

# **Sistema de geração e aquisição das características I-V de módulos fotovoltaicos**

**Pedro Manuel Fernandes Rodrigues**

Relatório de Projecto para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Industrial**

Ramo **Engenharia Electrotécnica**

Projecto realizado sob a orientação de

A. Vicente T. Leite, IPB-ESTIG

E co-orientação de

Faustino Chenlo, Ciemat

**Novembro de 09**

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer ao orientador da dissertação, Professor Doutor Américo Vicente Leite, pela direcção, apoio e generosidade nas explicações prestadas, incentivando ao rigor científico e propondo novas ideias e desafios, contribuindo assim de forma valiosa para este trabalho.

Ao mestre Baptista, do Instituto Politécnico de Bragança onde foi realizada a primeira parte do trabalho, agradecer pela sua colaboração e comentários relacionados com a aquisição de sinais no software *LabView*.

Ao co-orientador Faustino Chenlo, do Ciemat, com a sua grande visão e experiência do panorama fotovoltaico, contribuiu para a realização da parte experimental do trabalho, bem como a realização de diversos testes a módulos fotovoltaicos. A todo o resto do pessoal do Laboratório pela sua colaboração e cooperação na toma de medidas.

Ao Nelson Louçano e João Bulhosa pelo constante apoio no decorrer do trabalho e na estadia em Madrid.

E finalmente, agradecer de todo o coração aos meus pais, à minha esposa Sónia Cordeiro e família, os incondicionais da minha causa que estão sempre ao meu lado, o apoio prestado no decurso do trabalho desenvolvido.

## **Resumo**

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um módulo electrónico de baixo custo, capaz de adquirir e traçar as curvas I-V (corrente *versus* tensão) de módulos fotovoltaicos, assim como medir outras grandezas utilizadas no diagnóstico de degradação, nomeadamente, tensão em circuito aberto, corrente de curto-circuito, radiação solar e temperatura.

Numa primeira fase do trabalho decorrida no IPB, foram implementadas/testadas algumas montagens electrónicas com vista a verificar as possibilidades de implementação e validar a que melhor se coadunava para a implementação prática. De seguida, já no Ciemat, tomou-se conhecimento das distintas técnicas e procedimentos do Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica para a realização de ensaios e medidas em módulos fotovoltaicos. Após a consolidação de conhecimentos, foi projectado, desenhado e construído um traçador de curvas I-V cumprindo os requisitos propostos, ou seja, de baixo custo e configuração simples.

O módulo electrónico construído foi baseado na carga de um condensador de potência, uma carta de aquisição de dados e um comutador para duas opções de medida: módulos fotovoltaicos “convencionais” (10 A, 50 V) e módulos fotovoltaicos de lâmina delgada (2 A, 110 V).

**Palavras-chave:** Módulos fotovoltaicos, traçadores de curvas I-V e degradação.

## **Abstract**

This work is based on the development of a low cost electronic module, able of acquiring and trace *IV* curves (current versus voltage) of photovoltaic modules, as well as measuring other quantities of the degradation diagnose, particularly open circuit voltage, current short circuit, radiation and temperature.

On a former phase of this work, which took place at IPB, there were implemented/tested some electronic montages in order to verify the implementation possibilities and validate which suits better for the practical implementation. On a second phase, taking place at CIEMAT, there were acknowledged several techniques and procedures of the Photovoltaic Energy Laboratory for the execution of tests and measures on photovoltaic modules.

After knowledge consolidation, it was projected, designed and built an *IV* tracer, according to the proposed requisites, as so, low cost and simple configuration.

The electronic module built on his project, was based on the load of a power condenser, on data acquisition hardware and a two-measuring switch: conventional photovoltaic modules (10 A, 50 V), and thin-blade photovoltaic modules (2 A, 110 V).

Key-words: photovoltaic modules, I-V curve trace, degradation.

## Índice

1.	Introdução .....	1
2.	Situação da energia solar fotovoltaica em Portugal.....	2
2.1.	O mercado fotovoltaico em Portugal.....	2
3.	Estado da arte .....	4
3.1.	Caracterização eléctrica de dispositivos fotovoltaicos. Tendências actuais .....	4
3.1.1.	Caracterização de centrais fotovoltaicas.....	5
3.2.	Modelação de dispositivos fotovoltaicos como geradores de corrente.....	6
3.2.1.	Modelos eléctricos.....	6
3.2.2.	Métodos de extração de parâmetros.....	7
3.3.	Sistemas desenvolvidos para traçar a curvam I-V .....	8
4.	Células e módulos fotovoltaicos.....	11
4.1.	Teoria básica de semicondutores. Efeito fotovoltaico .....	11
4.2.	Estrutura básica de uma célula .....	11
4.3.	Características de uma célula solar.....	12
4.3.1.	Corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto .....	12
4.3.2.	Curva de potência. Ponto de potência máxima .....	14
4.3.3.	Factor de forma.....	14
4.3.4.	Eficiência de conversão das células solares.....	15
4.3.5.	Influência da temperatura .....	16
4.4.	Tipos de células .....	16
4.4.1.	Silício monocristalino .....	16
4.4.2.	Silício policristalino.....	17
4.4.3.	Células de silício amorfo .....	17
4.4.4.	Células de arsenieto de gálio.....	18
4.4.5.	Células de telurieto de cádmio.....	18
4.4.6.	Células de disselenieto de cobre e índio .....	18
4.5.	O módulo fotovoltaico.....	18
4.5.1.	Características de um módulo.....	19
4.5.2.	Parâmetros eléctricos.....	19

4.5.3.	Parâmetros térmicos.....	20
4.5.4.	Parâmetros físicos.....	20
4.5.5.	Outras especificações.....	20
5.	Modos de degradação.....	21
5.1.	Sujidade na superfície frontal.....	22
5.2.	Degradação do encapsulante.....	22
5.3.	Reacções entre o encapsulante e o filme anti-reflexo.....	23
6.	Análise da degradação.....	24
6.1.	Inspecção visual.....	24
6.2.	Medição da curva característica I-V.....	24
6.3.	Investigação de pontos quentes.....	24
6.4.	Medição da resistência série.....	25
6.5.	Resumo da lista de testes a efectuar.....	25
7.	Ensaio preliminares.....	25
7.1.	Descrição do esquema electrónico.....	26
8.	Protótipo desenvolvido.....	29
8.1.	Descrição.....	29
8.1.1.	Dimensionamento das resistências.....	30
8.1.2.	Aquisição de dados.....	31
8.1.3.	Condensadores.....	32
8.1.4.	Sensor de temperatura.....	33
8.1.5.	Calibração de células.....	33
8.2.	Resultados experimentais.....	35
9.	Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros.....	38
	Referências Bibliográficas.....	40

## Índice de figuras

Figura 3.1 - Esquema para a obtenção da característica I-V [21].....	8
Figura 3.2 - Diagrama de blocos da unidade de testes [22].....	9
Figura 3.3 - Simulador solar do Ciemat (1) .....	10
Figura 3.4 - Simulador solar do Ciemat (2) .....	10
Figura 4.1 – Malha de metalização frontal de uma célula [24] .....	12
Figura 4.2 - Efeito da variação da resistência série na curva I-V [24] .....	13
Figura 4.3 - Efeito da variação da resistência paralela na curva I-V [24] .....	13
Figura 4.4 - Curva I-V e ponto de máxima potência retirada do simulador do Ciemat .....	14
Figura 4.5 – Factor de forma de células solares [25] .....	15
Figura 4.6 – Efeito da temperatura na curva I-V [24] .....	16
Figura 5.1 - Principais agentes responsáveis pela degradação de módulos fotovoltaicos [27] .....	22
Figura 5.2 - Degradação do encapsulante [28].....	23
Figura 5.3 - Oxidação da malha metálica das células [28].....	23
Figura 7.1 – Característica corrente-tensão do <i>MOSFET</i> [Sebenta Electrónica de potência] .....	26
Figura 7.2 - Curva de funcionamento do <i>MOSFET</i> .....	27
Figura 7.3 - Esquema electrónico adoptado .....	28
Figura 7.4 - Fotografia da montagem electrónica .....	28
Figura 8.1 - Esquema do traçador implementado.....	29
Figura 8.2 - Fotografia do dispositivo .....	29
Figura 8.3 - Sensor de temperatura LM35 .....	33
Figura 8.4 - Fotografia de calibração (1).....	34
Figura 8.5 - Fotografia de calibração (2).....	34
Figura 8.6 – Curva I-V do módulo <i>Zitech</i> .....	36
Figura 8.7 – Curva I-V do módulo <i>Zitech</i> com uma célula danificada .....	36
Figura 8.8 - Curva I-V do módulo <i>Zitech</i> com duas células danificadas .....	37
Figura 8.9 – Curva I-V do módulo <i>Zitech</i> com sujidade na superfície .....	37

## Índice de tabelas

Tabela 2-1 - Potência instalada (MWp) em Portugal [3] .....	2
Tabela 6-1 - Lista de testes a efectuar .....	25
Tabela 8-1 - Características da carta de aquisição de dados .....	31
Tabela 8-2 - Especificações eléctricas do módulo <i>Zitech</i> .....	35

## Lista de abreviaturas e símbolos

PV – Fotovoltaico;  
AM – Massa de ar atmosférico (relativo);  
C - Capacidade eléctrica (F);  
FF – Factor de forma;  
I – Corrente eléctrica (A);  
 $I_{sc}$  – Corrente de curto-circuito (A);  
 $I_D$  – Corrente de um diodo (A);  
 $I_G$  – Corrente de um gerador fotovoltaico (A);  
 $I_L$  – Corrente gerada ou fotocorrente (A);  
 $I_{MPP}$  – Ponto de corrente máximo (A);  
m – Factor de idealidade de um diodo;  
R – Resistência ( $\Omega$ );  
 $R_S$  – Resistência série de uma célula ( $\Omega$ );  
 $R_P$  – Resistência paralela de uma célula ( $\Omega$ );  
T – Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  
V – Tensão (V);  
 $V_{OC}$  – Tensão em circuito aberto (V);  
 $V_G$  – Tensão do gerador solar (V);  
 $V_{MPP}$  – Ponto de tensão máximo (V);  
G – Radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

## 1. Introdução

Dentro do contexto energético actual, a energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia em contínuo desenvolvimento e expansão. Embora a produção mundial de electricidade recorrendo a sistemas fotovoltaicos seja ainda insignificante quando comparada com a produção total, o mercado tem experimentado um crescimento anual aproximado de 30% [1], indicando que este tipo de energia pode desempenhar um papel significativo na matriz energética futura.

Torna-se assim evidente que é cada vez mais importante uma correcta e eficaz caracterização do desempenho dos módulos PV, tanto em ensaios de resistência mecânica como de características eléctricas. Para a análise do desempenho eléctrico de um módulo PV é imprescindível determinar as curvas I-V, uma vez que estas fornecem informações sobre o gerador fotovoltaico que são importantes para o diagnóstico de degradação, o dimensionamento e estimativas de produção tais como: a corrente de curto-circuito, a tensão em circuito aberto, corrente e tensão do ponto de potência máxima e a variação com a temperatura e a radiação solar. Além destes aspectos técnicos, convém também ressaltar o consumidor, pois na altura de adquirir os módulos pode estar a ser lesado ao pagar uma potência nominal que os módulos não serão capazes de fornecer.

A determinação da curva “nominal” deve ser realizada nas condições padrão de ensaio, designadas na literatura inglesa por STC – *Standard Test Conditions* e caracterizam-se por  $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$  e  $AM=1.5$ , sendo  $G$  a radiação solar em  $\text{W/m}^2$  de superfície,  $T$  a temperatura ambiente em graus *Celsius* e  $AM$  a massa do ar. Fora destas condições padrão a curva precisa de ser corrigida.

Assim, o objectivo deste trabalho é o estudo e desenvolvimento de um sistema baseado em *PC* que permita gerar e adquirir as características I-V de módulos fotovoltaicos, através de um dispositivo electrónico, que na sua concepção cumpra com dois requisitos fundamentais:

- Configuração bastante simples para o utilizador final;
- De baixo custo.

No primeiro caso, o objectivo do trabalho assenta na simplicidade do “protótipo” de modo que qualquer utilizador o possa manejar sem grandes conhecimentos prévios sobre a temática abordada. Ainda neste ponto, outro dos factores tidos em conta foi o facto de se ter garantido uma grande portabilidade do equipamento, ou seja, garantiu-se a funcionalidade do dispositivo na eventualidade de os módulos a testar poderem estar localizados em locais remotos, como é normalmente o caso das centrais fotovoltaicas.

O segundo ponto prende-se com o facto de os equipamentos existentes no mercado terem um valor monetário bastante elevado. Este factor ainda é inibidor de os proprietários, principalmente os de instalações em edifícios e ligadas à rede, procederem à monitorização das falhas dos seus equipamentos. O custo do “protótipo” desenvolvido foi reduzido aproximadamente em dez vezes em relação a equipamentos existentes actualmente no mercado com características semelhantes.

## 2. Situação da energia solar fotovoltaica em Portugal

O nosso país, pelas suas especiais condições de recurso solar e pelos incentivos criados (Decreto-Lei 363/2007 – Microgeração), tem sido um dos países a nível europeu, cujo interesse na energia solar fotovoltaica tem aumentado nestes últimos anos. A juntar a este factor, outras duas questões devem ser tidas em conta. A primeira, é que existem compromissos comunitários que estabelecem a obrigatoriedade de assegurar, em 2010, a produção de 39 por cento de energia eléctrica a partir de energias renováveis [2]. A Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005 aprova a Estratégia Nacional para a Energia em que a produção de electricidade com base em energias renováveis passa de 39% para 45% em 2010. Por sua vez, há tectos relativos ao Protocolo de Quioto que implicam um limite máximo de emissões de  $CO_2$ . A segunda questão é económica, o país importa cerca de 85 por cento da energia que consome, o que o torna muito dependente do ponto de vista energético e, consequentemente, a importância das energias renováveis é indiscutível.

No início do ano, Portugal tinha uma potência instalada superior a 60 MW, este aumento deveu-o em grande parte às centrais de Serpa, com 11 MW, e Moura (construída na Amareleja) com uma potência instalada de 46 MW, estando já previstos mais alguns projectos com potências a instalar bastante significativas, existindo já licenciados 90 MW. Está ainda prevista a instalação de 50.000 sistemas até 2010 e um objectivo de 165 MW em 2015 (crescimento anual previsto de 20% - Fonte: Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005).

Os dados mais precisos podem ser vistos na tabela 2.1 onde se mostra a potência instalada no nosso país nos últimos anos.

**Tabela 2-1 - Potência instalada (MWp) em Portugal [3]**

Potência instalada (MWp)							
2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Fev-09
1,67	2,06	2,27	2,98	3,41	17,87	59,63	63,27

### 2.1. O mercado fotovoltaico em Portugal

Como já foi referido acima, com este aumento de potência instalada e com tendência a um aumento nestes próximos anos, o mercado fotovoltaico em Portugal apresenta um enorme potencial existindo, actualmente, projectos industriais com elevado volume de investimento e geradores de emprego, designadamente na microgeração.

- Indústria

Portugal apresenta condições ímpares para a produção descentralizada de energia a partir de fontes renováveis. A entrada em vigor do programa “Renováveis na Hora”, a par dos incentivos fiscais existentes para a instalação de equipamentos, veio finalmente estimular o investimento por parte dos cidadãos e empresas.

Tendo em conta que Portugal tem desvantagens a nível industrial (poucas e pequenas empresas), o novo mercado de microgeração permitirá mobilizar o empreendedorismo de pequenos e médios investidores, criar um tecido de pequenas e médias empresas instaladoras, produtoras de equipamentos (designadamente módulos e inversores), consultoras ambientais, serviços de manutenção, equipamentos de detecção de degradação, etc. O desenvolvimento gerado por esse mercado de pequena dimensão permitirá ao sector ir criando massa crítica, gerando emprego e incorporando cada vez mais valor acrescentado nacional ao produto, ao mesmo tempo que o torna cada vez mais competitivo. Esta é uma parte da cadeia de valor que o país deve e pode potenciar podendo mesmo tornar-se exportador.

Ao contrário da microgeração, a geração centralizada não acrescenta valor económico à população, pois as grandes centrais instaladas no nosso país foram construídas por multinacionais estrangeiras. Na empregabilidade também não se verifica que seja benéfica a longo prazo, visto que o emprego nestas grandes centrais é maioritariamente temporário enquanto é construída a central.

- Entidades certificadoras

Actualmente, e após um longo processo, existe em Portugal a Certificação do Produto, esta certificação requer um esquema composto por:

- Normas de requerimentos de produto e normas de ensaio;
- Laboratórios acreditados para efectuar os ensaios: O INETI está actualmente creditado para tal, prevendo-se a curto prazo o aparecimento de outras entidades capacitadas para a realização destes ensaios.
- Entidade certificadora dos produtos: a tarefa de outorgar a marca de produto certificado cabe actualmente ao CERTIF, entidade creditada pelo Sistema Nacional de Qualidade.
- Entidade certificadora das instalações: a tarefa de certificar as instalações eléctricas cabe actualmente ao CERTIEL.

### 3. Estado da arte

#### 3.1. Caracterização eléctrica de dispositivos fotovoltaicos. Tendências actuais

A caracterização eléctrica do dispositivo fotovoltaico através da medida da curva I-V é o mecanismo que nos dará informação fundamental sobre os seus parâmetros de comportamento quando exposto em operação. É por isso que existe uma intensa actividade no que refere à normalização dos métodos de medida da característica I-V de células e módulos PV com o objectivo de contar com procedimentos universais que permitam comparações entre distintos laboratórios.

No que se refere à medida de curvas I-V, a norma europeia EN 60904:1 especifica a maneira em que se deve realizar a medida da característica I-V, sendo de também especial importância todo o grupo de normas EN 60904: 1-10 incluídas na referência [4], por serem complementares com a primeira. Outro pilar fundamental é a norma EN 60891, que especifica a maneira de realizar a extrapolação da característica I-V desde umas condições de medida a outras desejadas. Estas normas, junto com as suas equivalentes americanas, apresentam a base para a medida e extrapolação de curvas I-V. No entanto, o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica, junto com a instalação massiva, a diversidade das aplicações e a possibilidade de analisar sistemas que já levam algum tempo de funcionamento levou a que diversos laboratórios e centros de investigação sugerissem variações ou melhorias com respeito ao estabelecido nas normas. Particularmente, com respeito aos processos de extrapolação há muitos estudos que propõem variações ou novas equações com o fim de ampliar os limites de validação ou diminuir o erro. Em geral estes métodos poderiam classificar-se em dois grandes grupos [5,6]: (1) os procedimentos algébricos que utilizam duas equações separadas para converter cada ponto I-V da curva característica medida utilizando os coeficientes de temperatura e algum outro parâmetro como a resistência série ou o factor de forma e (2) os procedimentos numéricos, que utilizam a descrição analítica da curva I-V mediante um modelo matemático que é extrapolado às condições desejáveis. Entre os primeiros pode-se destacar, à parte dos incluídos na norma EN 60891, o método de *Blaesser* [7], o de *Anderson* [8] ou o método utilizado pelo NREL [9]. Entre os métodos numéricos existem diversos trabalhos [10,11,12,13,14] que propõem equações para a variação dos parâmetros do modelo com as equações atmosféricas. Uma comparação do grau de aplicabilidade destes métodos na sua aplicação a diferentes tipos de módulos pode-se encontrar em [15]. Alguns autores apontam uma precisão ligeiramente superior para os métodos numéricos, no entanto estudos bastante completos assinalam que não existe diferença apreciável entre uns e outros, apresentando um nível de precisão de  $\pm 2\%$  na  $I_{sc}$  e  $\pm 3\%$  no  $I_{mpp}$  e  $V_{mpp}$ . Recomenda-se assim utilizar os métodos algébricos pela sua maior simplicidade.

A tendência actual, não obstante, vai um passo mais à frente. Referiu-se que os valores característicos de um módulo em condições *standard* não são suficientes para prever com fiabilidade o comportamento do mesmo em operação real do ponto de vista do empresário que quer investir neste tipo de energia. Propuseram-se também outras condições que parecem ser mais realistas, como as *Realistic Reporting Conditions* RRC [16] (dados meteorológicos tabelados para uma localização específica. Tudo isto encaminha-se para obter uma previsão fiável da potência que se obterá de um módulo PV quando operando em condições reais, fomentando assim o investimento neste tipo de energia, já que com os dados disponíveis do fabricante etiquetados não parece possível prever a produção com mais precisão de  $\pm 10\%$  [16]. A Comissão Electrotécnica Internacional (CEI)

conta com um grupo de trabalho [17] que estabelece os requerimentos para avaliar o funcionamento de módulos PV tanto em termos de potência (W) como em termos de produção (w/h). O Instituto de Engenharia Elétrica e Electrónica dos Estados Unidos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE*) também trabalhou neste campo com o objectivo de emitir uma norma, no entanto até à data emitiram só algumas referências.

Os trabalhos mais recentes tentam prever o comportamento do módulo PV em condições reais a partir da criação de matrizes de radiação solar-temperatura-potência para cada tipo de módulo. Pode-se destacar o método que está a ser desenvolvido no ESTI-ISPRA que cria a matriz a partir de medidas no interior, obtendo-se uma precisão de  $\pm 2\%$  para medidas de módulos de silício, já que para as outras tecnologias é necessário combinar medidas de interior e exterior.

Estes métodos parece que vão a solucionar o problema das discrepâncias existentes hoje em dia entre as previsões energéticas baseadas nos valores de potência dados pelo fabricante e a produção real de um sistema, no entanto está-se à espera ainda de um quadro normativo internacionalmente aceite.

### **3.1.1. Caracterização de centrais fotovoltaicas**

Tudo o que foi dito no ponto anterior, sobre a caracterização eléctrica de dispositivos fotovoltaicos é aplicável à caracterização de centrais fotovoltaicas de maior tamanho, no entanto, dado que nestes existem outros efeitos não presentes na medida da característica I-V de células e módulos, tomou-se a opção de se fazer algumas considerações à parte.

Em primeiro lugar, a medida da curva I-V realiza-se da mesma maneira, mas há que se ter em conta que os elevados valores de tensão e corrente que se podem encontrar numa central fotovoltaica descartam métodos que impliquem dissipação de potência. O sistema mais utilizado é mediante o uso de condensadores, existindo várias soluções comerciais disponíveis de elevada precisão, fiabilidade e portabilidade.

Em segundo lugar, se bem que nas células e módulos é possível realizar a medida em interior com um simulador solar ou em exterior, para o caso de centrais fotovoltaicas, estas voa realizar-se no exterior, onde há um menor controlo sobre as condições de medida. Além disso, factores como as perdas por dispersão dos parâmetros, perdas nos cabos, perdas por sujidade e distribuição espectral deverão de se ter em conta na hora de calcular a potência da central.

A norma internacional IEC1829 especifica a maneira como devem ser realizadas as medidas de centrais fotovoltaicas. Esta norma presta especial atenção a medidas da radiação solar de referência e à temperatura da central. Para além disso, existe um documento editado pela Comissão das Comunidades Europeias que indica tanto a maneira de realizar as medidas das centrais como a extrapolação das mesmas, o tipo e periodicidade de inspecções aos módulos e faz recomendações sobre as medidas de inversores e baterias se as houver.

