferentes temperaturas. A curva  $I \times V$  de um dispositivo fotovoltaico tem uma forte dependência com a temperatura, por isso a temperatura é um parâmetro que precisa ser controlado e monitorado durante a obtenção desta curva. A obtenção de curvas  $I \times V$  para diferentes temperaturas também é de grande interesse nos processos de pesquisa e desenvolvimento destes dispositivos, pois permite análises de degradação e comportamento em situações de operação onde a temperatura não é controlada.

O grupo de Células Solares (CELSOL) do LAS possui no laboratório de Energia Solar um sistema de caracterização de célula solares que permite medir a curva  $I \times V$ . Este sistema encontra-se em fase de modernização e automação para atender as necessidades dos pesquisadores e dos novos dispositivos fotovoltaicos que estão surgindo no mercado. Neste relatório são apresentados os resultados iniciais obtidos pelo bolsista de Iniciação Científica no aprimoramento do sistema de controle de temperatura de células solares durante a medida da corrente  $I \times V$  no sistema de caracterização do LAS. O novo sistema de controle de temperatura deverá ser totalmente automatizado utilizando dispositivos eletrônicos e software da National Instrument e terá como principal componente controlador de temperatura células Peltier, além da eletrônica será desenvolvida uma nova base de fixação para a célula em testes.

O controle de temperatura atualmente é obtido por um sistema convencional que consiste na circulação forçada de água na base de fixação das células. Este sistema embora apresente boa estabilidade para uma determinada temperatura de teste. Não permite mudanças de temperatura de forma rápida e precisa, tornando o processo de caracterização dispendioso quando se deseja obter diversas curvas em diferentes temperaturas. Como o sistema utiliza água para controle da temperatura, a menor temperatura possível é próxima de zero grau não sendo possíveis temperaturas menores que a do ponto de congelamento da água e nem maiores que o seu ponto de ebulição.

## **2 CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA E PASTILHAS PELTIER**

### **2.1 Efeito fotovoltaico**

Um átomo de silício tem sua camada mais externa com apenas metade da quantidade de elétrons. Para preencher essa camada, ele necessita compartilhar seus elétrons com outro átomo. Quando os átomos de silícios compartilham entre si a última camada, ocorre a formação de uma estrutura cristalina. O silício é um semicondutor e quando é introduzido em sua estrutura cristalina átomos de determinados elementos ele tem suas características elétricas alteradas.

Esses átomos introduzidos na estrutura cristalina do silício são denominados impurezas. Em dispositivos fotovoltaicos, normalmente esses átomos possuem em sua camada de valência, uma quantidade superior a quatro elétrons, ou seja, podem se ligar ao silício e completar sua camada externa e ainda gerar uma região que em certas condições permite a mobilidade de carga. Essa região é denominada banda de valência.

Esse processo de adicionar impurezas de propósito é chamado de dopagem. Quando dopado com fósforo, o silício resultante é chamado tipo-N ("n" de negativo) por causa do predomínio dos elétrons livres. Entretanto, em células solares de silício, utiliza-se dopagem do tipo-N e do tipo-P em um mesmo substrato. Sendo que uma das superfícies deste substrato recebe dopagem com átomos para gerar um semicondutor do tipo-P e a outra recebe átomos diferentes para gerar um semicondutor do tipo-N.

Normalmente uma região é dopada com boro e a outra com fósforo. O boro possui três elétrons em sua camada mais externa e é utilizado para tornar o silício em tipo-P ("p" de positivo), que apresenta lacunas livres, ou ausência de elétrons em pontos específicos, pontos de carga oposta (positiva).

Separados, ambos os tipos são eletricamente neutros, porém unindo as regiões e formando a região P-N, e ao incidir luz, um campo elétrico é formado. Com isso os elétrons livres do silício tipo N tenderam a ocupar as lacunas ou buracos da estrutura do tipo P.