## 3.2. Modelação de dispositivos fotovoltaicos como geradores de corrente

### 3.2.1. Modelos eléctricos

A corrente eléctrica gerada por uma célula solar vem dada por a diferença entre a corrente fotogerada,  $I_L$ , subtraída a corrente no escuro,  $I_D$ :

$$I = I_L - I_D \quad (3.1)$$

Desenvolvendo a expressão da corrente no escuro, segundo a teoria de *Shockley* [25], obtêm-se a seguinte expressão:

$$I = I_L - I_0 \cdot \exp\left(\frac{V}{mV_t}\right) \quad (3.2)$$

Donde  $I_0$  é a corrente inversa de saturação do díodo,  $V_t$  é a tensão térmica ( $V_t = kT/e$ , sendo  $K$  a constante de *Boltzman*,  $T$  a temperatura em graus *Kelvin* e  $e$  é a carga do electrão) e  $m$  é o factor de idealidade do díodo. Para o caso da célula solar, *Wolf* e *Rauschenbach* [18] encontraram que a característica da corrente podia-se representar de uma maneira mais precisa por um modelo de duas exponenciais, em que o primeiro termo exponencial corresponde às componentes de corrente nas zonas neutras com maior influência nas zonas de tensões altas, e o segundo termo corresponderia à componente de geração na zona de carga, com mais influência nas zonas de menor tensão ( $V \leq 0,4V$ ). Se a isto se somar as quedas de tensão desde o ponto de geração (emissor, base, malha metálica, superfície de contacto, entre outros), e as correntes de fuga que podem afectar a característica, a equação que resulta é:

$$I = I_L - I_{01} \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_1 V_t}\right) - I_{02} \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_2 V_t}\right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Donde:

- $I_{01}$  e  $I_{02}$  são as correntes inversas de saturação dos díodos que representam os fenómenos de difusão nas zonas neutras e de recombinação nas zonas de carga respectivamente;
- $m_1$  e  $m_2$  são os factores de idealidade de ambos os díodos, com valor teórico de  $m_1=1$  em zonas neutras para qualquer mecanismo de baixa injeção e um valor de  $m_2=2$  se se associa a recombinação através de um centro situado na metade da banda proibida. Observaram-se ainda outros valores;
- $R_s$  é o termo da resistência série expressando as quedas desde o ponto de geração até aos contactos. Teoricamente é variável com a tensão (é uma resistência distribuída), no entanto do ponto de vista

prático e funcional a suposição de que permanece constante é uma solução muito adequada em circunstâncias normais;

- $R_p$  é uma resistência em paralelo associada a caminhos de circulação de corrente de fugas por entre as bordas da célula, pequenos circuitos metálicos, etc.

### **Simplificações da equação**

A equação atrás descrita conforma-se como um modelo de duas exponenciais donde há que determinar 7 parâmetros. Em determinados casos podem-se assumir certas simplificações reduzindo o número de parâmetros. Pode-se destacar:

- Assumir que os factores de idealidade dos díodos têm os seus valores teóricos  $m_1=1$  e  $m_2=2$ , no qual obteria-se um modelo com 5 parâmetros a determinar;
- Assumir que a recombinação pode modelar-se adequadamente com um só diodo, o que equivaleria a fazer  $I_{02}=0$ :

$$I = I_L - I_{01} \exp\left(\frac{V + IR_s}{m_1 V_t}\right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.4)$$

- Assumir que o valor de  $R_p \rightarrow \infty$ , hipótese aceitável em células de elevada qualidade.

### **3.2.2. Métodos de extracção de parâmetros**

A determinação dos parâmetros da característica I-V de dispositivos fotovoltaicos tem sido abordada fundamentalmente desde o início desta tecnologia. Um deles baseia-se na extracção dos parâmetros do modelo a partir da curva no escuro, na qual se pode medir mais facilmente e em condições controladas, sobretudo de temperatura, no entanto assume-se que os parâmetros do modelo não variam com a iluminação e que o comportamento do dispositivo PV em iluminação pode-se descrever com os parâmetros obtidos da curva no escuro. É de referir que a iluminação não produz uma translação simples da curva I-V ao largo do eixo da corrente, já que os mecanismo de carga também se modificam. A outra alternativa consiste em utilizar curvas de iluminação que são bem mais difíceis de medir com precisão, sobretudo o controlo da temperatura durante a medida, mas apresentam como vantagem a possibilidade de estudar-se a variação dos parâmetros do modelo com a radiação solar e temperatura.

Os procedimentos para a determinação dos parâmetros do modelo, podem-se dividir em dois grandes grupos. O primeiro englobaria aqueles que fazem uso de propriedades locais da curva, ou seja, para obter um número de

equações igual ao número de parâmetros a determinar e resolver assim o sistema por métodos numéricos, ou para chegar, mediante aproximações, a soluções analíticas dos parâmetros. O segundo compreenderia os métodos matemáticos de ajuste que minimizam um critério de erro com fim de se obter o conjunto de parâmetros que melhor se ajusta à equação de pontos experimentais.

### 3.3. Sistemas desenvolvidos para traçar a curvam I-V

De entre a literatura estudada, o trabalho apresentado na referência [19] descreve um equipamento utilizado para a medida das características de módulos em que o varrimento dura 5 ou 15s e são adquiridas entre 100 e 300 amostras que permitem representar uma curva I-V. O equipamento descrito permite realizar testes com corrente até 32A e tensão até 120V e é ainda utilizada uma fonte de tensão que permite flexibilidade e facilidade na polarização do módulo, além de boa precisão e velocidade de varrimento. Porém estas fontes têm limitações de corrente e tensão, o que limita o seu uso a certos módulos além do custo elevado e dificuldades de transporte devido ao peso e dimensão. Outro sistema com algumas semelhanças com o anterior validado e desenvolvido pelo autor da referência [20] utiliza também uma fonte de tensão com multímetros comandados por um programa de computador. Este sistema tem como principal característica a aquisição de 512 amostras num tempo aproximado de 1,8s. A linguagem de programação utilizada foi *Basic* para *MS-DOS*.

Mais recentemente, os autores citados da referência [21], desenvolveram um sistema baseado no paralelo de resistências como carga para o módulo. As resistências são comutadas de forma a permitir que a curva característica I-V seja “varrida” de  $I_{sc}$  até  $V_{oc}$ , isto é, a corrente de curto-circuito e a tensão em circuito aberto respectivamente. A figura 3.1 mostra o sistema de medidas em que são seleccionados sequencialmente diferentes módulos e também são escolhidas as combinações de resistências utilizadas como carga. A curva é adquirida e apresentada em *PC* permitindo ao sistema bastante mobilidade.

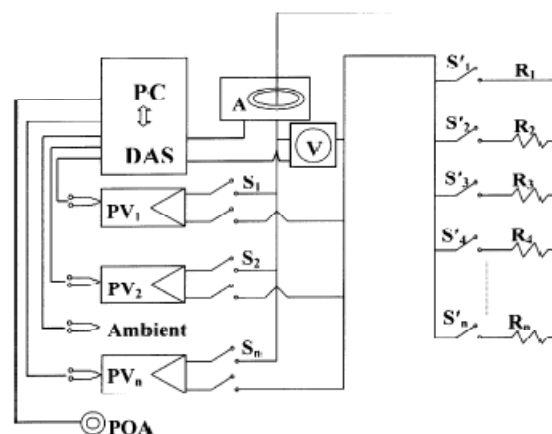
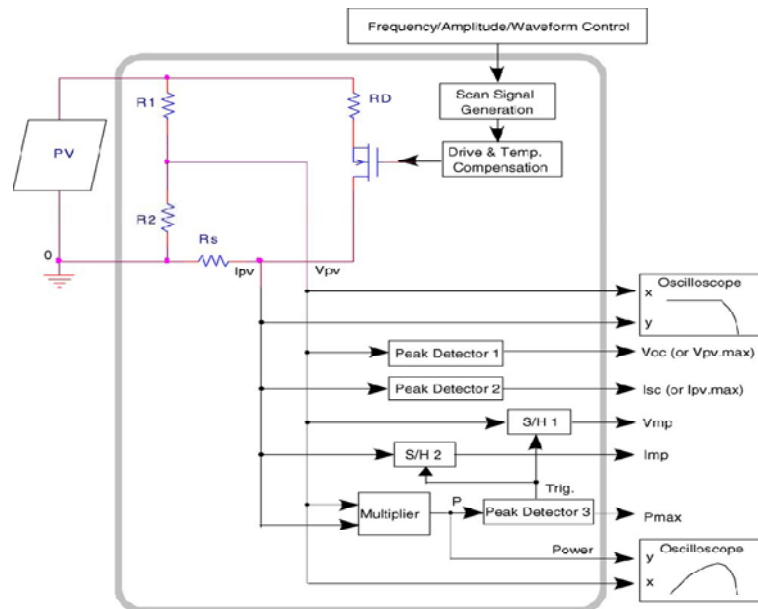


Figura 3.1 - Esquema para a obtenção da característica I-V [21]

Para a medida de centrais fotovoltaicas ou “arrays” de módulos fotovoltaicos, cujos valores de tensão e corrente são bastante elevados, os investigadores mencionados na referência [22] descrevem um circuito baseado em *MOSFET*, como é ilustrado na figura 3.2.



**Figura 3.2 - Diagrama de blocos da unidade de testes [22]**

A curva característica I-V e a curva da potência são apresentadas num osciloscópio e é utilizado um divisor de tensão para dividir a tensão por um factor que os osciloscópios possam medir. Neste sistema tem de ser ainda implementado o controlo do *MOSFET* para que a curva possa ser “varrida”.

Para além da vantagem acima referida o uso de *MOSFET* apresenta outra vantagem interessante, que é a rápida variação de carga adaptando-se melhor às constantes variações das condições atmosféricas, no entanto, no sistema apresentado existem erros de medida introduzidos pelo divisor de tensão e na medida da corrente através de uma resistência ( $R_s$ ).

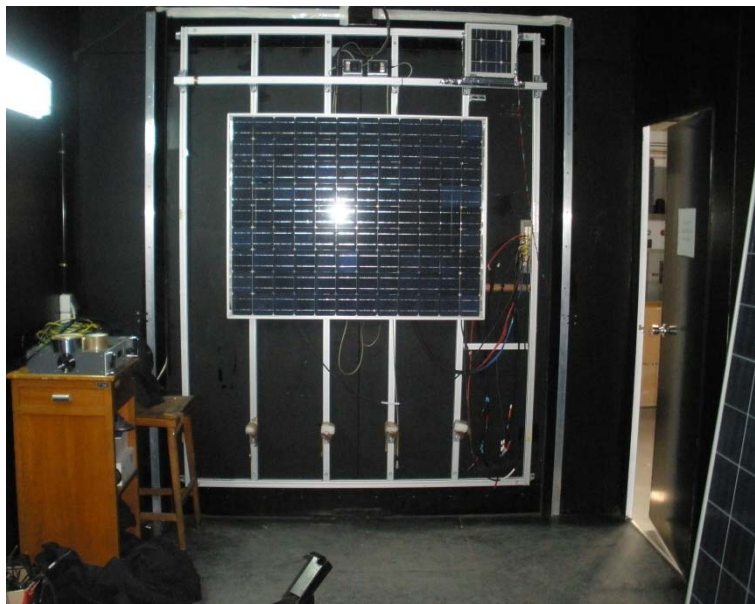
Muitos dos ensaios destinados à caracterização das propriedades eléctricas dependem da não variação de parâmetros externos, como a radiação solar, a temperatura ambiente, a velocidade do vento entre outros. Assim experiências para a caracterização eléctrica têm sido realizadas sem iluminação natural, apresentando vantagens em relação às técnicas referidas acima. Na referência [23] vêem-se desenvolvendo pesquisas e ensaios no escuro para detectar defeitos de fabricação em módulos. É usada uma fonte de tensão para polarizar o módulo e consegue-se fazer medidas de corrente até 35A e de tensão máxima de 60V. Para determinarem a corrente e outros parâmetros como por exemplo a  $R_s$  e  $R_p$ , os autores, utilizam um *software* que estima estes parâmetros.

Da bibliografia estudada conclui-se ainda que outros investigadores defendem também o uso de simuladores solares como uma alternativa para diminuir a dependência das condições atmosféricas. Normalmente estes

simuladores são constituídos por uma fonte luminosa preparada para emitir a radiação solar padrão ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ), por elementos ópticos e filtros para que o espectro do feixe luminoso seja idêntico ao da radiação solar e por último a temperatura é mantida a  $25^\circ\text{C}$ , normalmente pela utilização de ar condicionado. A principal desvantagem do uso destes simuladores é o seu elevado preço e volume. Um exemplo do uso de simuladores para a caracterização de módulos é o Ciemat – “Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas” como é ilustrado nas figuras 3.3 e 3.4.



**Figura 3.3 - Simulador solar do Ciemat (1)**



**Figura 3.4 - Simulador solar do Ciemat (2)**

## **4. Células e módulos fotovoltaicos**

### **4.1. Teoria básica de semicondutores. Efeito fotovoltaico**

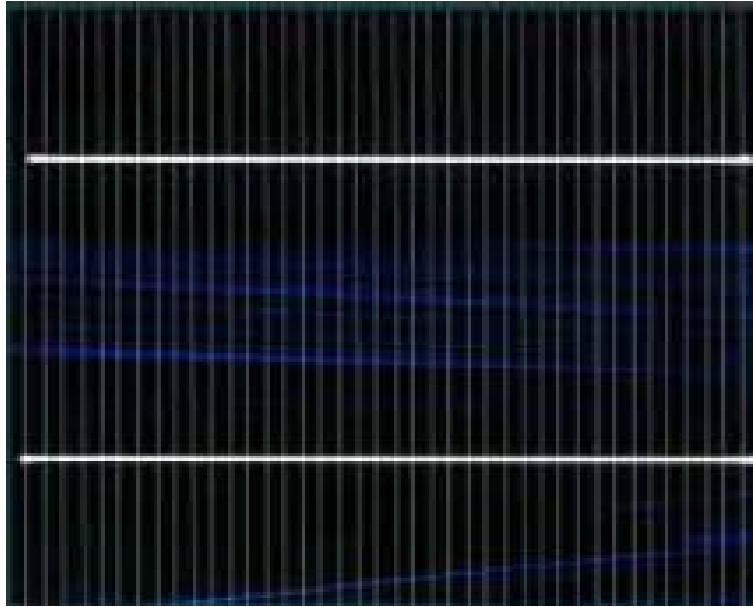
A conversão fotovoltaica baseia-se no efeito fotovoltaico, ou seja, é baseada na conversão da energia proveniente do sol em energia eléctrica. Para se levar a cabo esta conversão utilizam-se dispositivos – células solares – constituídas por materiais semicondutores nos quais, artificialmente, se cria um campo eléctrico constante (mediante uma união p-n).

O material semiconductor por excelência é o silício dada a sua abundância na Terra e pelas suas propriedades eléctricas, 90% das células solares actuais são fabricadas de silício. Não obstante, também são utilizados outros materiais, cabe citar o arsenieto de gálio com melhores qualidades que o silício para a produção de energia eléctrica, mas a sua escassez na natureza fazem-no extremamente caro, sendo apenas utilizado em aplicações espaciais. Outros materiais utilizados são teluriato de cádmio ou disselenieto de cobre e índio, entre outros.

### **4.2. Estrutura básica de uma célula**

Um semiconductor, sem estrutura p-n, mesmo iluminado não provoca a circulação de corrente eléctrica. Quando exposto à luz o único que se conseguiria era que o semiconductor ficasse quente. A união p-n faz possível a circulação de corrente eléctrica graças à presença de um campo eléctrico. Praticamente todas as células solares disponíveis na actualidade estão constituídas por uma união como a descrita anteriormente.

Outro conceito importante na estrutura de uma célula solar é o desenho do comumente chamado, malha de metalização, os contactos metálicos que vão realizar-se para extrair a corrente eléctrica da célula. Não se deve esquecer que é um metal absorvente da luz. A face frontal de uma célula, a que recebe a radiação solar, ao mesmo tempo que colecta as cargas tem que permitir que os fótons passem para o interior do cristal. Pode-se pensar então que tem de ser o mais pequeno possível, mas se se faz demasiado pequeno, um dos parâmetros da célula solar cuja influência mais à frente fazer referência, a resistência série, aumenta e isso significará uma perda de eficiência da célula. Assim tem de se chegar a uma solução de compromisso em que o valor da malha da célula seja o suficientemente baixo para permitir a passagem da luz do sol e não muito alto para que a resistência série se mantenha em níveis toleráveis.



**Figura 4.1 – Malha de metalização frontal de uma célula [24]**

### **4.3. Características de uma célula solar**

#### **4.3.1. Corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto**

O maior valor da corrente na região de geração obtém-se para condições de curto-circuito,  $V=0$ . Segundo a equação 4.1, a corrente de curto-circuito vem dada por:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L \quad (4.1)$$

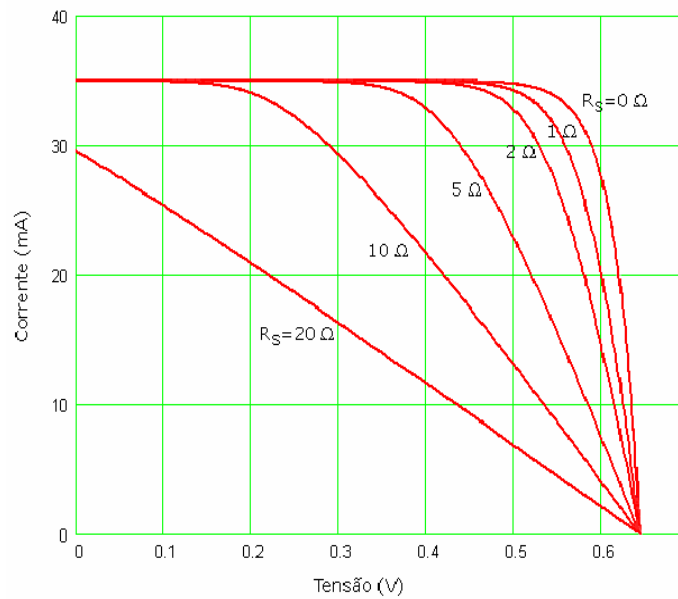
Se o dispositivo se mantiver em circuito aberto ( $I=0$ ), este auto polarizar-se-á com uma certa tensão, tensão de circuito aberto e o seu valor é tal que a corrente gerada fica completamente compensada pela corrente de polarização ( $I_L=I_D$ ). Para além destas considerações, e para se ter um modelo mais perto à realidade, deviam-se incluir dois elementos, a resistência série e paralelo, que afectam a eficiência da célula.

A resistência série é formada principalmente pelos seguintes componentes resistivos:

- ✓ Resistência do material da célula;
- ✓ Resistência da malha condutora na face interior da célula;
- ✓ Resistência ao longo do barramento de contacto da parte interior da célula;
- ✓ Resistência do contacto na face posterior da célula.

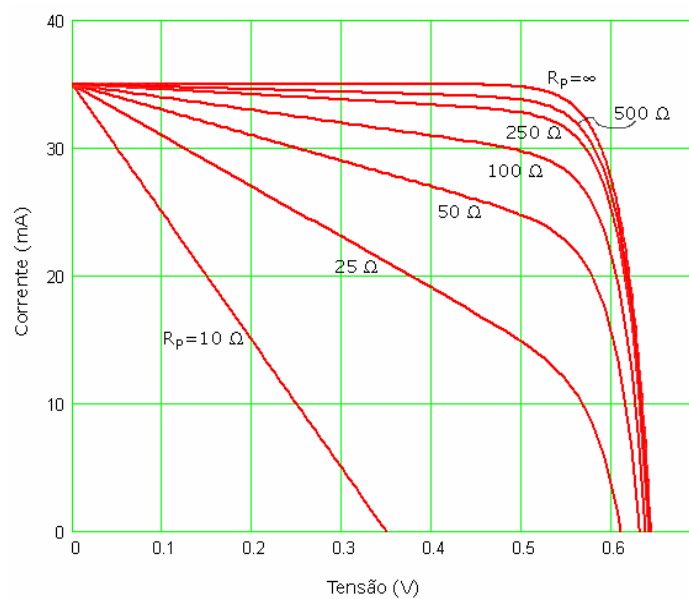
A resistência paralela tem origem principalmente em fugas de corrente.

O principal efeito de  $R_s$  na curva I-V observado na figura 4.2 é uma redução da inclinação da curva na região da tensão de circuito aberto.



**Figura 4.2 - Efeito da variação da resistência série na curva I-V [24]**

Como já foi referido acima, a  $R_p$  reúne num componente resistivo os diversos factores que originam fugas de corrente. Idealmente  $R_p$  seria infinita e o seu efeito na curva característica é uma redução da inclinação da curva na região da corrente de curto-circuito como pode ser observado na figura 4.3.



**Figura 4.3 - Efeito da variação da resistência paralela na curva I-V [24]**

### 4.3.2. Curva de potência. Ponto de potência máxima

A região da curva característica compreendida entre  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  corresponde ao funcionamento da célula como gerador, para cada ponto da curva I-V, obtendo-se um valor de tensão e de corrente de trabalho, ou seja, uma potência ( $P=VI$ ), que se pode representar como mostra a figura 4.4.

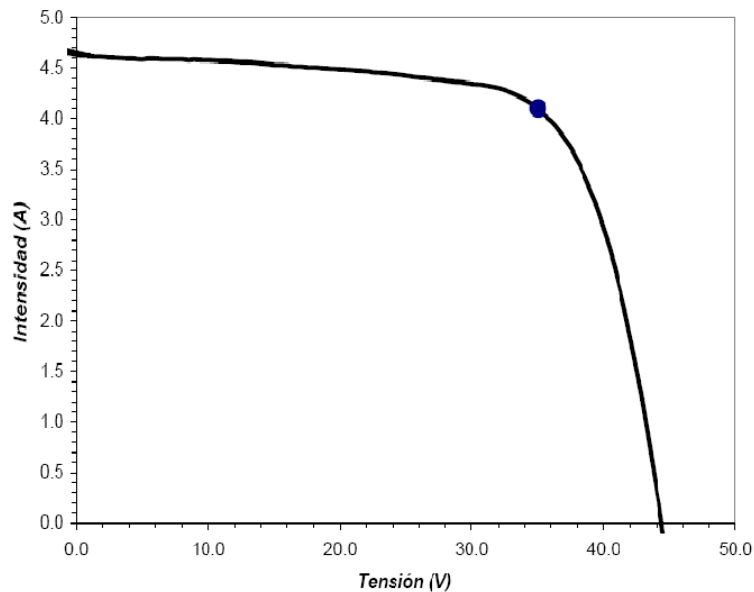


Figura 4.4 - Curva I-V e ponto de máxima potência retirada do simulador do Ciemat

Se a energia é dada a uma carga com resistência não nula, a potência entregue vem dada pelo produto atrás referido e existirá um ponto de funcionamento ( $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ) em que a potência entregue é máxima – ponto de máxima potência.

### 4.3.3. Factor de forma

O produto  $I_{mpp} * V_{mpp}$  que nos dá a potência máxima, vem representado na figura seguinte pela área do rectângulo a azul claro, que é obviamente menor que o rectângulo que representa o produto  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , sendo por tanto sempre menor que a unidade e vem dado pela equação 4.2.

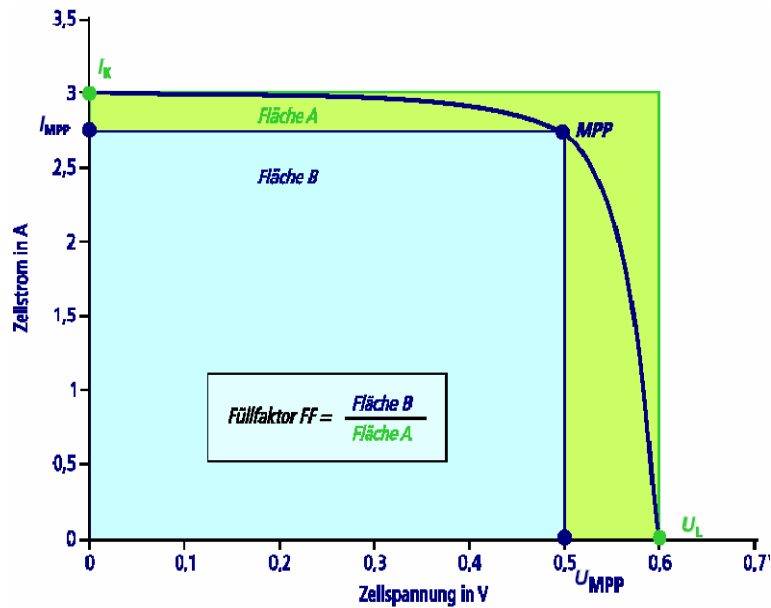


Figura 4.5 – Factor de forma de células solares [25]

$$FF = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (4.2)$$

O factor de forma é um parâmetro de grande importância e de grande utilidade prática, pois é o indicador da qualidade das células. Para as células cristalinas solares, o factor de forma tem um valor que se situa entre **0,70** a **0,85** e para as células solares amorfas este valor situa-se entre **0,5** a **0,7**.

Fazendo uso da definição do factor de forma, a potência máxima entregue por uma célula é dada pela expressão 4.3.

$$P_{m\acute{a}x} = FF * I_{sc} * V_{oc} \quad (4.3)$$

#### 4.3.4. Eficiência de conversão das células solares

A eficiência de conversão energética de uma célula solar define-se como sendo o quociente entre a máxima potência eléctrica que se pode entregar à carga e a potência da radiação,  $G$ , incidente sobre o dispositivo.

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{G} \quad (4.4)$$

Naturalmente, esta eficiência e a potência máxima obtêm-se unicamente se a resistência de carga é a adequada, dada por  $V_{mpp}/I_{mpp}$ . Por exemplo, quando se diz que uma célula comercial tem uma eficiência de 15% significa que, se tivéssemos uma superfície de célula de  $1\text{m}^2$  por cada  $100\text{W}/\text{m}^2$  de radiação incidente, obteríamos unicamente 15W eléctricos.

#### 4.3.5. Influência da temperatura

Da mesma maneira que em outros semicondutores, a temperatura é um factor muito importante na análise e caracterização de uma célula solar. Pode-se observar na figura 4.6 que a corrente de curto-circuito aumenta ligeiramente com a temperatura (quase não é perceptível na figura), mas aparece uma diminuição forte da tensão de circuito aberto, pelo que, o rendimento de uma célula decresce com a temperatura. Assim, este factor tem uma influência significativa na resposta eléctrica do módulo, tendo em conta que em aplicações terrestres as células solares podem chegar facilmente a  $70^\circ\text{C}$ , sendo assim importante modelizar bem os coeficientes de temperatura.

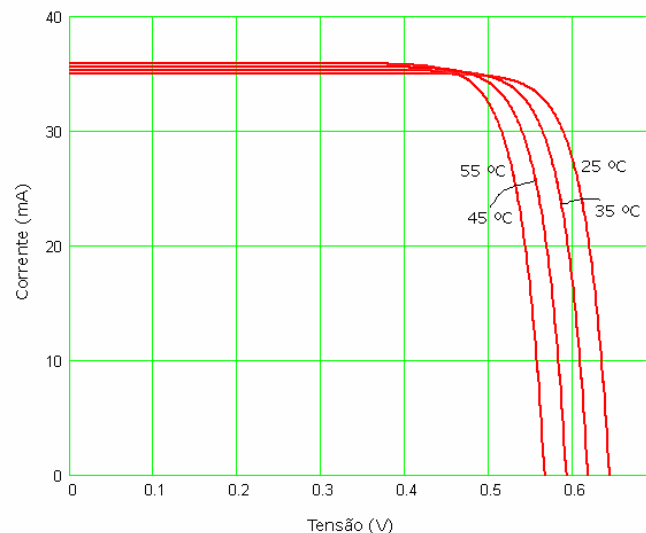


Figura 4.6 – Efeito da temperatura na curva I-V [24]

#### 4.4. Tipos de células

##### 4.4.1. Silício monocristalino

As células de silício monocristalino são historicamente as mais usadas e comercializadas para conversão de energia solar em electricidade e são fabricadas a partir do cristal de silício. Estas células são as mais eficientes, de todas as células de silício. O monocristal é obtido a partir do silício fundido de alta pureza ( $\text{Si} = 99,99\%$  a

99,9999%) em reactores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora), sendo este processo de crescimento do silício conhecido como método *Czochralski* [26]. Por fim as células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4-0,5 mm de espessura). A sua eficiência na conversão de luz solar em electricidade é superior a 12%.

#### **4.4.2. Silício policristalino**

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino, por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso, no entanto a sua eficiência cai um pouco se as compararmos. O processo de pureza do silício utilizada na produção das células de silício policristalino é similar ao processo anterior, o que permite obtenção de níveis de eficiência semelhantes.

Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas na fabricação das células monocristalinas, porém com controlo menos rigoroso. Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais [26].

#### **4.4.3. Células de silício amorfo**

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de “desordem” na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em células solares tem mostrado grandes vantagens, tanto nas propriedades eléctricas como no processo de fabricação.

Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem sendo uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas grandes desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afectadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citadas, são elas: processo de fabricação relativamente simples e barato, possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e baixo custo de produção [26].

#### **4.4.4. Células de arsenieto de gálio**

Este tipo de células é dos que apresenta melhores características para a produção de energia eléctrica, embora as células solares de arsenieto de gálio apresentem elevada eficiência, não são competitivas em termos de aplicações terrestres devido aos altos custos envolvidos no seu processo de fabricação e à sua escassez na natureza.

#### **4.4.5. Células de teluriato de cádmio**

O mais recente competidor do silício policristalino e do silício amorfo no mercado fotovoltaico para geração de energia é o teluriato de cádmio. Para aplicações em calculadoras já vem sendo usado há quase uma década, mas em aplicações terrestres, somente há pouco tempo é que começam a ser comercializados painéis solares de grandes áreas.

Estes painéis, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom azulado escuro, também apresentam um atractivo estético em comparação com o silício policristalino. Assim, como no caso do silício amorfo, os custos de produção do teluriato de cádmio são atractivamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem óptimas hipóteses de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de energia eléctrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção [26].

#### **4.4.6. Células de disseleniuto de cobre e índio**

Outro sério competidor no mercado fotovoltaico são os compostos baseados no disseleniuto de cobre e índio, ou simplesmente *CIS*, principalmente pelo seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas.

As células solares de disseleniuto de cobre e índio apresentam, como o silício amorfo e o teluriato de cádmio, uma óptima aparência estética e tendem a surgir no mercado com grandes superfícies, encontrando-se normalmente em aplicações arquitectónicas diversas [26].

### **4.5. O módulo fotovoltaico**

A utilização prática das células solares faz-se através da sua ligação em série ou paralelo. As células são encapsuladas de forma a serem protegidas dos agentes atmosféricos e de outros efeitos potencialmente danificadores para a sua longevidade. O conjunto transportável de células forma um módulo solar fotovoltaico. Estes módulos podem ser ligados em série ou paralelo de modo a satisfazer a aplicação desejada. Ao conjunto de módulos, os seus suportes, cablagens, etc, denomina-se gerador fotovoltaico.

#### 4.5.1. Características de um módulo

Conforme se disse no ponto anterior, um gerador fotovoltaico tem várias células ligadas em série e paralelo. Mesmo que se conhecesse a curva característica  $I$ - $V$  de todas as células, não seria tarefa fácil obter a curva  $I$ - $V$  característica de todo o gerador fotovoltaico.

Assim, para determinar as características de funcionamento de um gerador fotovoltaico pode fazer-se as seguintes simplificações:

- a) O efeito da resistência paralela é desprezado;
- b) Considera-se a corrente fotogerada,  $I_L$  e a corrente de curto-circuito,  $I_{sc}$  são iguais;
- c) Para todas as condições de trabalho tem-se:  $\exp\left[\frac{V + IR_s}{V_t}\right] \gg 1$ ;
- d) Considera-se que todas as células são idênticas e estão sob as mesmas condições de iluminação e temperatura, esta condição nem sempre é verificada, pois pode haver sombreamento parcial e/ou a temperatura das células pode não ser homogênea;
- e) As quedas de tensão nos condutores que interligam as células e os módulos são desprezáveis.

Com estas condições e a partir da equação 3.4 estão reunidas as condições para determinar a curva característica  $I$ - $V$ .

#### 4.5.2. Parâmetros eléctricos

Os parâmetros eléctricos dos módulos fotovoltaicos são determinados pelos fabricantes nas condições de referência. A corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ , a tensão de circuito aberto,  $V_{OC}$  e o índice máximo de potência,  $P_{MPP}$ , são especificados para os módulos solares com uma margem de tolerância inferior a + 10%.

Na realidade estas condições ocorrem muito raramente. Mesmo no caso de o sol brilhar com a intensidade especificada, a temperatura da célula será sempre superior a 25 °C. Por este motivo é muitas vezes especificada a temperatura nominal de funcionamento da célula do módulo (TONC). Esta temperatura da célula é determinada para um nível de radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup>, uma temperatura ambiente de 20 °C e para uma velocidade do vento de 1 m/seg. A partir destes dados podem ser determinados os coeficientes térmicos da corrente e da tensão. Para além das especificações eléctricas, também é fornecida informação sobre as dimensões, o peso, os valores limite de pressão térmica e mecânica e a dependência da temperatura [26].

### 4.5.3. Parâmetros térmicos

#### *Coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito*

Este coeficiente define-se como a variação da corrente de curto-circuito de um dispositivo por unidade de variação de temperatura. Podem usar-se valores absolutos ou relativos. Símbolo:  $\alpha$  .

#### *Coeficiente de temperatura para a tensão em circuito aberto*

É um coeficiente que indica a variação da tensão em circuito aberto de um dispositivo por unidade de variação da temperatura. Símbolo:  $\beta$  .

#### *Coeficiente de variação de potência máxima com a temperatura*

Este coeficiente é a variação de potência máxima de uma célula por unidade de variação de temperatura. Símbolo:  $\gamma$  . Alguns literaturas refere-se a este coeficiente como simplesmente coeficiente de temperatura, no entanto é mais preciso utilizar a sua denominação completa.

### 4.5.4. Parâmetros físicos

Estes parâmetros são máximos ou intervalos para os quais não se degradam as suas condições iniciais:

- Temperatura admissível no módulo: Intervalo de temperaturas de trabalho;
- Humidade relativa máxima (%);
- Tensão máxima do sistema: é a tensão máxima que o módulo pode suportar, devido ao seu isolamento;
- Pressão superficial ( $N/m^2$ );
- Torção máxima: ângulo de torção suportado ( $^\circ$ );
- Dimensões: longitude (mm), altura (mm) e espessura (mm);
- Peso (Kg).

### 4.5.5. Outras especificações

#### *Características da caixa de conexão*

É de algum interesse verificar as características da caixa de conexão, onde se conectam electricamente os circuitos e onde podem ser colocados dispositivos de protecção. Alguns fabricantes especificam as conexões possíveis do módulo a distintas tensões, assim como, desenhos destas conexões. Por exemplo, existem no mercado módulos que podem trabalhar em sistemas a 6 e 12V sedo para isso apenas preciso realizar uma conexão dentro da caixa.

### *Materiais e construção*

Nem todos os fabricantes especificam os materiais de construção do módulo, outros, no entanto, fazem-no de forma exaustiva.

### *Garantia*

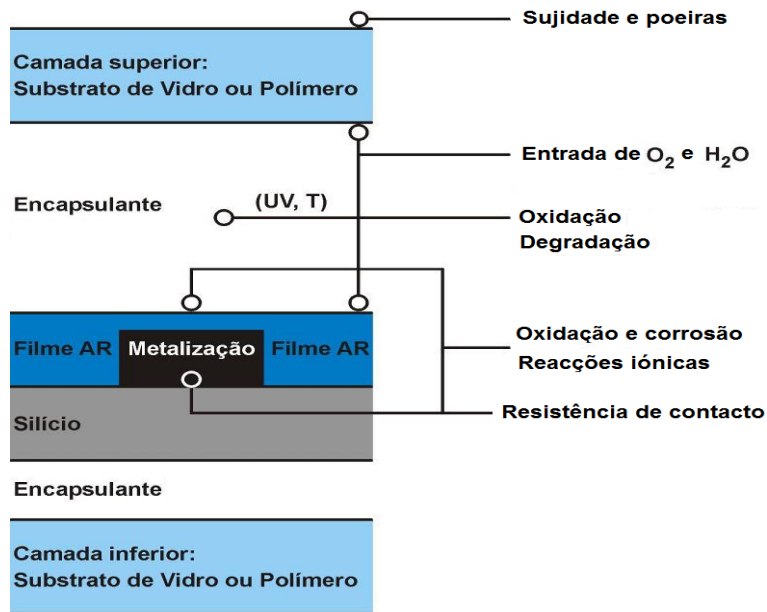
Distinguem-se dois tipos de garantia, a posterior à instalação, normalmente durante um ano, cobrindo os defeitos de instalação ou materiais defeituosos e a que garante a produção do módulo nas condições especificadas (a potência máxima em condições *standard*), que pode ser entre dez a vinte e cinco anos. Hoje em dia é comum encontrarem-se garantias de 25 anos. A extensão destas garantias baseia-se nos excelentes resultados de campo. Publicações sobre fiabilidade de sistemas fotovoltaicos indicam-nos que os módulos são a parte mais fiável do sistema. O aumento dos períodos de garantia baseiam-se, também, nos dados que indicam que os módulos podem resistir este tempo em operação.

## **5. Modos de degradação**

A degradação que conduz à falha nos módulos fotovoltaicos segue uma progressão que depende de múltiplos factores, tais como a degradação dos materiais de laminação, degradação de interconexão entre células, degradação causada pela humidade e a degradação das próprias células são os factores mais preocupantes.

A ilustração 5.1, mostra que a degradação pode ocorrer por intempéries, impurezas, o acumular de sujidade e detritos no vidro, oxidação e degradação do encapsulante. Muitos destes problemas ocorrem devido a elevadas concentrações iónicas provenientes do aprisionamento de vapores e gases, bem como a utilização inadequada de produtos durante o processo de fabricação do módulo fotovoltaico. Além destes, ocorrem também problemas como a descoloração do encapsulante que é classificada por índices, que variam desde branco, amarelado até tonalidades castanho-escuro [27].

Antes de tentar eliminar ou mesmo reduzir estes modos de degradação é necessária uma profunda compreensão da sua origem e comportamento.



**Figura 5.1 - Principais agentes responsáveis pela degradação de módulos fotovoltaicos [27]**

### 5.1. Sujidade na superfície frontal

Este modo de degradação pode ocorrer devido ao acumular de sujidade na camada superior do módulo. Este factor pode representar perdas na ordem de dez por cento, pois devido à chuva e vento vai existindo uma limpeza natural do vidro. No entanto a sujidade acumulada pode sombrear parcialmente uma célula no módulo fazendo com que produza uma corrente menor que outra fileira de células. Se não houver a devida protecção eléctrica, esse sombreamento pode provocar o aparecimento de pontos quentes.

### 5.2. Degradação do encapsulante

A degradação óptica pode resultar da descoloração do material de encapsulamento, habitualmente devido à exposição prolongada da radiação ultravioleta (*UV*), temperaturas elevadas e humidade. Normalmente o envelhecimento do módulo ocorre em locais onde a temperatura de trabalho das células fique próximo dos 70°C. Este tipo de degradação está associado ao aparecimento de manchas de tonalidade acastanhada no encapsulante como se vê na figura 5.2, fazendo com que uma grande fracção da radiação solar seja absorvida e reduzindo assim a eficiência do dispositivo.



**Figura 5.2 - Degradação do encapsulante [28]**

### **5.3. Reacções entre o encapsulante e o filme anti-reflexo**

A reflectividade do silício nú é cerca de 35% da radiação solar. Esta percentagem pode ser reduzida em 20 % através da textura da superfície e cerca de 3% pela adição de um filme anti-reflexo [28]. Estes revestimentos anti-reflexos são transparentes e normalmente óxidos podendo estes reagir quimicamente com o encapsulante comprometendo a durabilidade do módulo. Uma das reacções mais frequentes é a oxidação metálica entre os contactos metálicos das células e ocorre devido a infiltrações de água no módulo, como o ilustrado na figura 5.3. A oxidação da malha metálica pode causar curto-circuitos e pontos quentes.



**Figura 5.3 - Oxidação da malha metálica das células [28]**

Outro factor causador de defeitos é a diferença das propriedades físicas, como a elasticidade e o coeficiente de expansão do encapsulante e do revestimento anti-reflexo. Existe diferença significativa entre o coeficiente de expansão térmica dos dois materiais, sendo importante salientar que os ciclos térmicos diurnos e nocturnos podem resultar em fracturas das interconexões. Para evitar estes problemas, o material utilizado para encapsular deve possuir propriedades bem flexíveis, dando conta desta gama de variações.

## **6. Análise da degradação**

Para analisar a degradação dos módulos fotovoltaicos é necessário um conjunto completo de métodos de avaliação antes de serem sujeitos às condições de operação no exterior. De seguida serão apresentados os métodos mais utilizados para a análise e inspecção de módulos fotovoltaicos.

### **6.1. Inspeção visual**

A inspeção visual é o primeiro método a ser utilizado na detecção de falhas nos módulos. Esta inspeção vai revelar sombreamento parcial de células, células danificadas, escurecimento do encapsulante e a oxidação da malha metálica. Para ajudar na inspeção visual, habitualmente, são tiradas fotografias para que os defeitos possam ser bem identificados e para ajudar numa referencia futura.

### **6.2. Medição da curva característica I-V**

A curva característica I-V dos módulos, nas condições *standard*, antes da sua implementação no exterior é utilizada como base para futuras comparações. Esta curva característica é essencial para detectar a degradação, pois é utilizada para verificar se existem células defeituosas, determinar parâmetros do módulo como sendo a corrente de curto-circuito, a tensão em circuito aberto, o ponto de máxima potência e o factor de forma.

### **6.3. Investigação de pontos quentes**

A investigação de pontos quentes é efectuada através da curva característica I-V e da visualização de termografias. A origem destes pontos é quando uma corrente eléctrica relativamente elevada flui através da célula. Quando uma célula solar fica totalmente obscurecida, esta célula passa a estar inversamente polarizada, passando a absorver energia eléctrica, convertendo-a em calor. No caso da corrente que a atravessa ser

suficientemente elevada, no máximo igual á corrente de curto-circuito, resulta um ponto quente, danificando a célula em questão e podendo fundir a solda danificando o encapsulante e a malha metálica.

#### 6.4. Medição da resistência série

Por medidas de resistência série é possível verificar a presença de degradação nos contactos, pois a área condutiva diminui, aumentando a resistência. Idealmente, como já vimos anteriormente esta resistência deveria ser nula. Questões como esta causam o aquecimento demasiado de pontos específicos do módulo degradando o encapsulante e a protecção posterior.

#### 6.5. Resumo da lista de testes a efectuar

Na tabela 6.1 faz-se um resumo dos testes anteriores e outros que se devem efectuar, indicando também a frequência dos mesmos.

**Tabela 6-1 - Lista de testes a efectuar**

Teste	Objectivo	Frequência
Inspecção visual	Identificar defeitos visualmente	Mensalmente
Característica I-V	Determinar características eléctricas	Semanalmente
Testes eléctricos	Determinar características eléctricas	Mensalmente
Pontos quentes	Determinar pontos quentes	Mensalmente
Resistência série	Detectar degradação	Mensalmente
Dependência da temperatura	Determinar coeficientes de temperatura	Mensalmente
Monitorizar $I_{sc}$ e $V_{oc}$	Detectar degradação	Semanalmente

### 7. Ensaio preliminares

Na persecução dos objectivos propostos, ainda no IPB, foram realizados estudos introdutórios e testes de montagens electrónicas com vista a averiguar possíveis soluções para o traçador de curvas I-V, adequar e conhecer componentes e realizar estudos de dimensionamento dos mesmos.

Neste ponto é descrito mais em detalhe os testes efectuados em laboratório bem como as técnicas para a sua implementação.

### 7.1. Descrição do esquema electrónico

Após vários estudos e testes, a montagem que se verificou ser a mais adequada baseou-se nos autores da referência [22], ou seja, para a aquisição dos pares corrente/tensão era necessário efectuar o controlo em tensão de um *MOSFET*. Mais especificamente, era gerada uma sinusóide com valor de pico 10V e um *offset* de 2V, visto que para o *MOSFET* utilizado entrar em condução (zona activa) necessitava-se de 2V. Nesta zona a corrente do dreno para a fonte é controlada pela tensão  $V_{GS}$ , por conseguinte, optou-se por uma tensão de pico de 10V para que a tensão  $V_{GS}$  não fosse muito elevada para o *MOSFET* não entrar em “saturação”. Para melhor compreensão na figura 7.1 é ilustrada a característica corrente-tensão de funcionamento do *MOSFET*.

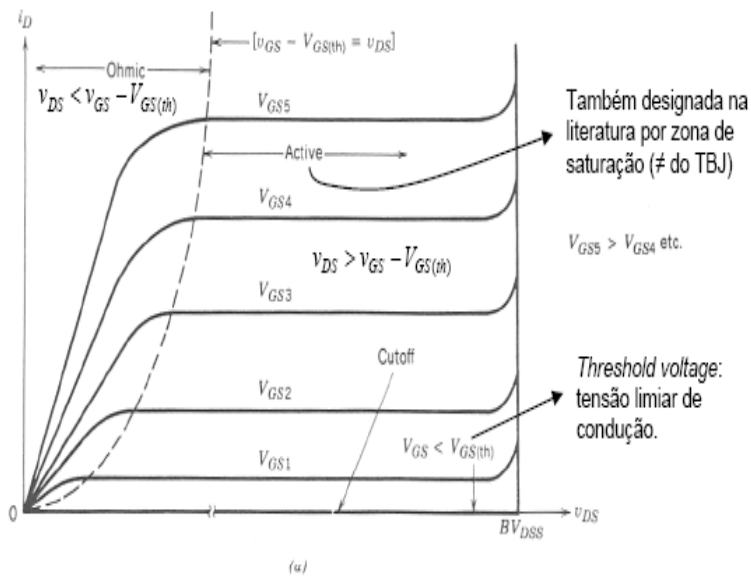
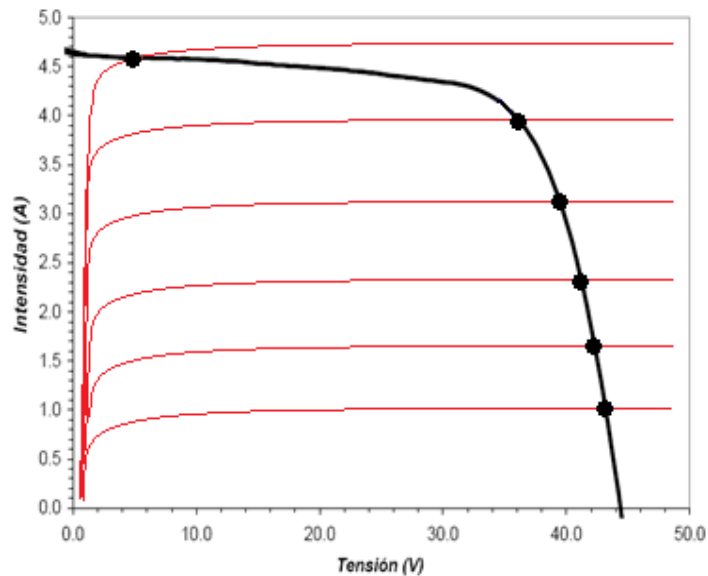


Figura 7.1 – Característica corrente-tensão do *MOSFET* [Sebenta Electrónica de potência]

Assim, quando é conectado um módulo ao circuito, os pares corrente/tensão vão sendo adquiridos desde o valor de tensão em circuito aberto até à corrente de curto-circuito, como é ilustrado na figura 7.2, as linha encarnadas mostram as curvas de funcionamento do *MOSFET* para diferentes valores de  $V_{GS}$ .



**Figura 7.2 - Curva de funcionamento do MOSFET**

Para o correcto funcionamento do circuito foram ainda utilizados os seguintes componentes (nas figuras 7.3 e 7.4 é ilustrado o circuito implementado):

- ✓ Amplificador de instrumentação com isolamento

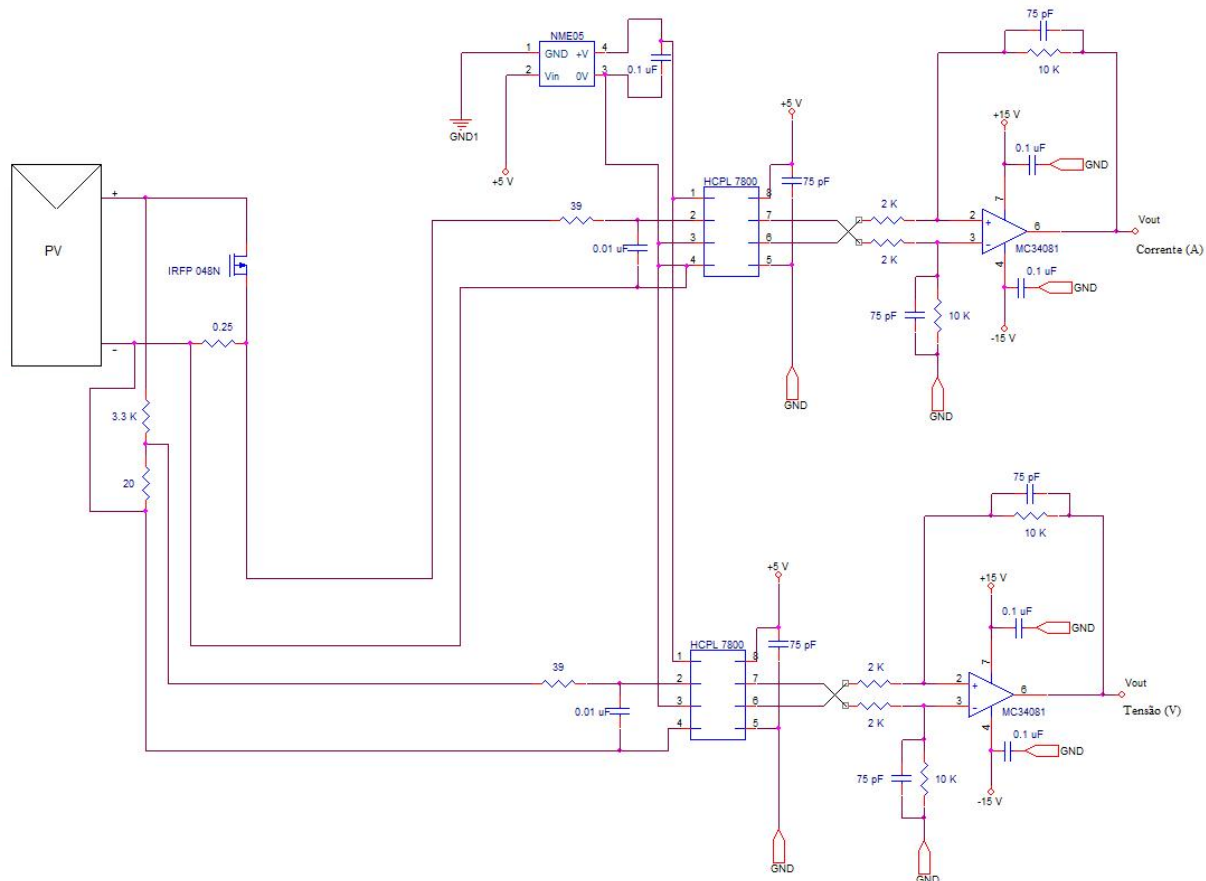
Uma vez que a previsão apontava para a medida de fileiras de módulos, cuja tensão já é considerável, foi utilizado um amplificador com isolamento com o intuito de isolar a parte de potência da parte electrónica de sinal garantindo desta forma, a utilização de equipamentos informáticos e outros sem qualquer risco.