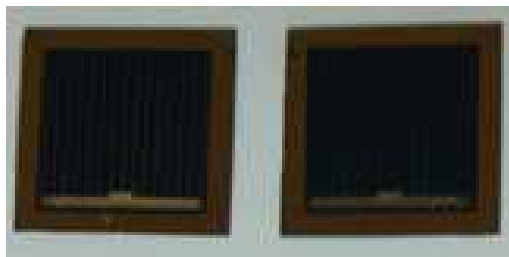


Em uma célula fotovoltaica a região P-N é aberta e exposta à radiação solar. Quando a radiação incide nesta região ocorre à formação de um fluxo de elétrons (corrente) que quando extraído da célula pode ser utilizado como um gerador de eletricidade. Este fenômeno é denominado “Efeito fotovoltaico”.<sup>[2]</sup>

## 2.2 Célula solar monocristalina

O material base de uma célula fotovoltaica de uso terrestre é o silício (Si), entre os tipos de diferentes de silício (silício mono cristalino, poli cristalino, silício amorfo), o que apresenta melhor eficiência em conversão da luz em eletricidade é o monocristalino.

A Figura 2.2.1, mostra células solares de silício monocristalino com um rendimento energético que ser superior a 12%.<sup>[2]</sup>

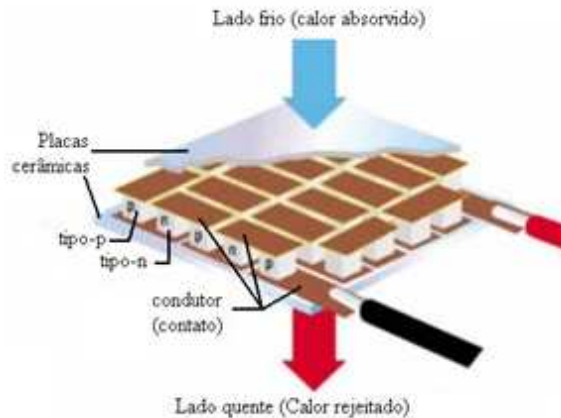


**Fig. 2.2.1** – Células feitas de silício monocristalino

## 2.3 Pastilhas Peltier

O “Efeito Peltier” foi descoberto em 1834, pelo físico francês Jean Charles A. , ao observar a junção de dois materiais. Ao percorrer uma corrente elétrica no sentido do bismuto para o cobre (Bi e Cu) e perceber que um dos materiais esquentava e outro esfriava, e isso era alterado caso o sentido da corrente fosse invertido.

Ao aplicar esse efeito a uma pastilha feita de materiais semicondutores do tipo-P e tipo-N, isoladas por placas de cerâmica (figura 2.3.1), conseguimos um dispositivo em que um dos lados esquentará e outro esfriará. Onde esse aquecimento foi controlado através de dissipadores e ventiladores.



**Fig. 2.3.1 - Pastilha Peltier**

### **3 DISPOSITIVOS E METODOLOGIAS**

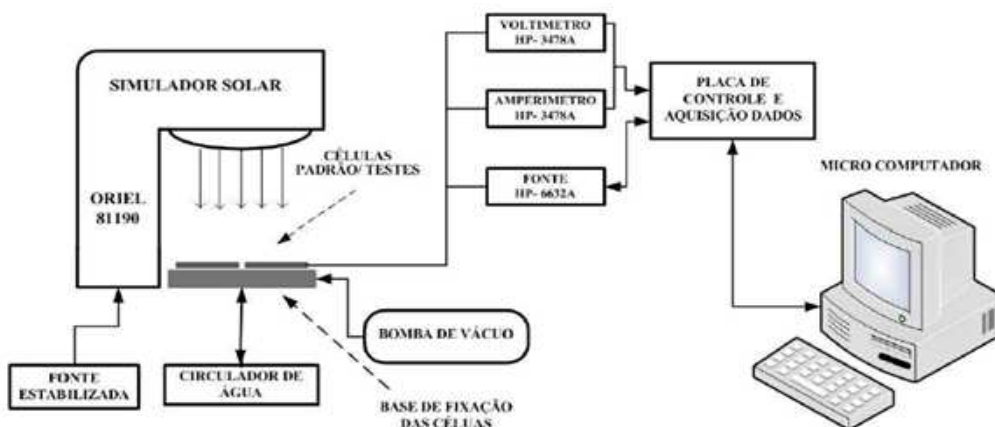
#### **3.1 O sistema de caracterização**