- ✓ Conversor DC-DC

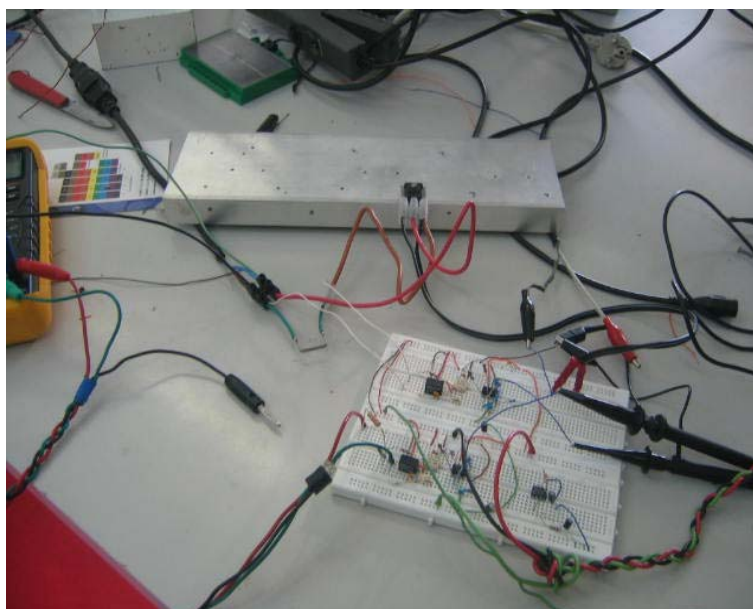
A utilização deste conversor, deve-se ao facto de garantir o isolamento da montagem, ou seja, como o amplificador de instrumentação com isolamento necessita de ser alimentado com 5V, tanto na parte de potência como na parte da electrónica de sinal, o uso deste conversor como possui “massas” isoladas assegura que a “massa” de potência (na montagem da figura 7.1 GND1) é diferente da electrónica (GND).

- ✓ Amplificador diferencial

O amplificador diferencial utilizado é o elemento principal da amplificação diferencial do sinal para que a carta de aquisição de dados tenha resolução suficiente para adquirir os valores da corrente e tensão.



**Figura 7.3 - Esquema electrónico adoptado**



**Figura 7.4 - Fotografia da montagem electrónica**

## 8. Protótipo desenvolvido

### 8.1. Descrição

No seguimento do trabalho efectuado no IPB, que serviram para consolidar conhecimentos e desenvolver técnicas, no Ciemat foi desenvolvido o protótipo apresentado nas figuras 8.1 e 8.2. Este dispositivo seguiu outra linha de especificações, das inicialmente propostas no IPB, devido a dois factores:

- Orientação de Faustino Chenlo;
- Condições do Laboratório da Unidade de Energia Solar Fotovoltaica do Ciemat.

Assim, nunca perdendo de vista os objectivos do trabalho (ser um dispositivo de baixo custo e de fácil utilização), o protótipo baseou-se na carga de um condensador para polarizar o módulo contendo duas opções de medida: para módulos convencionais e de lâmina delgada.

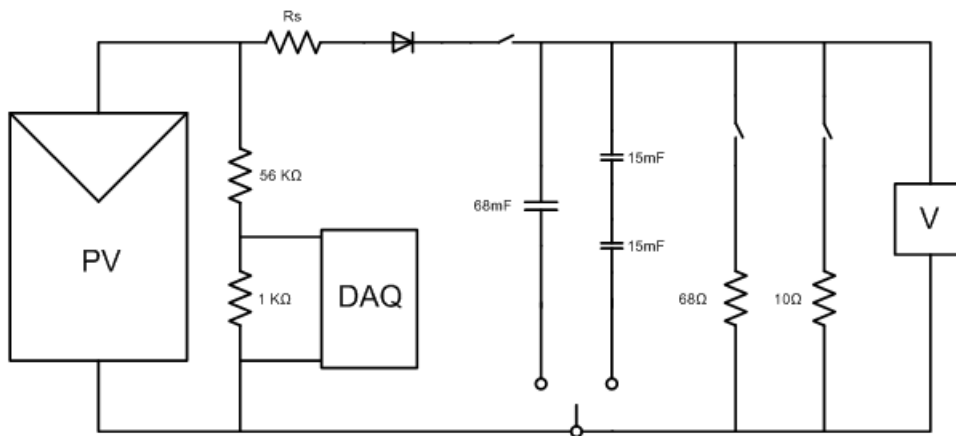


Figura 8.1 - Esquema do traçador implementado

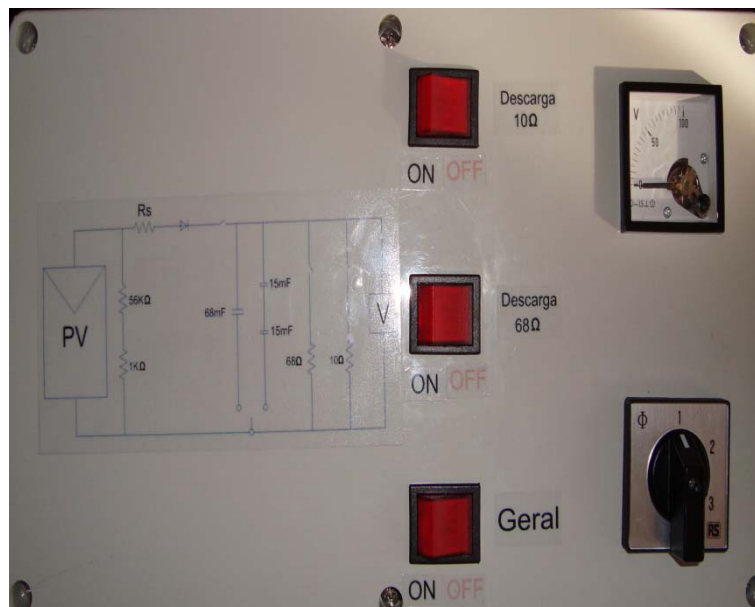


Figura 8.2 - Fotografia do dispositivo

Este dispositivo conta, como já foi referido, com um sistema de condensadores que, previamente descarregados, carregam-se ao receberem corrente do módulo, gerando os pares I-V decorrido aproximadamente 1 segundo. O número de pontos adquiridos vai depender da capacidade do condensador, da tensão e da corrente do módulo.

Para a aquisição de medidas conecta-se o módulo PV ao dispositivo e terá de se realizar o seguinte procedimento:

1. Verificar se os condensadores estão descarregados – estando todos os interruptores desligados, liga-se o interruptor “Geral” e verifica-se no voltímetro se existe tensão, desligando-se este interruptor no final deste teste;
2. No interruptor selector, selecciona-se a posição “2” ou “3” dependendo do tipo de módulos a medir (posição “2” para módulos convencionais e posição “3” para módulos de lamina delgada);
3. Abre-se o software da carta de aquisição onde é preparado a medida a efectuar;
4. Ao ligar o interruptor “Geral” simultaneamente são adquiridos os pontos de corrente e tensão;
5. Desliga-se o interruptor “Geral” e ligam-se os interruptores das resistências para descarregar os condensadores;
6. É então visualizada a curva I-V.

### 8.1.1. Dimensionamento das resistências

Pelo facto de terem de ser medidas, simultaneamente, a corrente e a tensão do módulo PV, ao mesmo tempo que se vai carregando o condensador, é desejável que os valores da tensão do módulo e da tensão da resistência “shunt” ( $R_s$ ) sejam do mesmo intervalo.

Como o intervalo de saída da tensão da resistência de referência é na ordem das dezenas V, terá de ser reduzido o valor da tensão do módulo (de 0 a 50 V para módulos PV convencionais e de 0 a 125V para módulos PV de lâmina delgada). Para reduzir esta tensão utilizou-se um divisor de tensão reduzindo-a aproximadamente em  $\frac{1}{60}$ , usando para tal duas resistências ligadas em série, por exemplo uma de  $1\text{k}\Omega$  e outra de  $56\text{ k}\Omega$  segundo a seguinte fórmula:

$$\frac{V_{daq}}{V} = \frac{1}{56 + 1} = \frac{1}{57} \quad (8.1)$$

Estas resistências não devem ser de valor muito elevado porque introduzem ruído incrementando erro na aquisição de medidas, mas também não devem ter valor muito baixo pois consomem parte da corrente debitada pelo módulo.

### 8.1.2. Aquisição de dados

Para realizar o traçado da curva característica I-V de módulos PV teremos de medir:

- ✓ Tensão;
- ✓ Corrente;
- ✓ Radiação solar;
- ✓ Temperatura do módulo PV.

É de salientar que assim teremos de ter quatro canais analógicos de entrada disponíveis. No caso particular do dispositivo criado para além das quatro entradas foram ainda configuradas outras duas para a conexão de outros equipamentos.

#### **Vantagens na utilização de uma carta de aquisição de dados preconizada para este trabalho:**

- ✓ Baixo custo;
- ✓ Facilidade de instalação;
- ✓ Disponibilidade de ferramentas;
- ✓ Interface gráfica;
- ✓ Sistemas abertos;
- ✓ Portabilidade;
- ✓ Facilidade de criar aplicações para desempenhar o controlo de um sistema.

A escolha da carta de aquisição de dados recaiu pelo modelo *PicoLog 1000 Series* devido às suas características mencionadas na tabela 8.1. Teve-se também em conta o seu baixo valor monetário e as estreitas relações por parte do Ciemat com o fornecedor da marca.

**Tabela 8-1 - Características da carta de aquisição de dados**

Marca	Modelo	Nº Canais	Resolução	Amostras	Tensão	Conexão
PicoLog	1216	16	12 bit	1MS/s	0 a 2,5V	USB 2.0

### 8.1.3. Condensadores

Para iniciar o cálculo da capacidade do condensador devemos partir de um valor aproximado do tempo necessário para a medida, que, tendo em conta o tempo de resposta dos módulos PV e a velocidade de medida do sistema de aquisição de dados deveria ser de 20ms até 1s aproximadamente; tendo em conta este período de tempo pode-se calcular o valor do condensador C segundo a fórmula 8.2:

$$t = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} * C * \frac{1}{FF} \quad (8.2)$$

$V_{oc}$  – Tensão em circuito aberto (V);

$I_{sc}$  – Corrente de curto-circuito (A);

C – Capacidade do condensador (F);

FF – Factor de forma (que pode variar entre 0,6 e 0,75 dependendo do tipo de módulo PV).

Assim, através da utilização da fórmula 8.2 obteremos os seguintes valores teóricos, para um tempo de varrimento aproximadamente de 1 segundo, dos condensadores, tanto para aquisição de medidas em módulos convencionais ou de lâmina delgada:

✓ Módulos convencionais

$V_{oc} = 50V$ ;

$I_{sc} = 10A$ ;

FF = 0,6;

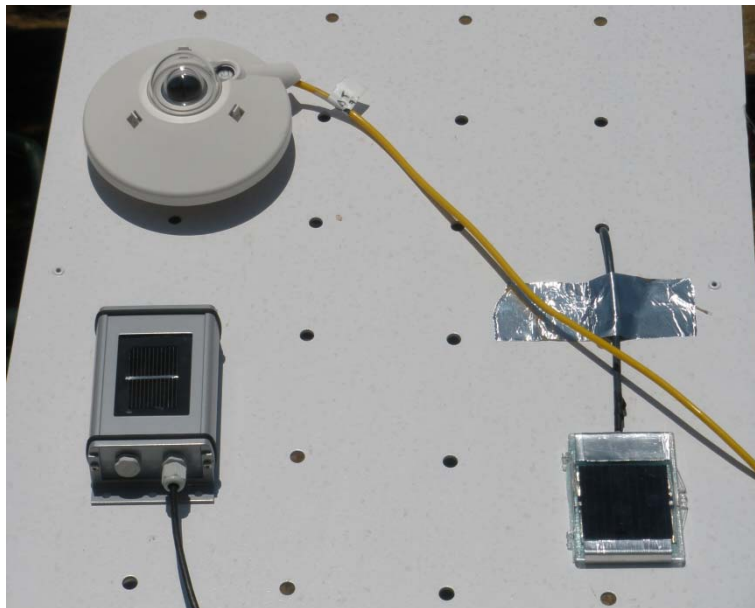
T= 1s.

$$C = \frac{1}{\frac{50}{10} * \frac{1}{0,6}} = 0,12F \quad (8.3)$$





**Figura 8.4 - Fotografia de calibração (1)**



**Figura 8.5 - Fotografia de calibração (2)**

Esta calibração é feita através da medida da radiação solar, em pelo menos dois dias de céu limpo, comparando-as com a célula de referência. Após análise comparativa das medidas, estas devem seguir de uma forma linear os valores de referência.

## 8.2. Resultados experimentais

Como exemplo de aplicação e validação do dispositivo implementado, durante a estadia no Ciemat, foi proposto efectuar testes a um módulo *Zitech*, número de série SR0854642, composto por 72 células em série de silício monocristalino. As especificações nominais foram retiradas do catálogo do fabricante, sendo apresentadas na tabela 8.2.

**Tabela 8-2 - Especificações eléctricas do módulo Zitech**

<b>Zitech</b>	<b>ZT170S</b>	<b>SR0854642</b>
	STC	
Irradiância	1000	( $W/m^2$ )
Temperatura	25	( $^{\circ}C$ )
$I_{sc}$	5,33	(A)
$V_{oc}$	44,52	(V)
$P_m$	179,57	(W)
$I_m$	5,03	(V)
$V_m$	35,70	(A)
FF	75,60	(%)

A figura 8.6 mostra a curva característica adquirida. De referir que nestas medidas não esteve em linha de consideração a temperatura do módulo bem como a radiação solar no momento dos testes, ou seja, os testes abaixo descritos servem apenas de indicação da importância que este tipo de dispositivo pode ter na detecção de falhas dos módulos.

- ✓ Curva I-V adquirida pelo dispositivo

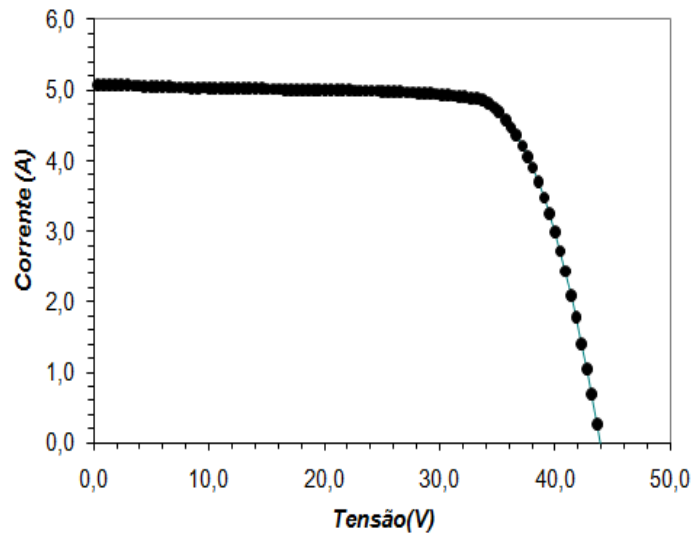


Figura 8.6 – Curva I-V do módulo *Zitech*

- ✓ Simulação de uma célula danificada do módulo tapando-a

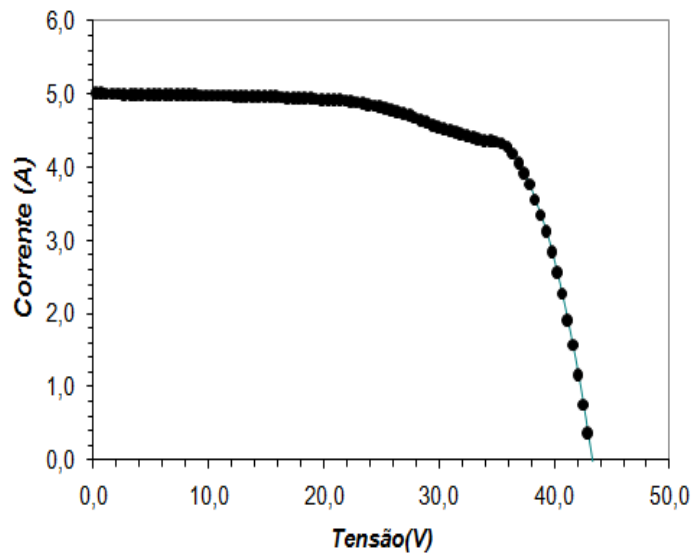
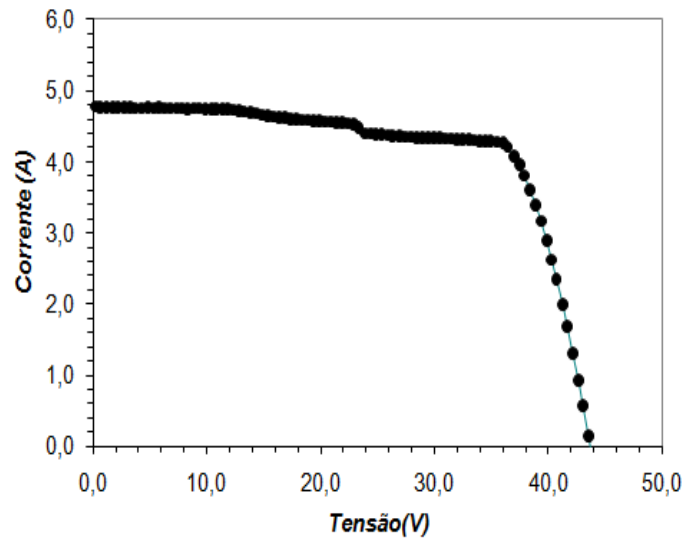


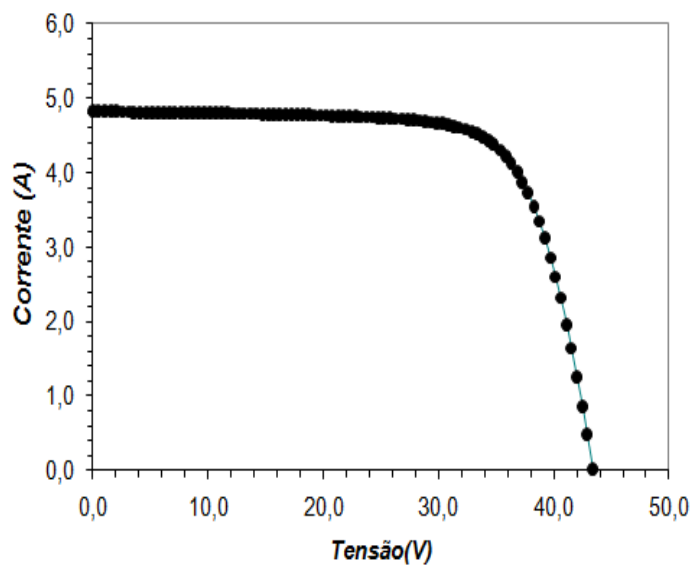
Figura 8.7 – Curva I-V do módulo *Zitech* com uma célula danificada

- ✓ Simulação de duas células danificadas do módulo tapando-as



**Figura 8.8 - Curva I-V do módulo *Zitech* com duas células danificadas**

- ✓ Curva I-V do módulo com sujidade na superfície



**Figura 8.9 – Curva I-V do módulo *Zitech* com sujidade na superfície**

## 9. Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

A presente dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema que permita gerar e adquirir as características I-V de módulos fotovoltaicos, através de um módulo electrónico e de uma carta de aquisição de dados. Na execução do protótipo proposto duas foram as considerações que o regeram: ser de baixo custo económico e de fácil utilização para o utilizador final.

Estando a temática da microgeração na ordem do dia, a escolha/motivação pela realização deste trabalho deve-se à instalação massiva de módulos PV e conseqüentemente ao desenvolvimento de ferramentas de detecção de falhas /degradação com características semelhantes aos modelos comerciais existentes no mercado mas muito mais baratos e de fácil manuseamento para que a utilização destes se pudesse também massificar.

Num trabalho com estas características é indispensável o estudo/conhecimento das normas que regulam a realização de testes em módulos PV, dos factores que influenciam a curva característica I-V, as formas de degradação mais frequentes e os procedimentos habituais para detectar a degradação.

De uma maneira mais concreta o dispositivo desenvolvido consiste na carga de um condensador para traçar a curva I-V e tem duas opções de medida: módulos “convencionais” (10 A, 50 V) e módulos de lâmina delgada (2 A, 110 V). Para além da característica I-V, o dispositivo apresenta ainda outros parâmetros que permitem detectar degradação tais como, a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto, a temperatura e a radiação solar.

Os resultados conseguidos foram positivos, e os requisitos de qualidade previamente estabelecidos foram atingidos. Pode também citar-se o sucesso no uso e escolha de materiais e tecnologias postas à disposição aquando da execução da parte prática do trabalho.

Foram meses de trabalho intensivo, dos quais se dividiram entre busca e desenvolvimento de conhecimentos e a elaboração do protótipo. Tornando físico este projecto foram efectuados testes, onde foi possível extrair dados importante na detecção de falhas, como por exemplo: a curva I-V, tensão em circuito aberto, corrente de curto-circuito, radiação solar e temperatura.

Ao longo do desenvolvimento da dissertação, novas frentes foram abertas, que, não tendo sido possível incluir na dissertação, mas contribuindo de forma importante para os resultados obtidos, poderiam constituir matéria de trabalho futuro. Destacam-se como exemplos:

- Efectuar mais testes para verificar que influencia têm na curva I-V;
- Automatizar mais o dispositivo, ou seja, substituir os interruptores, desenvolvendo um programa em *software* para que o dispositivo traçasse a curva automaticamente;
- Implementar um dispositivo para que detectasse automaticamente, conforme o tipo de curva obtida, a falha existente no módulo testado;

- Efectuar os mesmos procedimentos anteriores para outras tecnologias de fabricação de módulos fotovoltaicos.

## Referências Bibliográficas

- [1] – [www.dgge.pt](http://www.dgge.pt) – Página da Direcção Geral de Energia e Geologia, em Junho 2009;
- [2] – [www.min-economia.pt](http://www.min-economia.pt) – Página do Ministério da Economia e Inovação, em Junho 2009;
- [3] – [www.iea.org](http://www.iea.org) – Página da Agencia Internacional de Energia (“*International Energy Agency*”), em Junho 2009;
- [4] – [www.cen.eu](http://www.cen.eu) – Página do Comité Europeu da Normalização (“*European Committee for Standardization*”), em Julho 2009;
- [5] – B. Marion, J. del Cueto, and B. Sekulic, “*Modeling Current-Voltage Curves Using Bilinear Interpolation*”, World Renewable Energy Congress, Denver 2004;
- [6] – Yuki Tsuno, Yoshihiro Hishikawa and Kosuke Kurokawa, “*Temperature and Irradiance Dependence of the I-V Curves of Various Kinds of Solar Cells*”, 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference, Shanghai 2005;
- [7] – Blaesser G., “*On-Site Power Measurements on Large PV Arrays*” 70th E.C.PVSEC, 1991, pp. 1240-1243;
- [8] – Anderson, A. J., “*Photovoltaic Translation Equations: A New Approach*,” Final Report for Task 1 .0, 1994;
- [9] – B. Kroposki, D. Myers, K. Emery, and L. Mrig,” *Photovoltaic Module Energy Rating Methodology Development*”, 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 13-17, Washington 1996;
- [10] – Kroposki, B., “*A Comparison of Photovoltaic Module Performance Evaluation Methodologies for Energy Ratings*”, 1994, pp. 858-862;
- [11] – Kroposki, B., “*Development of a Photovoltaic Module Energy Ratings Methodology*”, 73th NREL PV Program Review, AIP Conference Proceedings, 1995;
- [12] – Townsend T., “*A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems*”, MS Thesis, University of Wisconsin, 1989;
- [13] – Nann, S., Riordan, C. “*Solar Spectral Irradiance under Clear and Cloudy Skies: Measurements and a Semiempirical Model*”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 30, 1991, pp.447-462;
- [14] – Perez, R., R. Stewart, R. Seals, and T. Guertin, “*The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model*” Contractor Report SAND88-7030, Sandia National Laboratories, 1988;
- [15] – Emery, K. A. et al. “*Methods for Measuring Solar Cell Efficiency Independent of Reference Cell of Light Source*” 78th /IEEE PVSC, Oct. 1985 pp. 623-628;
- [16] – Raicu, A.; Heidler, K.; Kleiss, G.; Bücher, K., “*Realistic reporting conditions -RRC- for site-dependent energy rating of PV devices*”, Photovoltaic Solar Energy Conference , 1992;

- [17] – [www.iec.ch](http://www.iec.ch) – Página da Comissão Electrotécnica Internacional (“*International Electrotechnical Commission*”), em Julho 2009;
- [18] – Wolf e Rauschenbach, “*New method to extract the parameters of solar cells from their illuminated I-V curve*”, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP, 2007;
- [19] – Durisch, A. J. “*Characterization of photovoltaic generators*”, Applied Energy pp. 273-284, 2000;
- [20] – Prieb, C. W. M., “*Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos*”, Dissertação de mestrado, PROMEC/UFRGS, 2002;
- [21] – E.E. van Dyk, A.R. Gxasheka e E.L. Meyer, “*Monitoring current–voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules*”, Technical note, Department of Physics, University of Port Elizabeth, South Africa, 2004;
- [22] – Yingying Kuai e S. Yuvarajan, “*An electronic load for testing photovoltaic panels*”, Short communication, Journal of Power Sources, 2005;
- [23] – D.L. King, B.R. Hansen, J.A. Kratochvil e M.A. Quintana, “*Dark current-voltage Measurements on photovoltaic modules as a diagnostic or manufacturing tool*”, Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997;
- [24] – Rui M. G. Castro, “*Introdução á Energia Solar Fotovoltaica, Energias Renováveis e produção Descentralizada*”, 2008;
- [25] – Programa Comunitário Altener, “*Energia Fotovoltaica – Manual e Guia Técnico sobre tecnologias, projecto e instalação*”, 2004;
- [26] – Manuel F. Santos, “*Balanço energético de um módulo fotovoltaico*”, Tese de Mestrado, UTL, Maio 1995;
- [27] – Sílvio Júnior, “*Análise de Materiais e Técnicas de Encapsulamento de Módulos Fotovoltaicos*”, Tese de Mestrado, Agosto 2008;
- [28] – A. Realini, E. Burà, N. Cereghetti, D. Chianese, S. Rezzonico, “*Mean Time Before Failure of Photovoltaic modules*”, Annual Report 2001;

Américo V. Leite, Sebenta da disciplina “Electrónica de potência”

## Anexo A

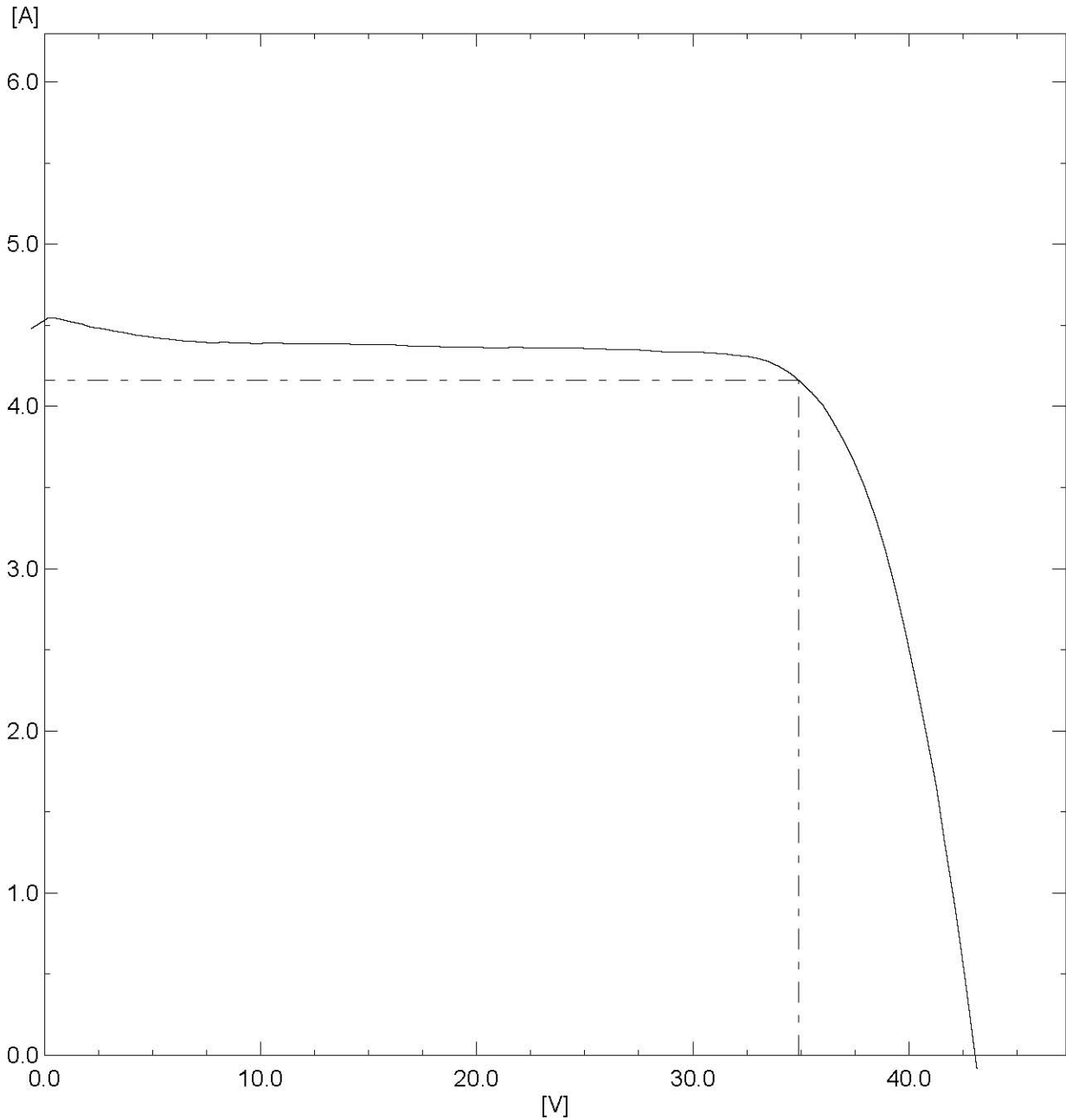
## Anexo A1

No anexo A1 são apresentadas fotos e as curvas características I-V de módulos PV danificados, efectuados no simulador do Ciemat.



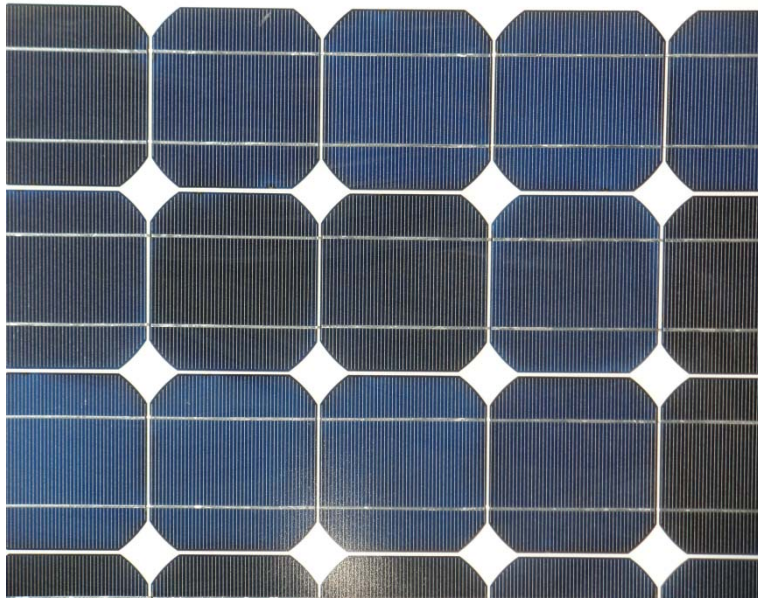
# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 12:33



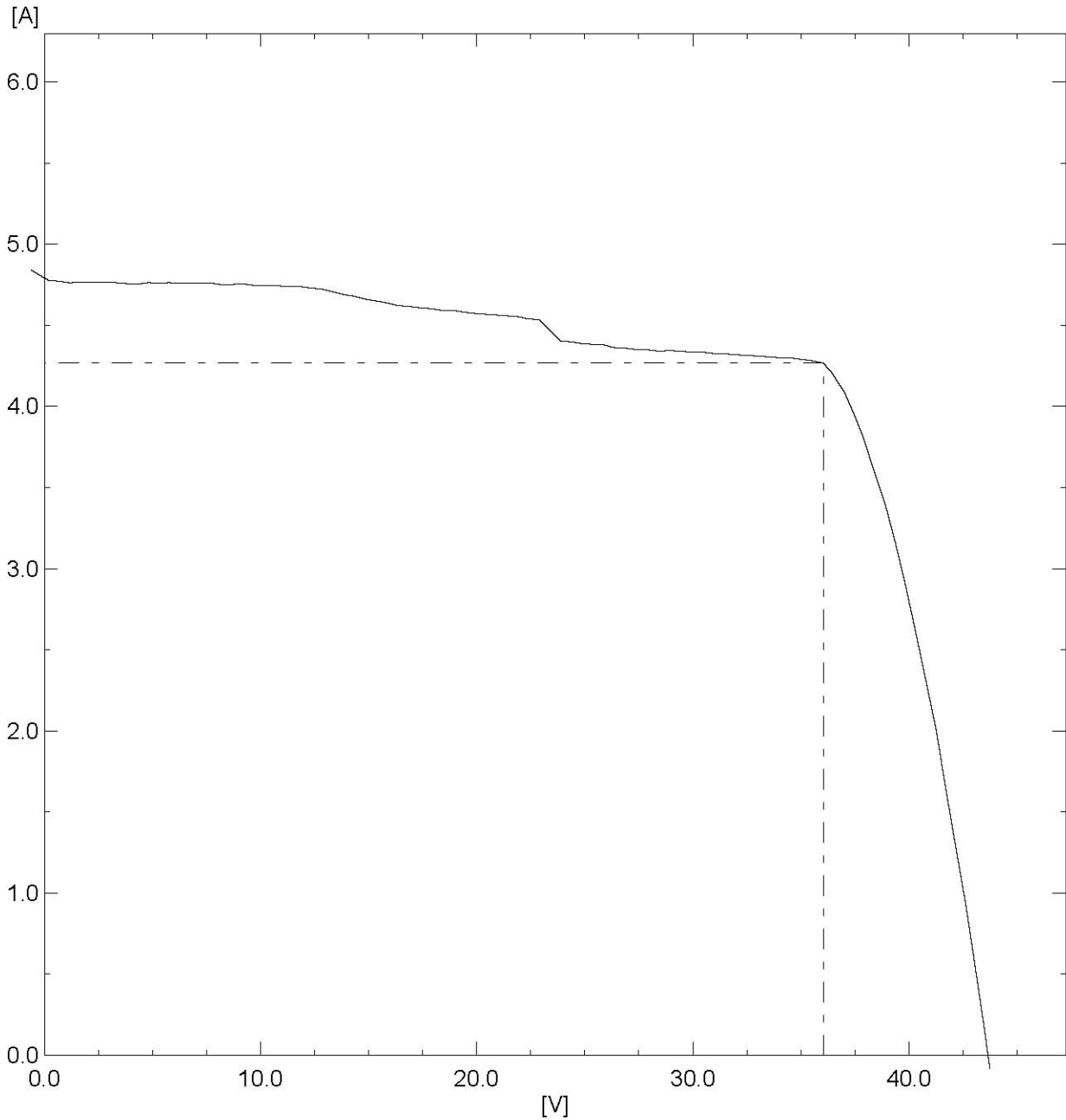
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0848361
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.002 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	25.9 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	25.9 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.49 A	Voc	43.07 V
Imp	4.16 A	Vmp	34.91 V
Pmax	145.2 W	Fill Factor	75.1 %
Eficiencia célula	12.9 %	Eficiencia módulo	10.1 %



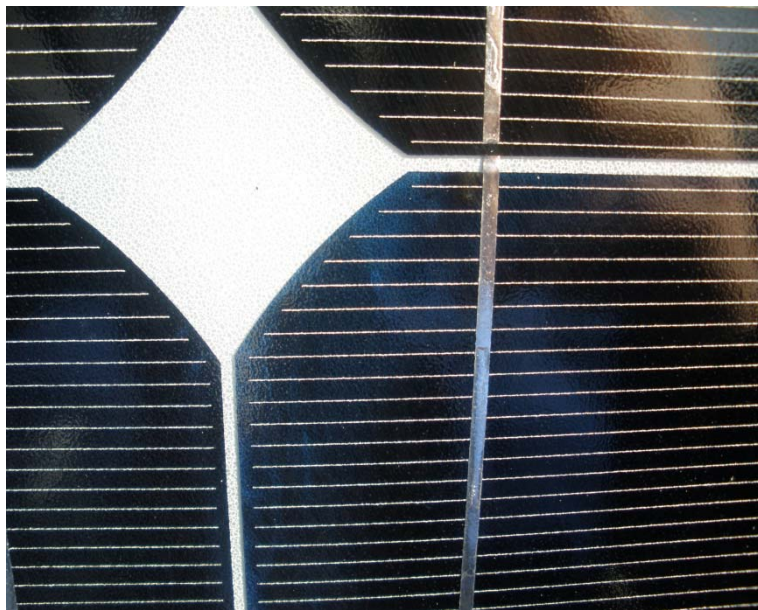
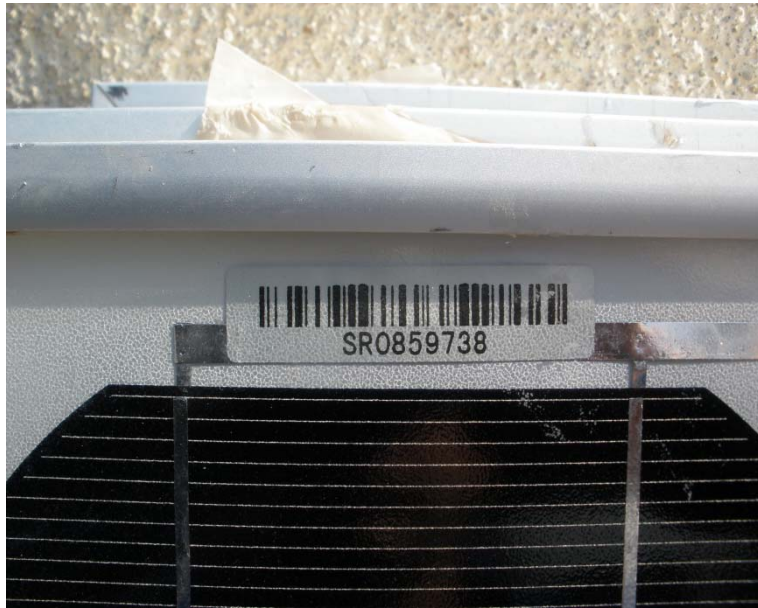
# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 13:00



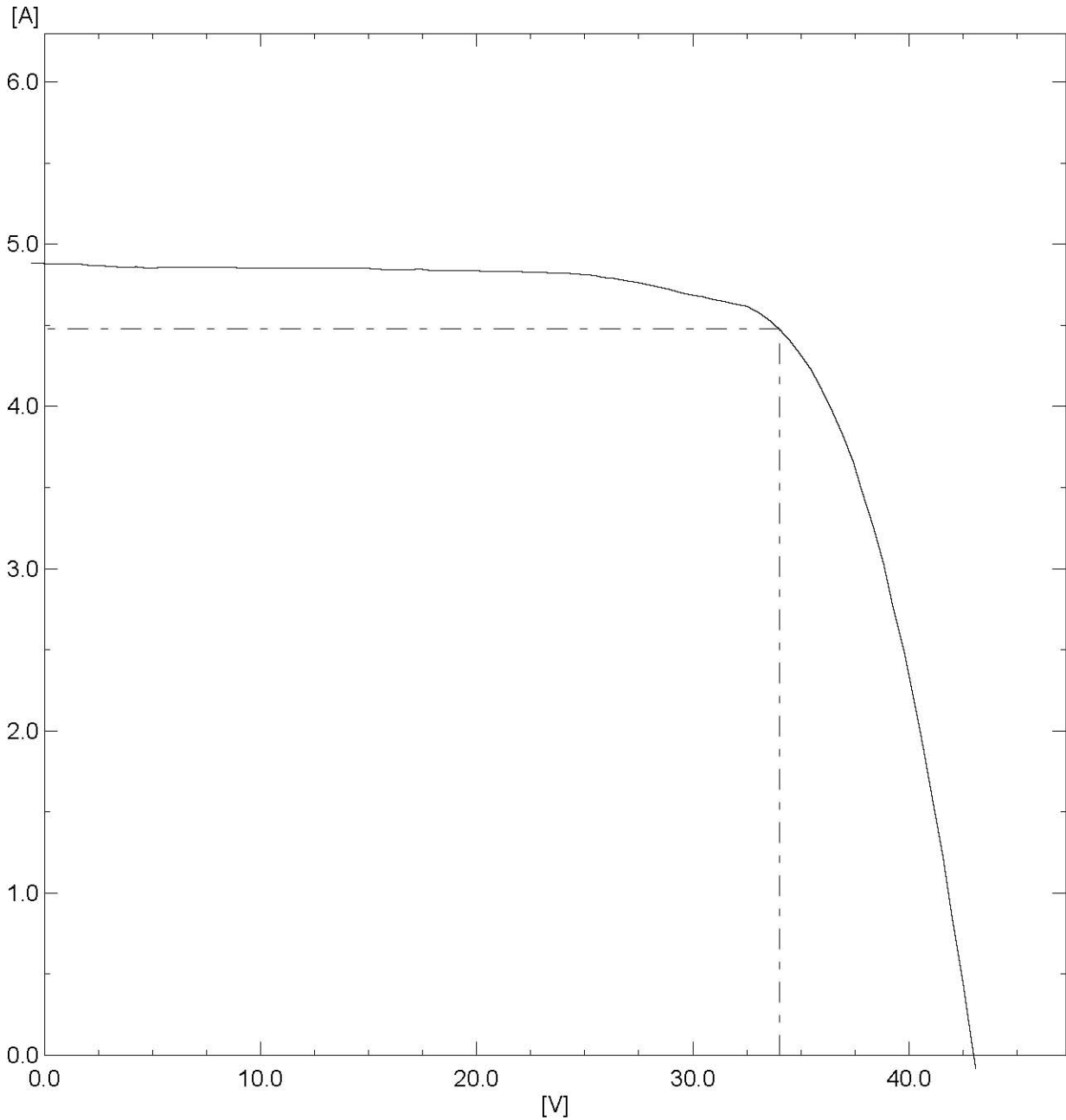
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0859604
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.002 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	25.6 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	25.6 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.81 A	Voc	43.67 V
Imp	4.27 A	Vmp	36.04 V
Pmax	153.8 W	Fill Factor	73.3 %
Eficiencia célula	13.6 %	Eficiencia módulo	10.7 %



# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 13:03



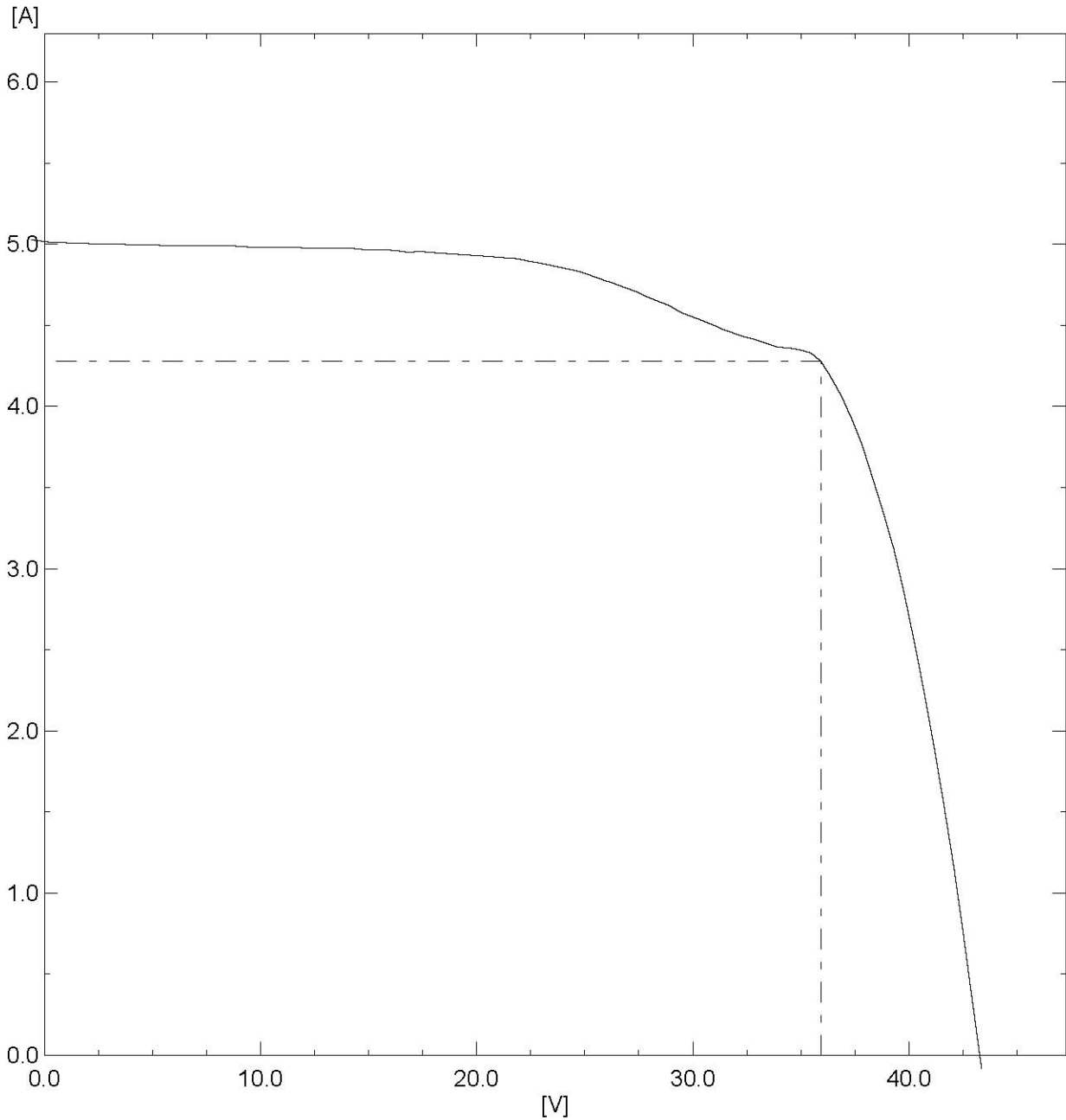
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0859738
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.001 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	25.4 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	25.4 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.87 A	Voc	43.00 V
Imp	4.48 A	Vmp	34.00 V
Pmax	152.3 W	Fill Factor	72.7 %
Eficiencia célula	13.5 %	Eficiencia módulo	10.6 %