O sistema de caracterização elétrica de células solares do Laboratório de Energia Solar do LAS/INPE, consiste basicamente em um simulador solar da marca Oriel Instruments, modelo 81190, uma lâmpada de xenônio de 1000 W, dois multímetros para medir corrente (I) e tensão (V), do modelo 3478A da marca HP (Hewlett Packard) com resolução que permitem medir tensões de até 100nV na escala de 30mV e correntes de 1 $\mu$ A na menor escala., uma fonte de tensão controlada que simula uma carga dinâmica, utilizada para simular a resistência de carga variável aplicada nos terminais da célula deste sistema, do modelo 6632 (0 V - 20 V/ 0 A - 5 A), uma base para fixação e controle da temperatura das células em teste e referência feita de latão e um sistema de

aquisição de dados constituído por um microcomputador e uma placa GPIB. (figura 3.1.1)

Para a análise dos dados foi utilizado um programa desenvolvido especialmente para este sistema, onde foi possível obter a curva I x V com os seguintes parâmetros: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de potência máxima, tensão de potência máxima, eficiência e fator de preenchimento das células. Além de verificar o funcionamento com diferentes intensidades de radiação, determinar as resistências em série e paralelo da célula e obter o comportamento destes dispositivos nas mais variadas temperaturas. [1]

Para esse processo existem normas que estabelecem as condições necessárias para obtenção desta curva. As normas IEC60904-1 e IEC60904-2 estabelecem critérios de medida da característica I x V, assim como requisitos para dispositivos solares de referência. Para testes de qualificação e aceitação de células solares de aplicação espacial, o dispositivo padrão e o de teste, segundo as normas, devem estar em  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , sendo que o padrão de referência deve ser um dispositivo calibrado com certificação, rastreabilidade e natureza similar ao que está sendo medido. [1]



**Figura 3.1.1** – Sistema do simulador solar do laboratório CELSOL/INPE

### 3.2 O sistema de resfriamento atual

O resfriamento da célula solar atual do simulador é obtido por um sistema convencional que consiste em circular água de forma forçada na base de fixação das células. Este sistema embora apresente boa estabilidade para uma determinada temperatura de teste, não permite mudanças de temperatura de forma rápida e precisa, tornando o processo de caracterização dispendioso quando se deseja obter diversas curvas em diferentes temperaturas. Como o sistema utiliza água para controle da temperatura, a menor temperatura possível é próxima de zero grau não sendo possíveis temperaturas menores que a do ponto de congelamento da água e nem maiores que o seu ponto de ebulição.

A aplicação da pastilha Peltier seria uma solução, já que a sua possibilidade de trabalhar com uma ampla faixa de temperaturas, além do controle de temperatura preciso.

### **3.3 Metodologia para obtenção da Curva IxV**

A célula solar é posta na base de latão, conectada através de seus terminais. E a bomba de vácuo que auxilia na fixação da célula, a lâmpada de xenônio e o sistema de refrigeração à água são iniciados. Através do sistema de aquisição de dados eles são registrados e com o software feito especialmente para esse simulador, é possível pré-visualizar uma curva corrente por tensão (curva I x V).

Posteriormente os dados podem ser transformados em gráficos novamente por meio de algum software específico.