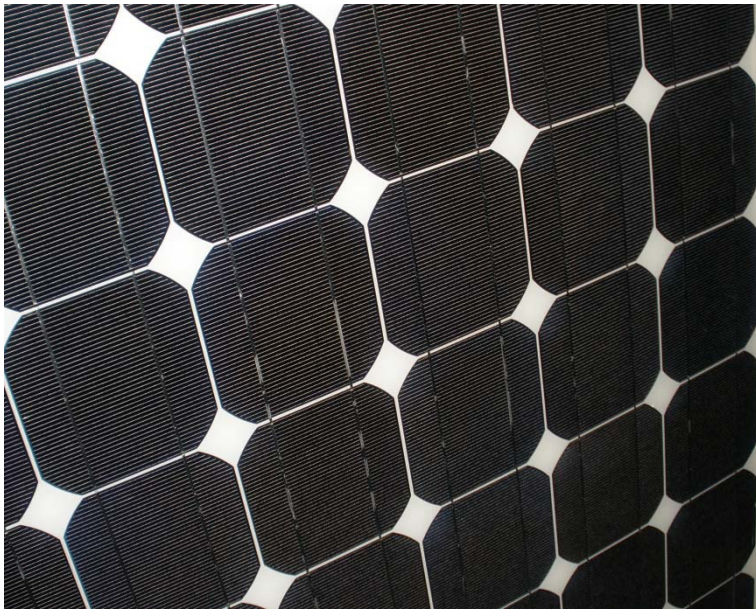
# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 13:04



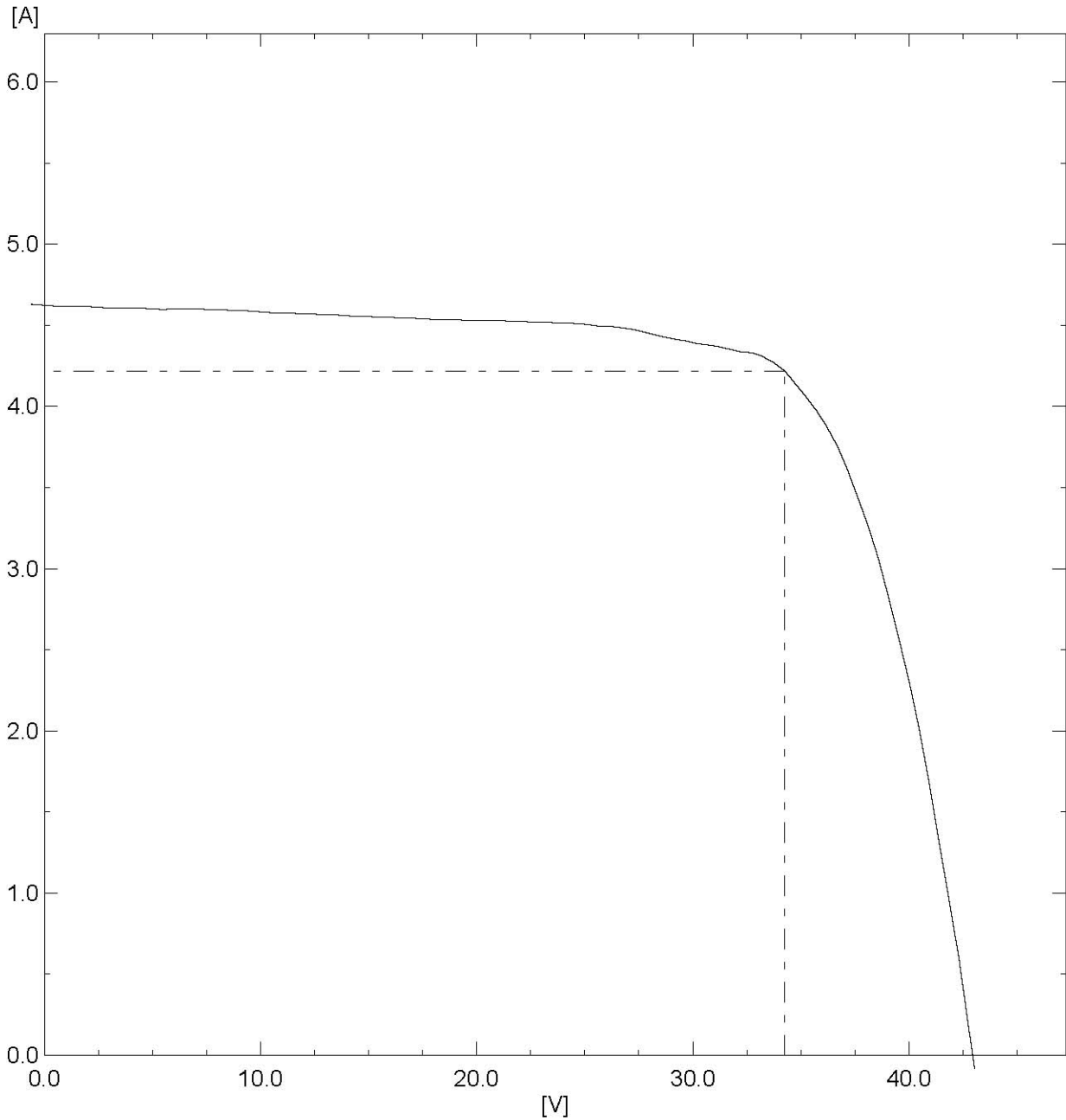
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0860949
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.001 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	25.2 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	25.2 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	5.01 A	Voc	43.28 V
Imp	4.28 A	Vmp	35.92 V
Pmax	153.7 W	Fill Factor	70.8 %
Eficiencia célula	13.6 %	Eficiencia módulo	10.7 %



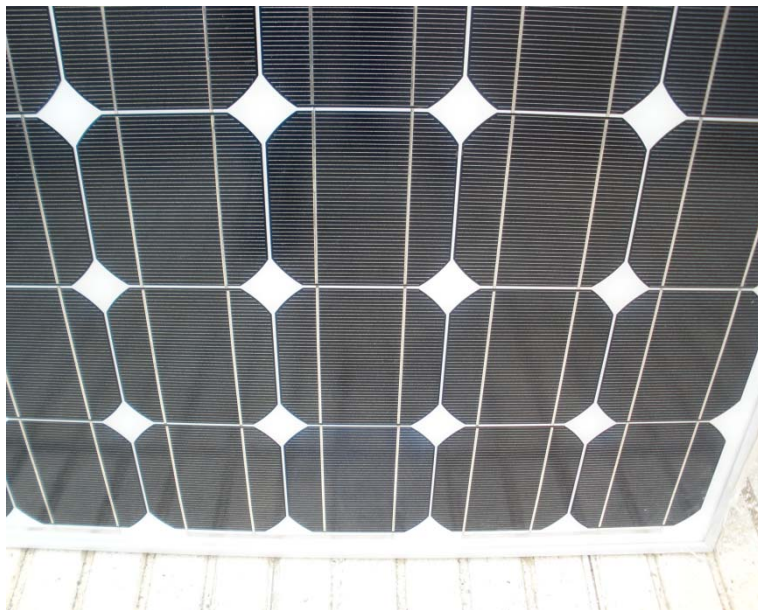
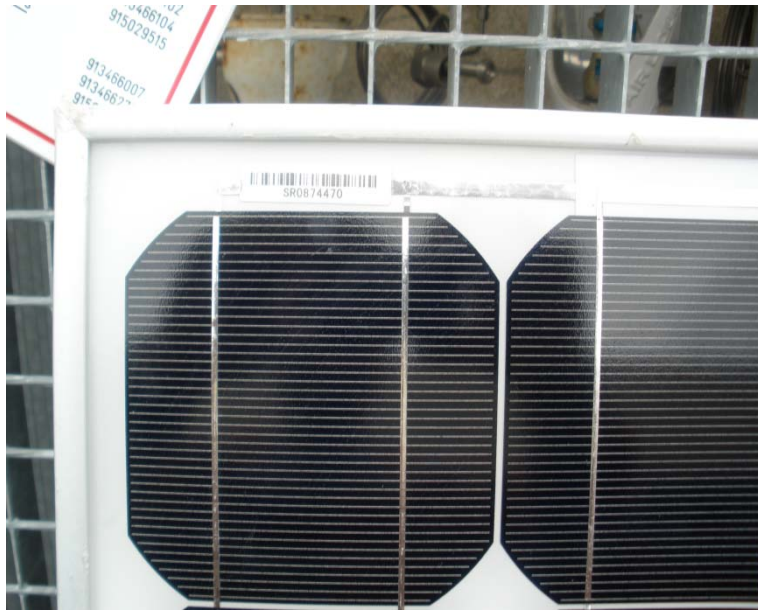
# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 10:13



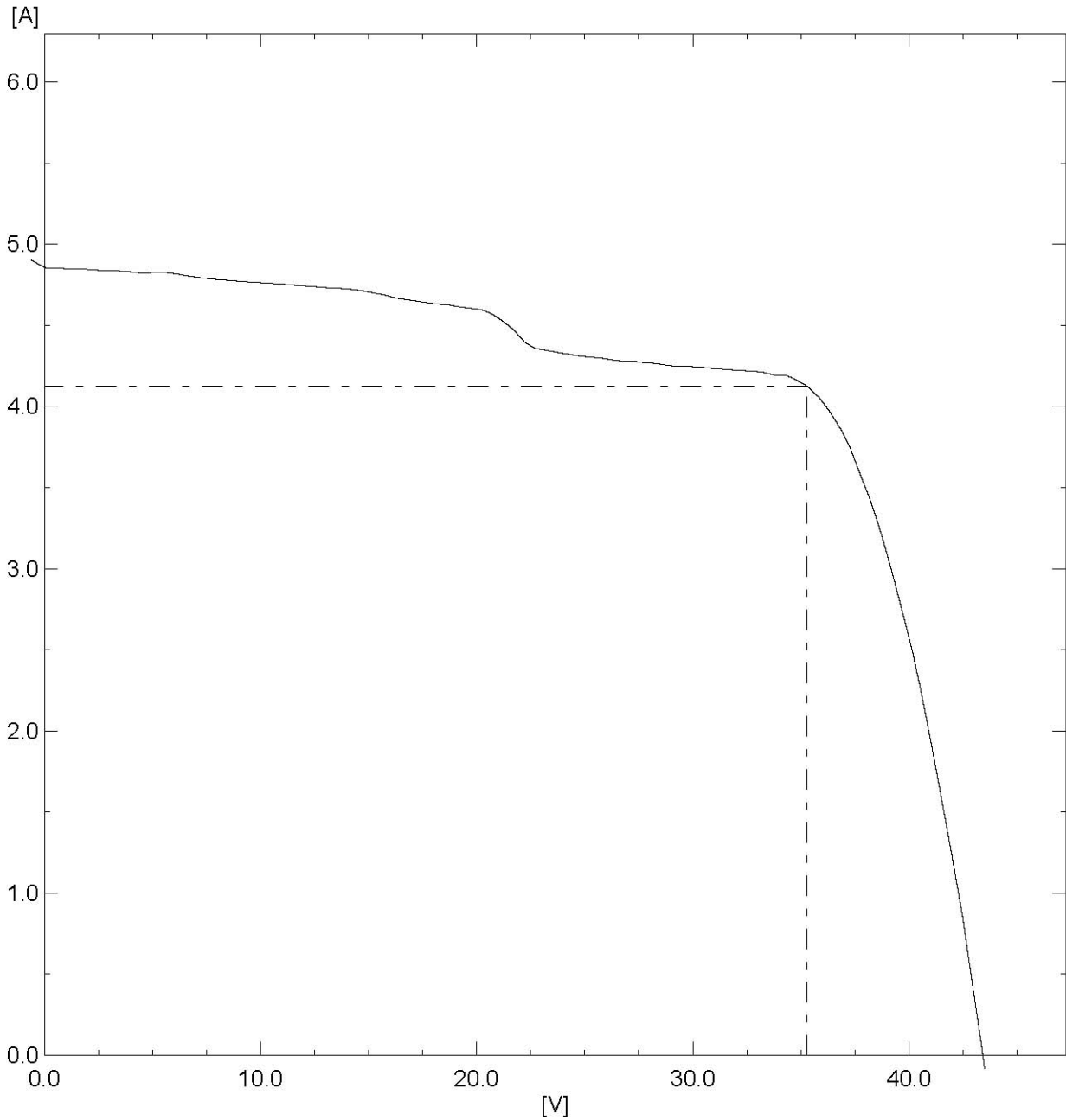
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0873994
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.001 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	24.0 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	24.0 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.63 A	Voc	42.97 V
Imp	4.22 A	Vmp	34.26 V
Pmax	144.5 W	Fill Factor	72.7 %
Eficiencia célula	12.8 %	Eficiencia módulo	10.0 %



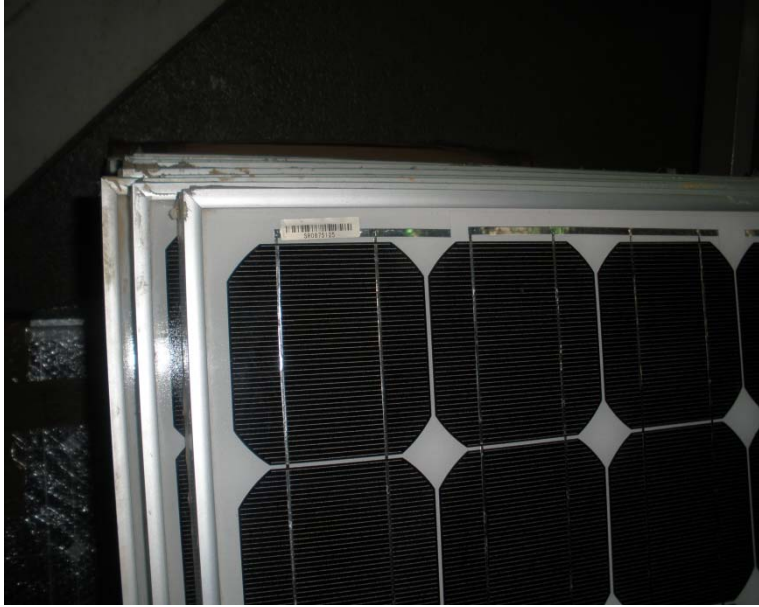
# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 10:34



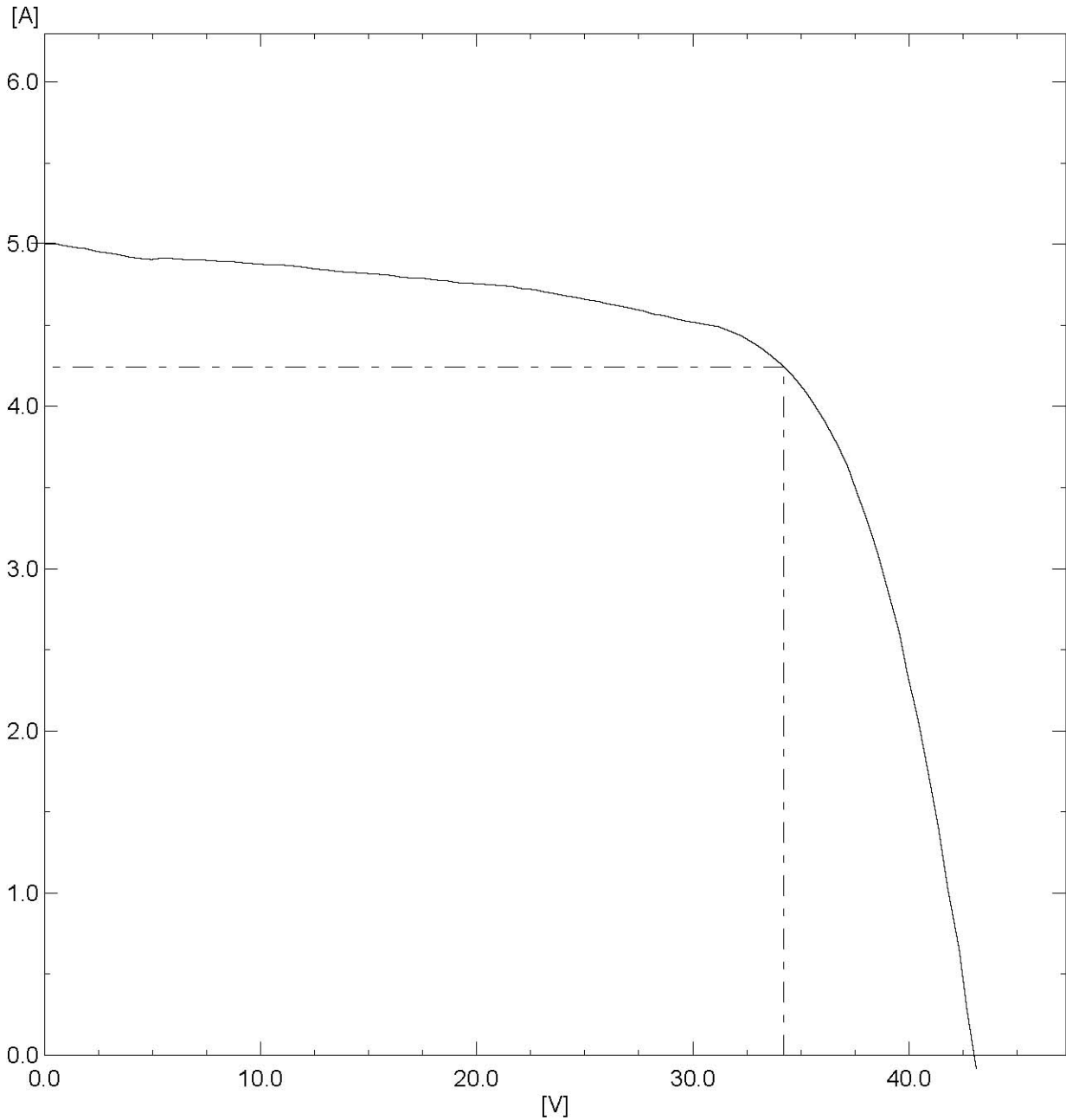
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0874470
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.001 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	24.7 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	24.7 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.88 A	Voc	43.41 V
Imp	4.12 A	Vmp	35.30 V
Pmax	145.6 W	Fill Factor	68.8 %
Eficiencia célula	12.9 %	Eficiencia módulo	10.1 %



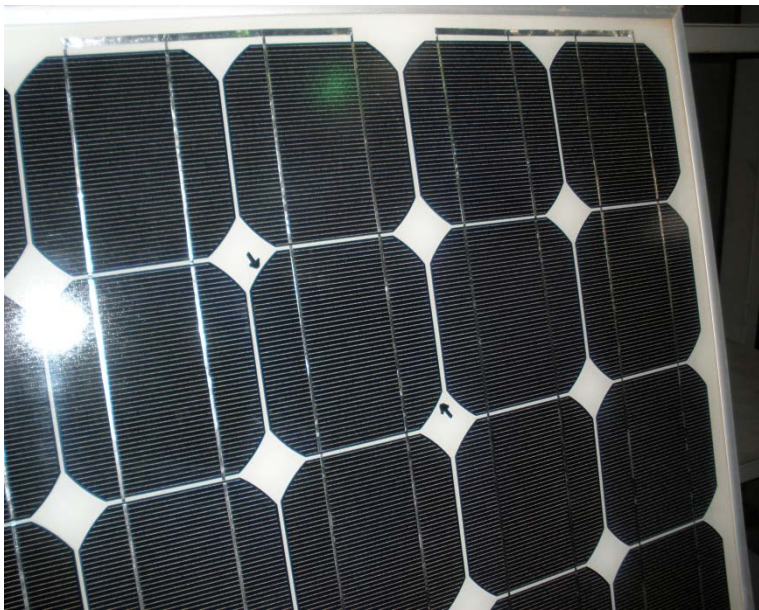
# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 09:57



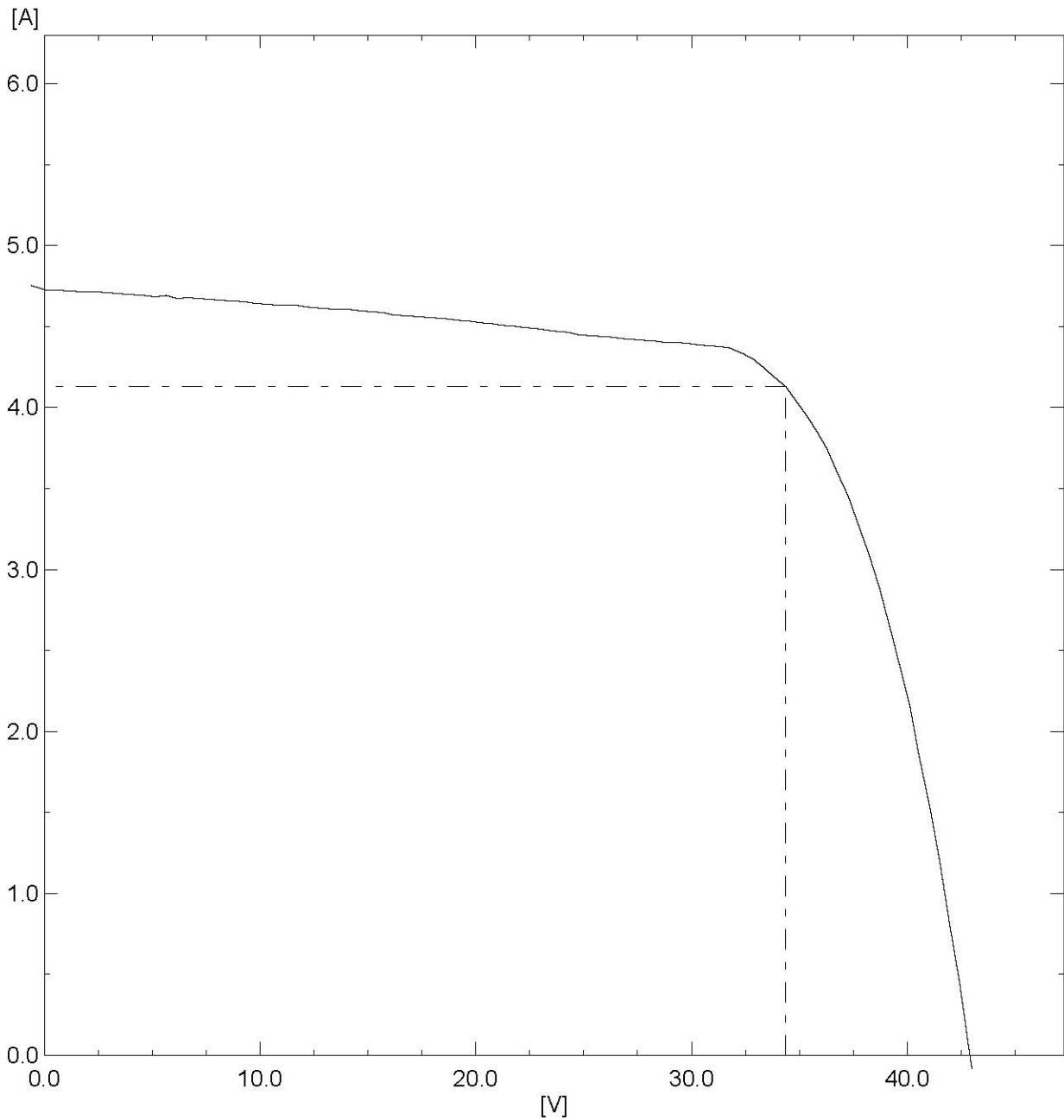
## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0875125
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.001 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	23.8 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	23.8 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.99 A	Voc	43.04 V
Imp	4.24 A	Vmp	34.23 V
Pmax	145.3 W	Fill Factor	67.7 %
Eficiencia célula	12.9 %	Eficiencia módulo	10.1 %



# Medida de curva I-V

CIEMAT Madrid 23-03-2009 09:47



## Datos de medida

Sun Simulator III -Labo version	3.0	Operador	MAM
ID módulo	m-Si	Número de serie	SR0883497
Temperatura estándar	25.0 °C	Célula de referencia	MTP789-1
Irradiancia media	1.001 kW/m <sup>2</sup>	Valor de calibración	117.5 mV
Temperatura módulo Área célula	24.7 °C 156.5 cm <sup>2</sup>	Temperatura Célula Referencia	24.7 °C
		Área módulo	14400.0 cm <sup>2</sup>
Células en paralelo	1	Células en serie	72
Isc	4.74 A	Voc	42.92 V
Imp	4.13 A	Vmp	34.37 V
Pmax	141.9 W	Fill Factor	69.8 %
Eficiencia célula	12.6 %	Eficiencia módulo	9.9 %

## Anexo B

**Departamento de Energía Unidad de Energía Solar Fotovoltaica**

Solicitor: FOTOSOLAR Pza. Marqués de Salamanca 10-5<sup>º</sup>I 28026 Madrid Tel 917011391 Fax 915239590 M 638101762 Contact: Hugo Yago Caselas Fernández. [hugo.caselas@fotosolar.com](mailto:hugo.caselas@fotosolar.com)

## **Photovoltaic (PV) Modules Test Report**

### **Object**

To measure the I-V curve and its characteristic parameters ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $P_m$  y FF) in Standard Test Conditions, STC, ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ , AM1.5G and normal incidence).