### **3.4 Sistema de Aquisição Dataworker**

No aparelho Dataworker (figura 3.4.1), é possível ligar termopares (sensores de temperatura) e imprimir os dados obtidos até mesmo no próprio aparelho, além de escolher a escala de temperatura (Celsius ou Fahrenheit) e programar o intervalo de tempo para coleta dos dados.



**Figura 3.4.1** – Sistema de Aquisição Dataworker

### **3.5 Termopares**

Termopares são sensores de temperatura, constituído de dois metais diferentes que unidos pela extremidade que formam um circuito fechado gerando uma força eletromotriz. Onde conectado a um instrumento de leitura é possível ler a temperatura.

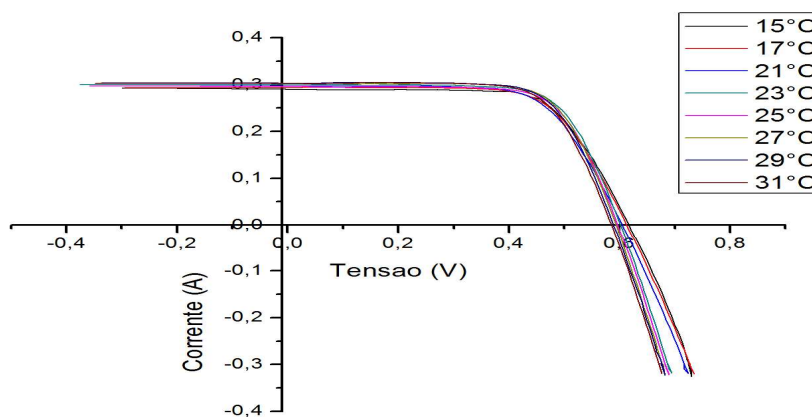
Existem vários tipos de termopares disponíveis no mercado com os mais diferentes formatos e aplicações. Para os testes desse trabalho foi utilizado o termopar do tipo k, devido a ter seu uso recomendável em atmosferas oxidantes ou inertes e em baixas temperaturas.

## **4 TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **4.1 Testes com o uso do simulador solar**

#### **4.1.1 Variação da Temperatura na Célula Solar**

Com o controle do módulo, foi possível variar a temperatura da célula solar. Com essa variação de temperatura em uma mesma célula e ao utilizar o processo de caracterização para as seguintes temperaturas: 15°C, 17°C, 19°C, 21°C, 23°C, 27°C, 31°C e combinar os dados obtidos em mesmo gráfico foi obtido a Figura 4.1.1.1. Onde é possível perceber que com o aumento da corrente de curto-circuito a tensão de circuito aberto tende a diminuir. E uma influência entre a intensidade luminosa e a temperatura da célula, pois a corrente que é gerada nos módulos cresce com o aumento da intensidade luminosa, que aumenta também a temperatura da célula e como resultado sua eficiência diminui.

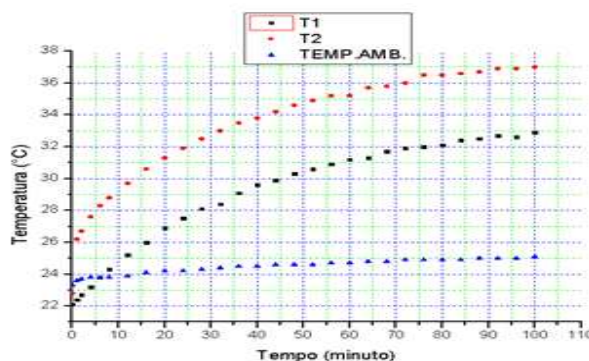


**Fig. 4.1.1.1** – Teste com diversas temperaturas

#### 4.1.2 Temperatura em pontos diferentes

Através de três termômetros, foram medidas as temperaturas em dois pontos da base e a temperatura ambiente enquanto o processo de caracterização ocorreria sem o auxílio do resfriamento por água, com intuito de visualizar a temperatura que a célula solar alcançaria. Ao usar os dados para plotar um gráfico (Figura 4.1.2.1), foi possível perceber que o segundo termômetro (T2), supera o primeiro (T1).

Que demonstra que essa base, não tem uma homogeneidade de temperatura devido ao seu tamanho (ela apresenta dois espaços devidamente preparados para serem inseridas duas células solares ao mesmo tempo).

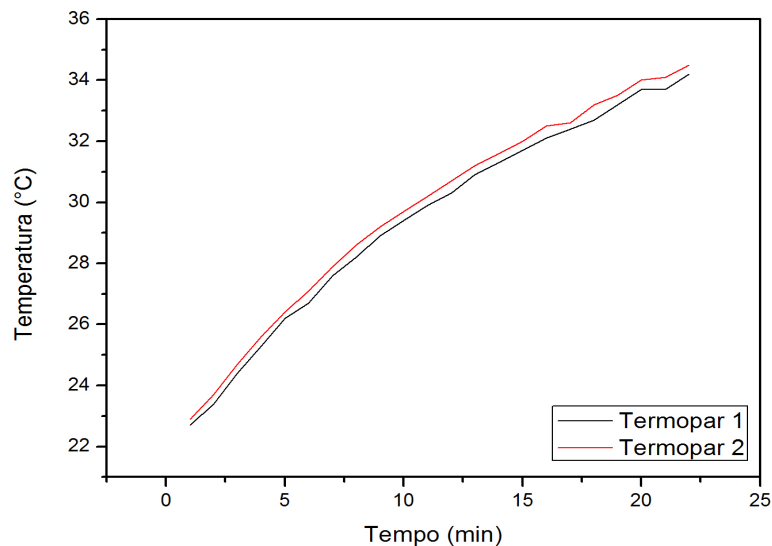


**Fig. 4.1.2.1**– Teste sem resfriamento por água

### 4.1.3 Teste com a base de latão redonda

Esse teste foi realizado com uma peça de latão de 12 mm de altura por 76 mm de diâmetro, já existente no CELSOL/INPE, e furada em dois locais para colocar termopares (um furo na parte de cima e um furo na lateral).

O teste durou aproximadamente 22 minutos e dados das temperaturas foram coletados pelo Dataworker através de dois termopares, entre intervalos de 1 minuto entre as medidas, a figura 4.1.3.1 mostra os resultados.



**Figura 4.1.3.1** – Gráfico dos dados obtidos pelo sistema de aquisição Dataworker

Com esse teste fica evidente que existe uma pequena variação entre as temperaturas desses dois termopares. Um dos possíveis motivos para essa diferença seria vulnerabilidade de passagem de corrente de ar na sala de teste.

#### 4.1.3.1 Comparação base quadrada e redonda

Como a base quadrada é do mesmo material da redonda foi possível através de um gráfico (figura 4.1.3.3) fazer uma comparação de como a forma da base altera a temperatura. De acordo com esse gráfico (figura 4.1.3.3), onde a temperatura 2 refere-se à base quadrada e a temperatura 1 refere-se à base redonda.

A base quadrada apresenta melhor eficiência (esquenta menos). Mas, até certa temperatura, após isso ela tende a aumentar já que a mesma não consegue mais distribuir o calor em sua massa.