### **Samples to test**

15 PV modules, model PW1400-24V manufactured by PHOTOWATT.

### **Test Procedure**

The measurements are oriented to obtain the characteristic curve Current-Voltage (I-V) according to the IEC60904-1 standard, and the values of  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $P_m$  y FF, in Standard Test Conditions (STC) defined as: Solar irradiance of  $1000 \text{ W/m}^2$ , Cell temperature of  $25^\circ\text{C}$ , solar spectral irradiance AM1.5G (IEC 60904-3) and normal incidence of the light to the PV module. Measurements have been performed in a large area solar simulator type flash of one pulse (pulse time of 10 ms) and class AAA (IEC 60 904-9). All measurements were performed at temperature and irradiance values nearly to STC ( $1000 \pm 5 \text{ W/m}^2$  y  $25 \pm 2^\circ \text{C}$ ). Experimental  $I_{sc}$  was extrapolated to STC using the short circuit current temperature coefficient,  $\alpha$ . Experimental  $V_{oc}$  was extrapolated to STC using the open circuit voltage temperature coefficient,  $\beta$ .  $\alpha$  and  $\beta$  values were taken as the nominal values indicated by the PV module manufacturer. Temperature and irradiance corrections were negligible because of test values were nearly STC. No spectral corrections were performed.

#### **Notes:**

- 1 *Measurements have been performed directly in the Ciemat solar Simulator, without previous stabilization by sun exposition higher than  $20 \text{ kWh/m}^2$ (UNE-EN 50380).*
- 2 *The sample of PV modules was sent directly by the solicitor, selection procedure is unknown.*
- 3 *CIEMAT is not responsible in any aspect for the possible errors contained in this report o made during measurements.*
4. *This report can not be reproduced partially.*

### References

Irradiance References Reference solar cell: Czibula & Grundmann type RS-ID-1. Serial number 005-2002. Calibration certificate: 41411-PTB-06 (Nº.Ref. PTB-4.14-4024847) Body: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Temperature Digital thermometer: Fluke typo 51II Serial number: 82410171 Calibration certificate: 06-03584 Body: LOMG: Lab. Metrología de Galicia (ENAC Nº 77/LC158)

Electrical parameters Electronic load: PASAN Sun Simulator IIIb nº serie P752/1  
Calibrator: Fluke 5100B

### Estimated accuracies

-In Isc +/- 2.0 % -In Voc +/- 1.0 % -In  
Pm +/- 2.5 %

### Test results

Annex I shows the test results associated with the serial numbers of each PV module.

Revised by:      Performed by:

Faustino Chenlo Romero

#### *Notes:*

- 1      *Measurements have been performed directly in the Ciemat solar Simulator, without previous stabilization by sun exposition higher than 20 kWh/m<sup>2</sup>(UNE-EN 50380).*
- 2      *The sample of PV modules was sent directly by the solicitor, selection procedure is unknown.*
- 3      *CIEMAT is not responsible in any aspect for the possible errors contained in this report o made during measurements.*
4.    *This report can not be reproduced partially.*

## ANEX I TEST

### RESULTS

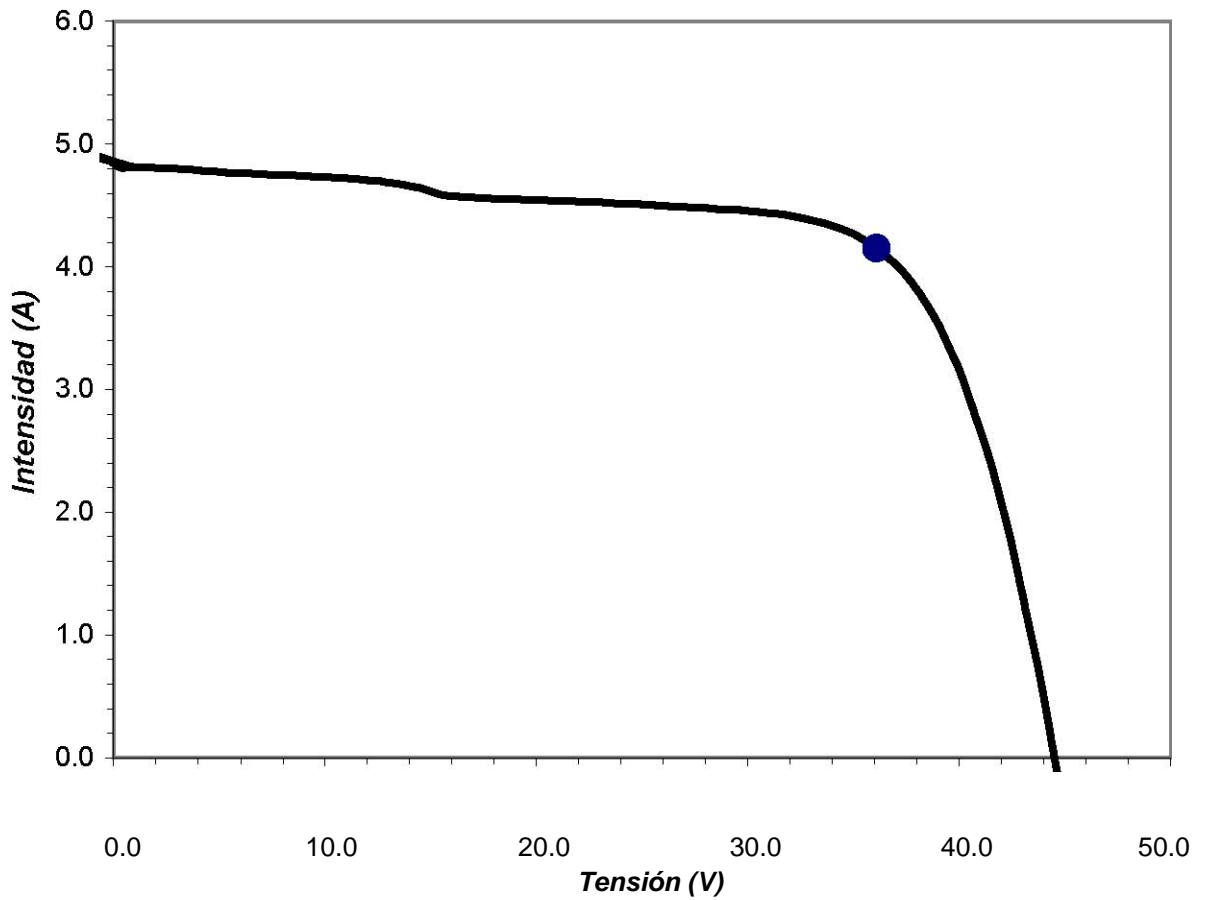
<b>Nº Serial Number</b>	<b>Pm(W)</b>	<b>Voc(V)</b>	<b>Isc(A)</b>	<b>Im(A)</b>	<b>Vm(V)</b>	<b>FF(%)</b>	<b>Model</b>
1 014000173214	134.30	43.76	4.56	3.78	35.55	67.30	PW1400-24V
2 014000122530	127.74	43.73	4.12	3.71	34.41	70.90	PW1400-24V
3 014000129352	127.57	44.08	4.16	3.65	34.93	69.50	PW1400-24V
4 014000129498	129.94	44.07	4.43	3.76	34.57	66.50	PW1400-24V
5 014000129908	125.92	44.02	4.20	3.65	34.48	68.10	PW1400-24V
6 014000129909	128.16	44.22	4.39	3.71	34.58	66.00	PW1400-24V
7 014000156933	134.70	44.39	4.40	3.80	35.45	69.00	PW1400-24V
8 014000157730	131.21	43.98	4.50	3.80	34.49	66.30	PW1400-24V
9 014000157732	130.59	44.04	4.27	3.68	35.45	69.50	PW1400-24V
10 014000158361	132.17	44.66	4.44	3.83	34.47	66.60	PW1400-24V
11 014000158362	136.40	44.67	4.45	3.79	36.01	68.70	PW1400-24V
12 014000172940	139.74	44.12	4.54	3.93	35.52	69.70	PW1400-24V
13 014000172941	140.45	44.11	4.71	4.01	35.01	67.60	PW1400-24V
14 014000173052	149.69	44.44	4.76	4.16	36.02	70.80	PW1400-24V
15 014000173055	149.91	44.53	4.85	4.15	36.10	69.40	PW1400-24V

Table 1. STC parameters.

**Notes:**

- 1 Measurements have been performed directly in the Ciemat solar Simulator, without previous stabilization by sun exposition higher than 20 kWh/m<sup>2</sup>(UNE-EN 50380).
- 2 The sample of PV modules was sent directly by the solicitor, selection procedure is unknown.
- 3 CIEMAT is not responsible in any aspect for the possible errors contained in this report o made during measurements.
4. This report can not be reproduced partially.

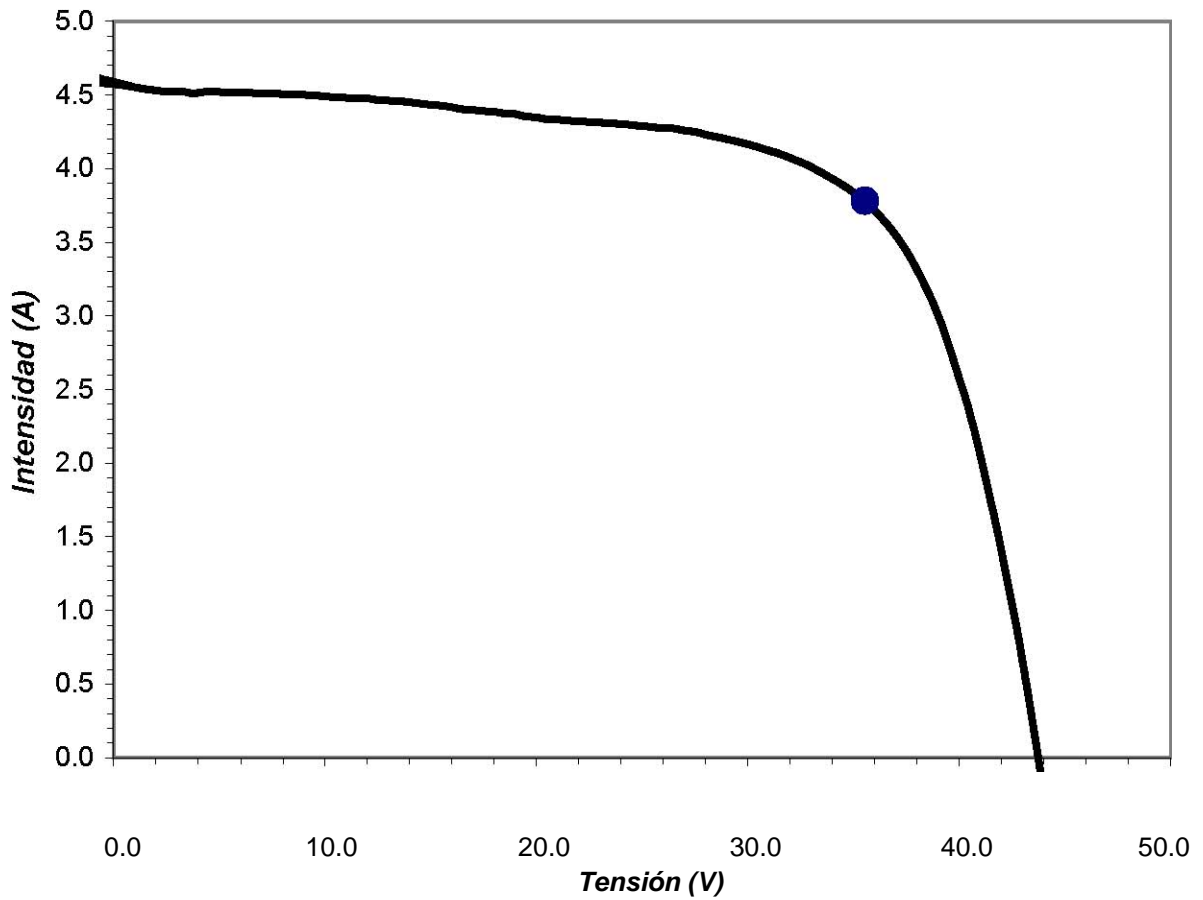




mar 03 marzo 2009

12:25:00

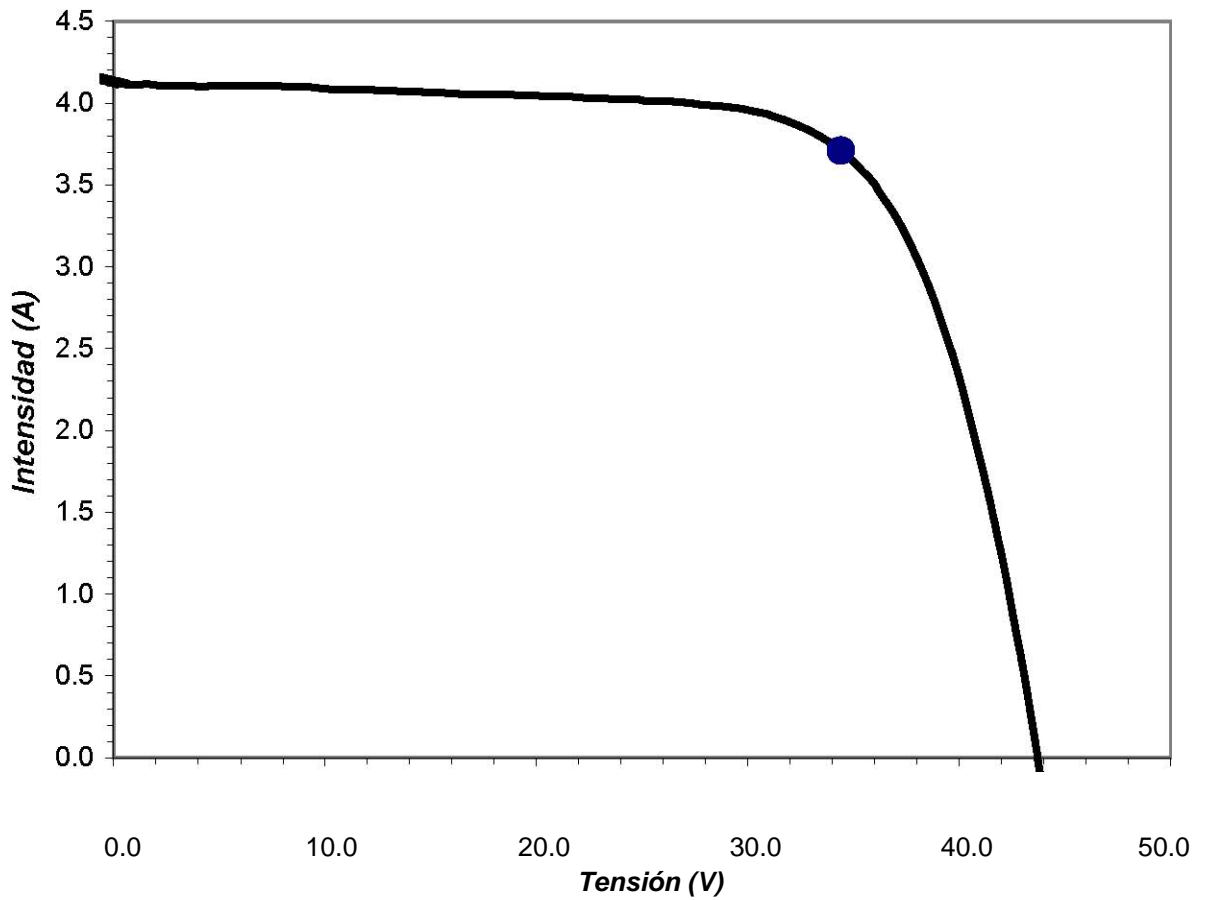
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000173055	
STC			
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>
1000	25	4.85	44.53
P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	149.9	4.15
V <sub>m</sub>	FF	36.1	69.4
		(W/m <sup>2</sup> )	(°C)
		(A)	(V)
		(W)	(V)
		(A)	(%)



mar 03 marzo 2009

12:29:00

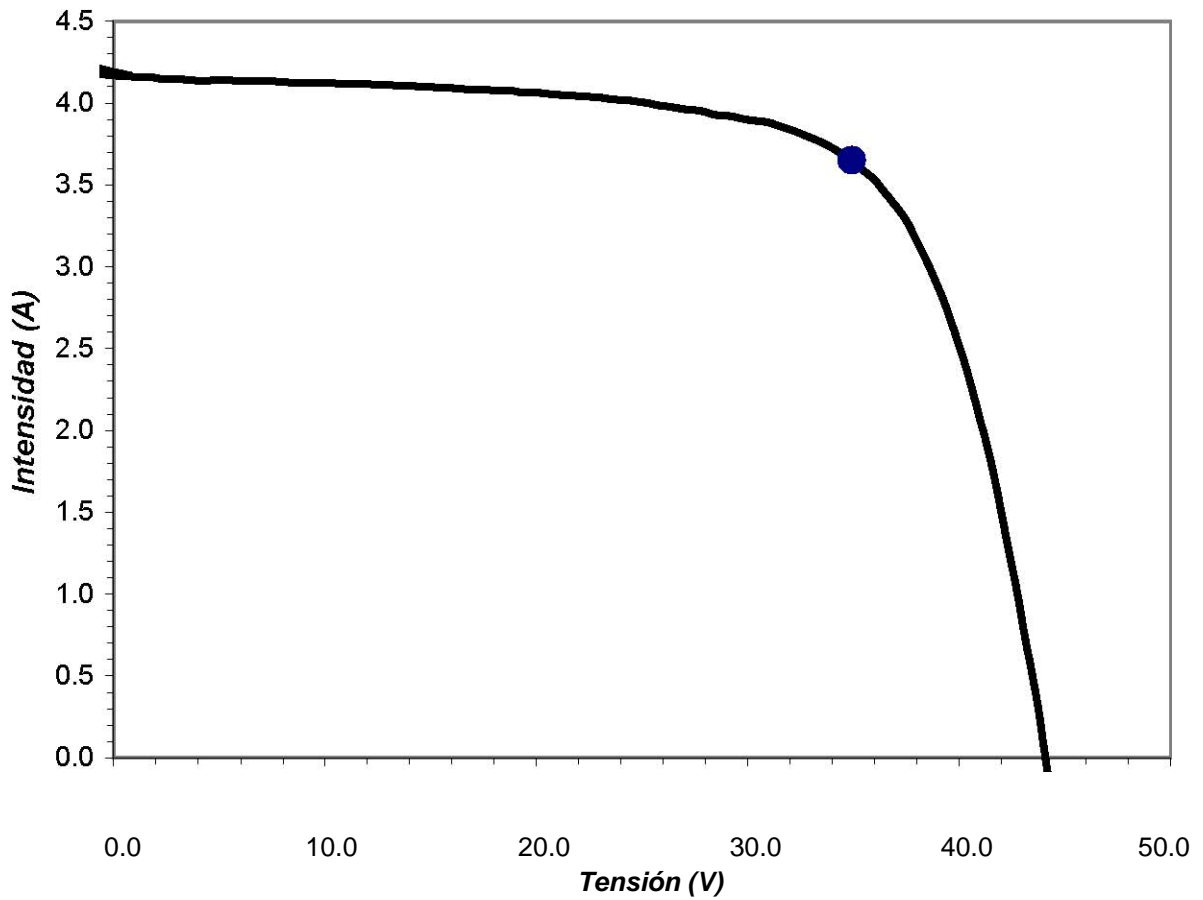
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000173214										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.56	43.76	134.3	3.78	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF											(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:37:00

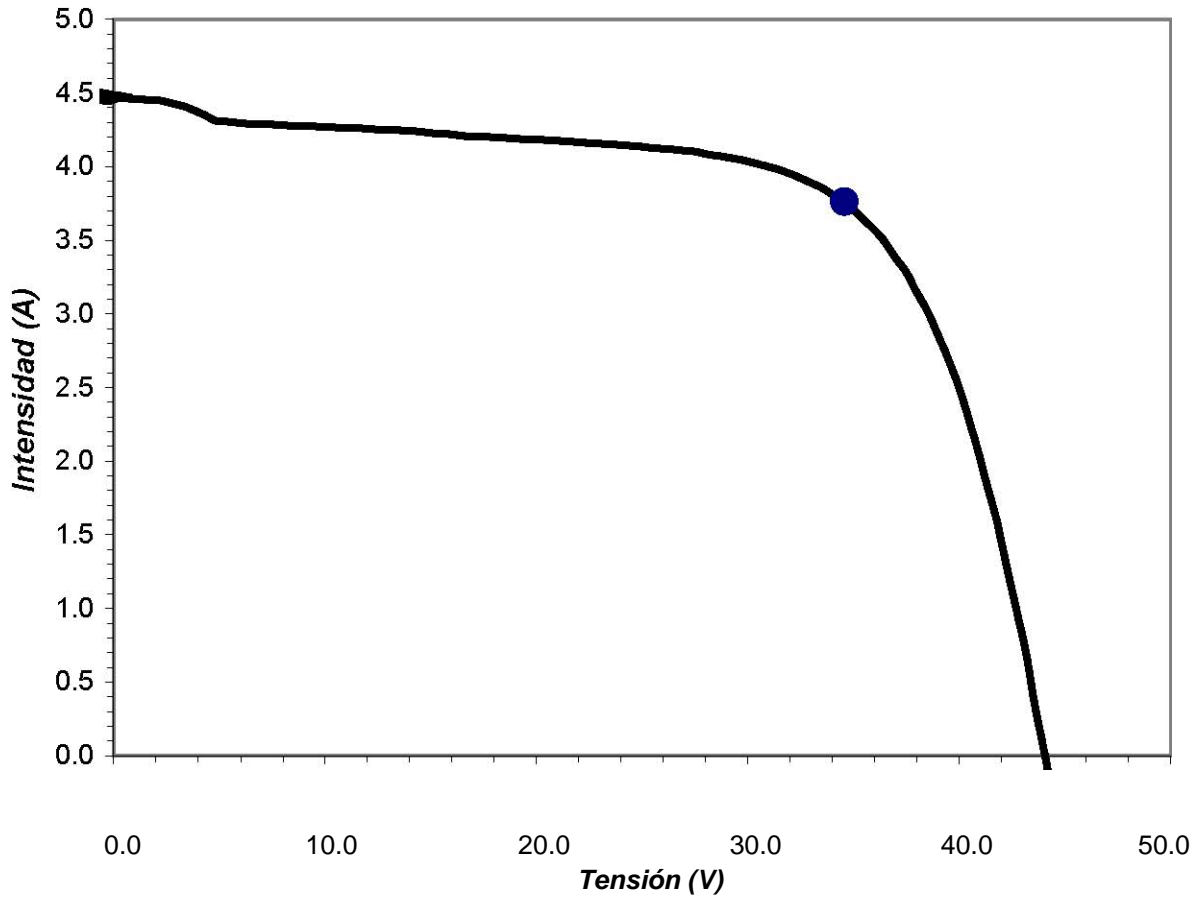
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000122530										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.12	43.73	127.7	3.71	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF											(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:36:00