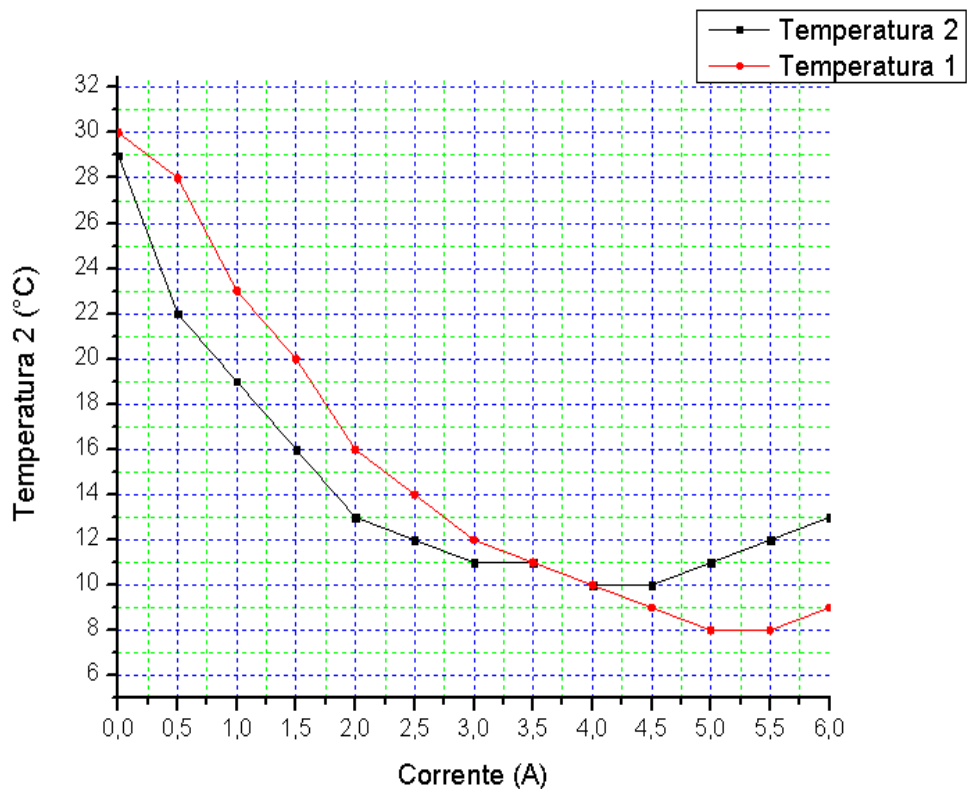


Fig. 4.1.3.2 – Gráfico comparação base quadrada e base redonda



## 4.2 Teste sem utilizar o simulador solar

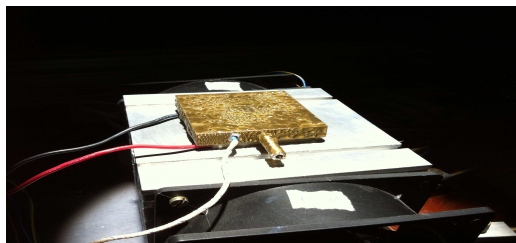
### 4.2.1 Células Peltier e base quadrada

Esse é o único teste onde o simulador solar não foi utilizado, apenas foi montado em uma bancada os seguintes equipamentos: um Variac (transformador com seu primário ligado na rede de elétrica e o secundário variável em uma ponte de diodo para retificar o sinal), uma célula Peltier do modelo HTC-50-12-15.4 (5cmx5cm), e dois multímetros (um para medir a corrente e outro para tensão), além de um termômetro que utiliza termopares para medir a temperatura (figura 4.2.1.1).



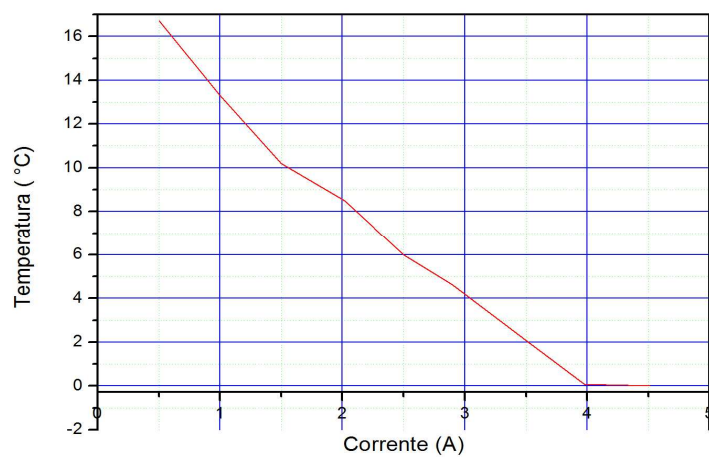
**Figura 4.2.1.1** – Variac, multímetros e equipamento de leitura de temperatura

A célula Peltier foi colocada entre o dissipador e o latão (base quadrada) e foi utilizado um dissipador e dois ventiladores, para evitar o superaquecimento. A cada intervalo de 25 minutos a corrente era aumentada, que teve como valor inicial 0,5 A e termino em 4,5 A. (Figura 4.2.1.2).

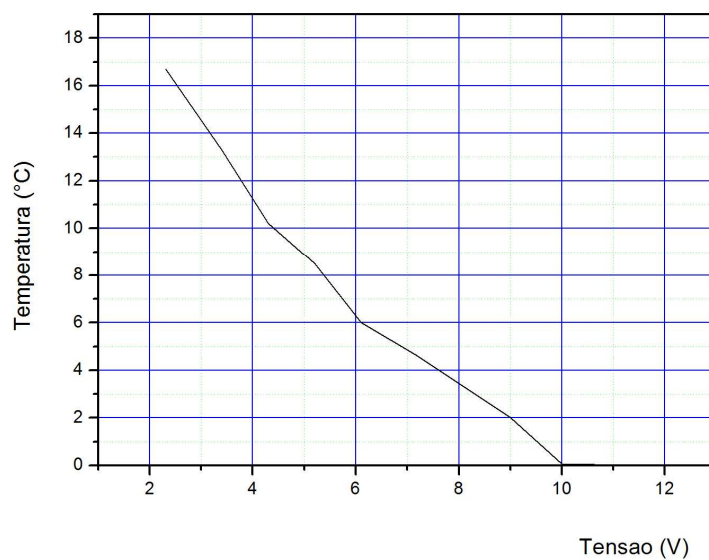


**Figura 4.2.1.2** – Base de latão resfriada com pastilha Peltier e dissipador de calor.

Com os dados coletados foi possível obter dois gráficos: temperatura em função da corrente (figura 4.2.1.3) e temperatura em função da tensão (figura 4.2.1.4).



**Figura 4.2.1.3** – temperatura em função da corrente.



**Figura 4.2.1.4** – temperatura em função da tensão

## **5 - Conclusão**

Ainda não foi possível atingir o objetivo de criar o sistema de um controle de temperatura para caracterização de células solares, mas os testes feitos até o momento contribuíram para o estudo do mesmo. Grande parte disso, se deve ao fato da descontinuação da bolsa de iniciação científica, inicialmente o projeto era de responsabilidade de Tamara Stefani Siqueira Bagattini, faltando 3 meses para o término da bolsa, ela não pode dar prosseguimento ao trabalho, sendo que foram usados nesse relatório alguns dos testes feitos por ela. Ela foi substituída por Peterson Augusto Ferreira, que teve tempo de estudar as células solares fotovoltaicas, o efeito fotovoltaico, as pastilhas Peltier e aprender a operar o simulador solar, rever os testes já feitos e fazer novos testes.

Como próximos passos seriam necessários mais testes envolvendo a célula Peltier, além do desenvolvimento do sistema em si.

## **6 - Agradecimentos**

Ao CNPq pelo apoio financeiro e ao meu orientador Dr. Waldeir Amaral Vilela (LAS/CTE/INPE, Orientador) pela ajuda, confiança e paciência.

Gostaria de agradecer também ao Dalmo Geraldo Pasin (ETEC, bolsista INPE), que forneceu todo o apoio durante esse pouco tempo que estive no INPE.

## **7 – Referências**

[1] Tiago F. P. **Sistemas de Caracterização de Elementos Sensores para Radiômetros Fotovoltaicos** - INPE/SJC - 2012

[2] Cassio A.N. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica** - Universidade Federal de Lavras 2004