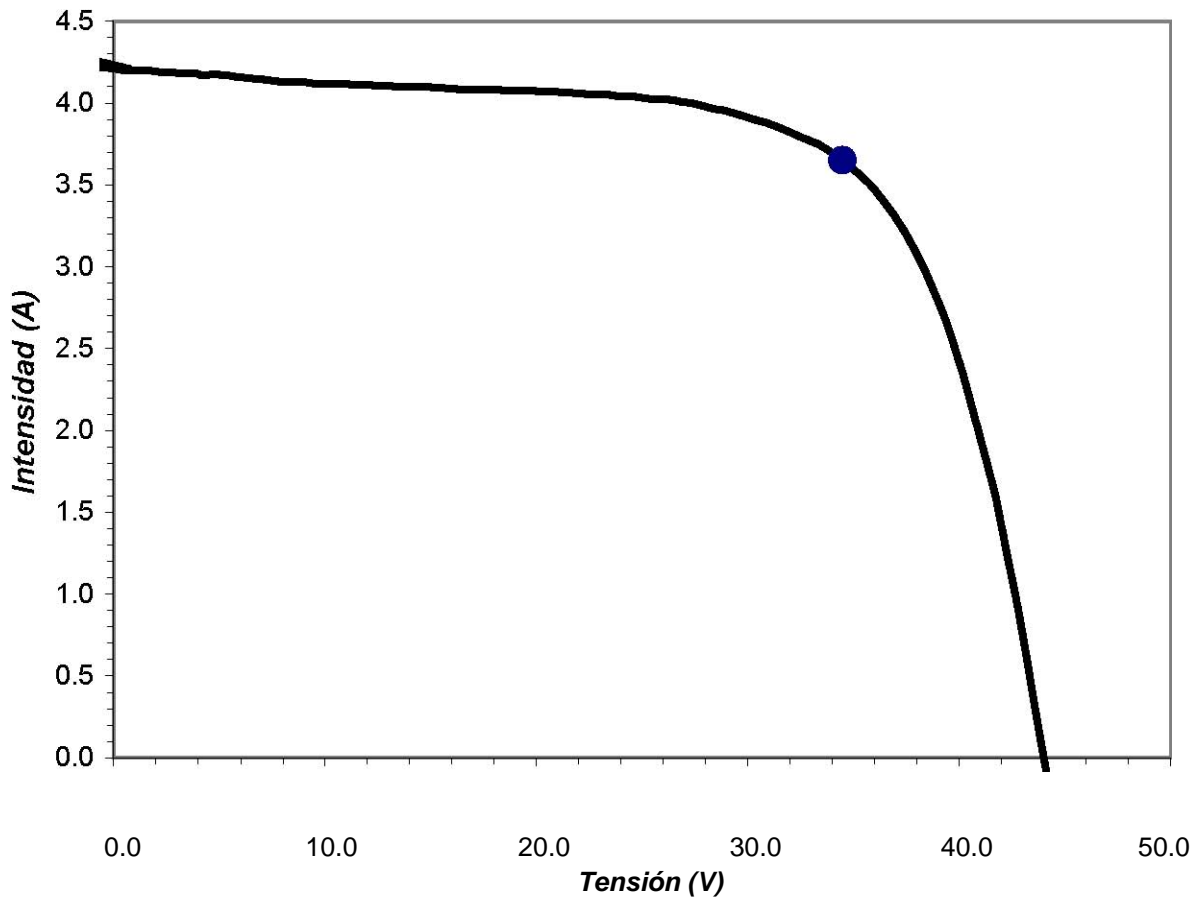
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000129352										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.16	44.08	127.6	3.65	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF									34.9	69.5	(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:35:00

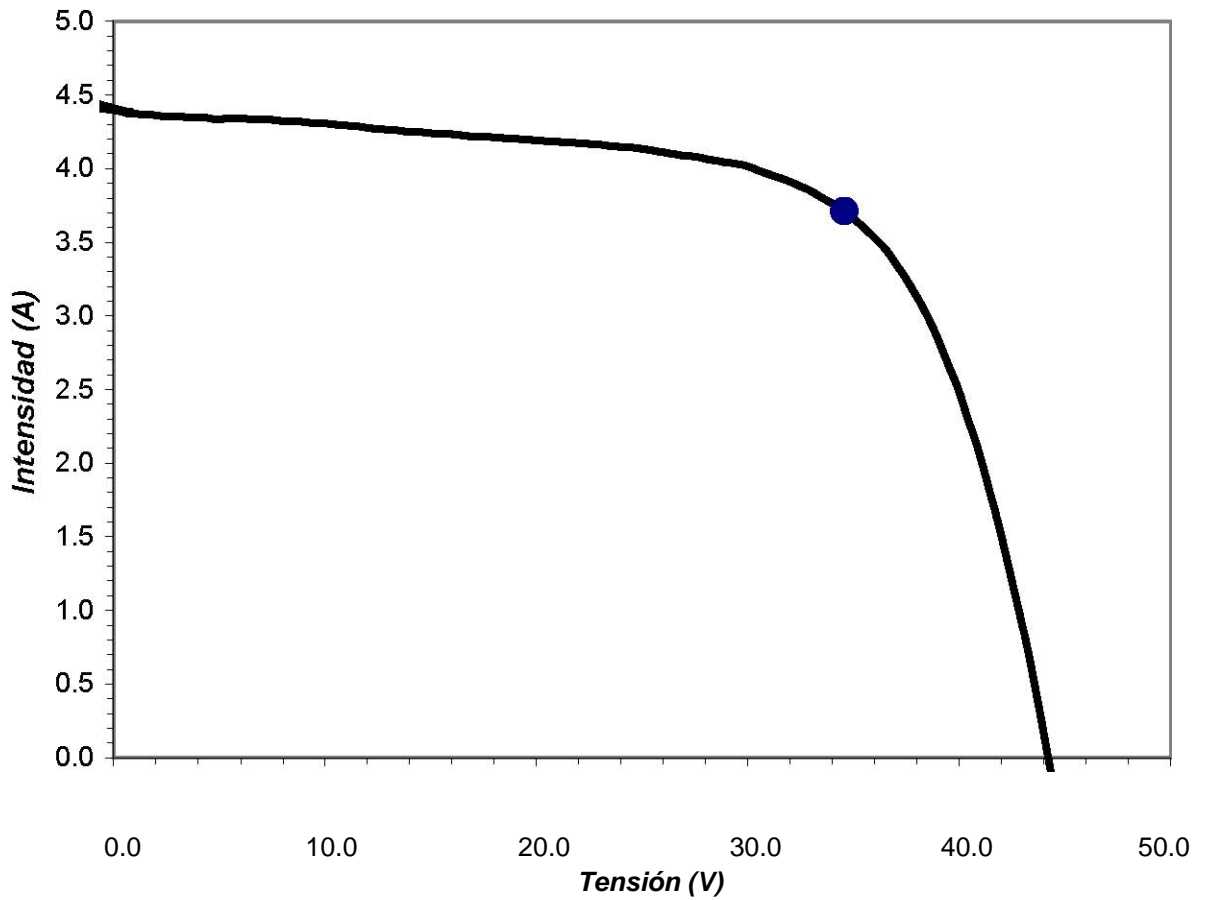
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000129498	
STC			
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub> P <sub>m</sub> I <sub>m</sub>
		1000	25 4.43 44.07 129.9 3.76
V <sub>m</sub>	FF		34.6 66.5
			(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
			(A) (V) (W)
			(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:38:00

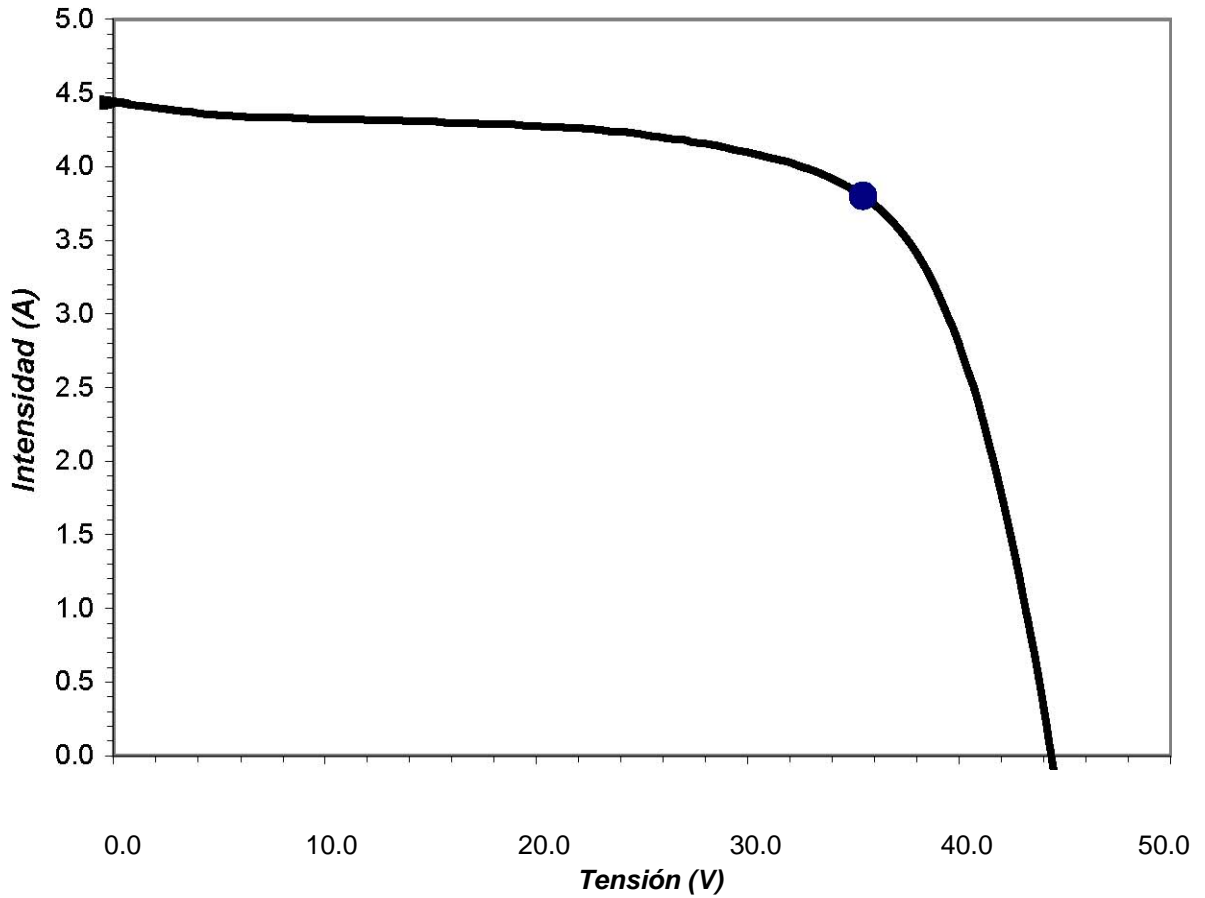
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000129908										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.20	44.02	125.9	3.65	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF									34.5	68.1	(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:19:00

<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000129909					
							STC
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>		1000 25 4.39 44.22 128.2 3.71 (W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF						34.6 66.0 (A) (V) (W)
							(V) (A) (%)

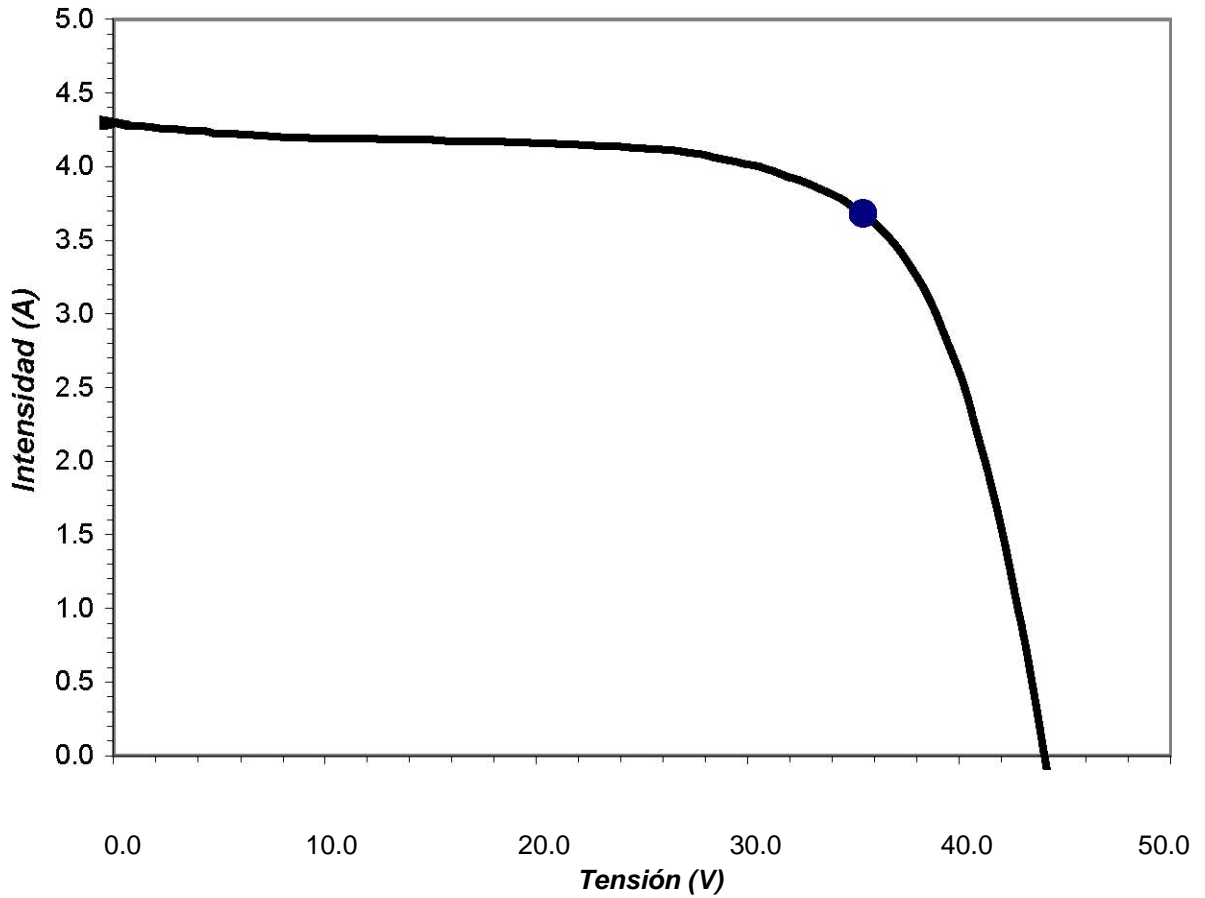


mar 03 marzo 2009

12:27:00

<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000156933										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.40	44.39	134.7	3.80	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF											(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)

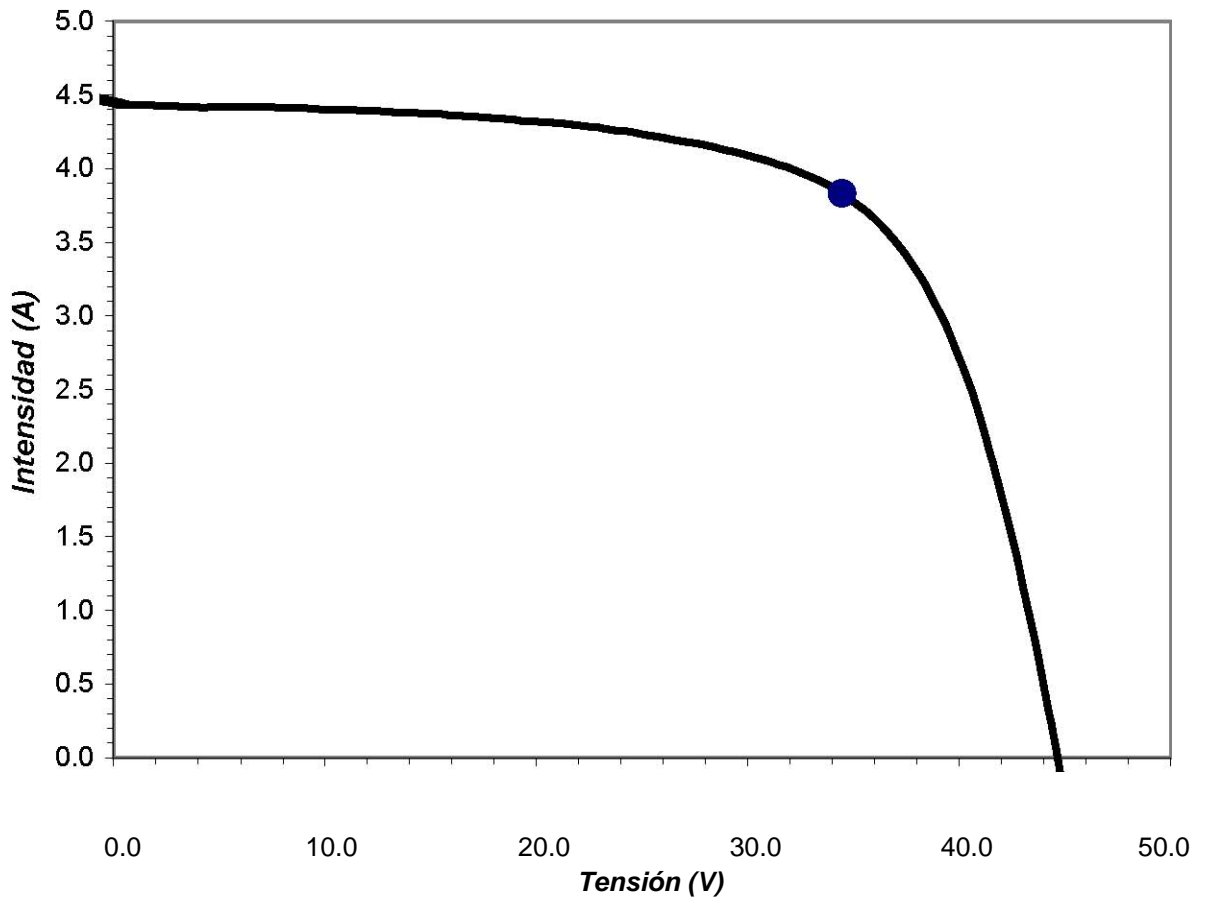




mar 03 marzo 2009

12:18:00

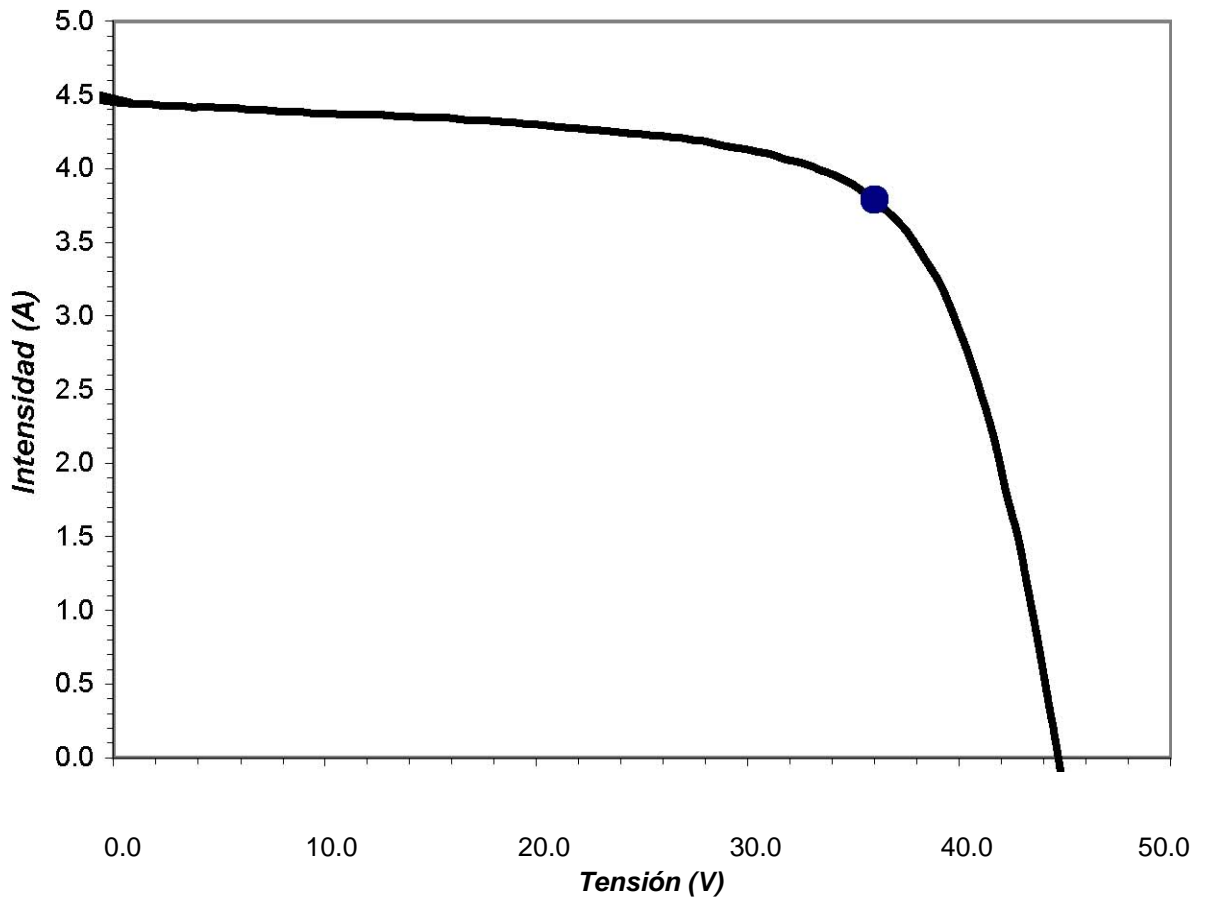
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000157732										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.27	44.04	130.6	3.68	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF											(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:33:00

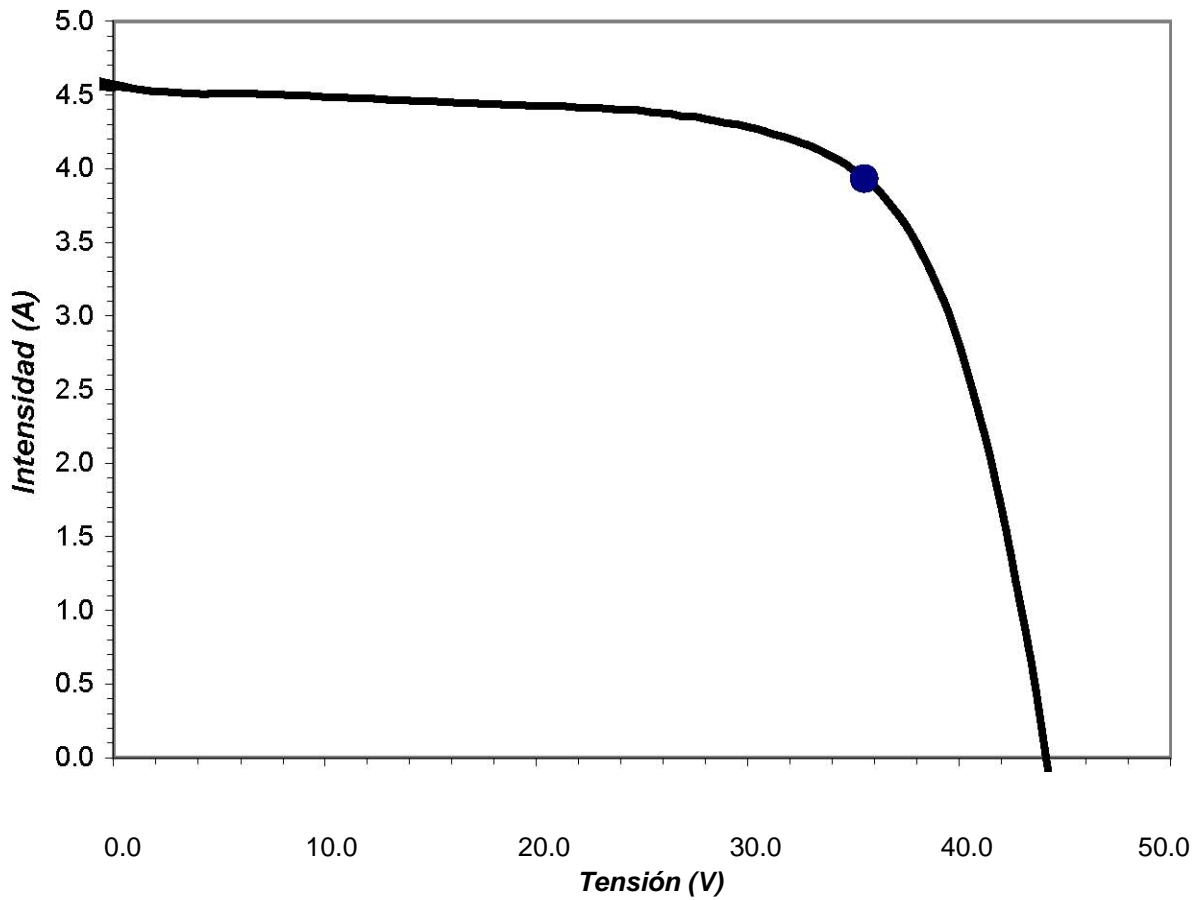
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000158361										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.44	44.66	132.2	3.83	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF									34.5	66.6	(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:34:00

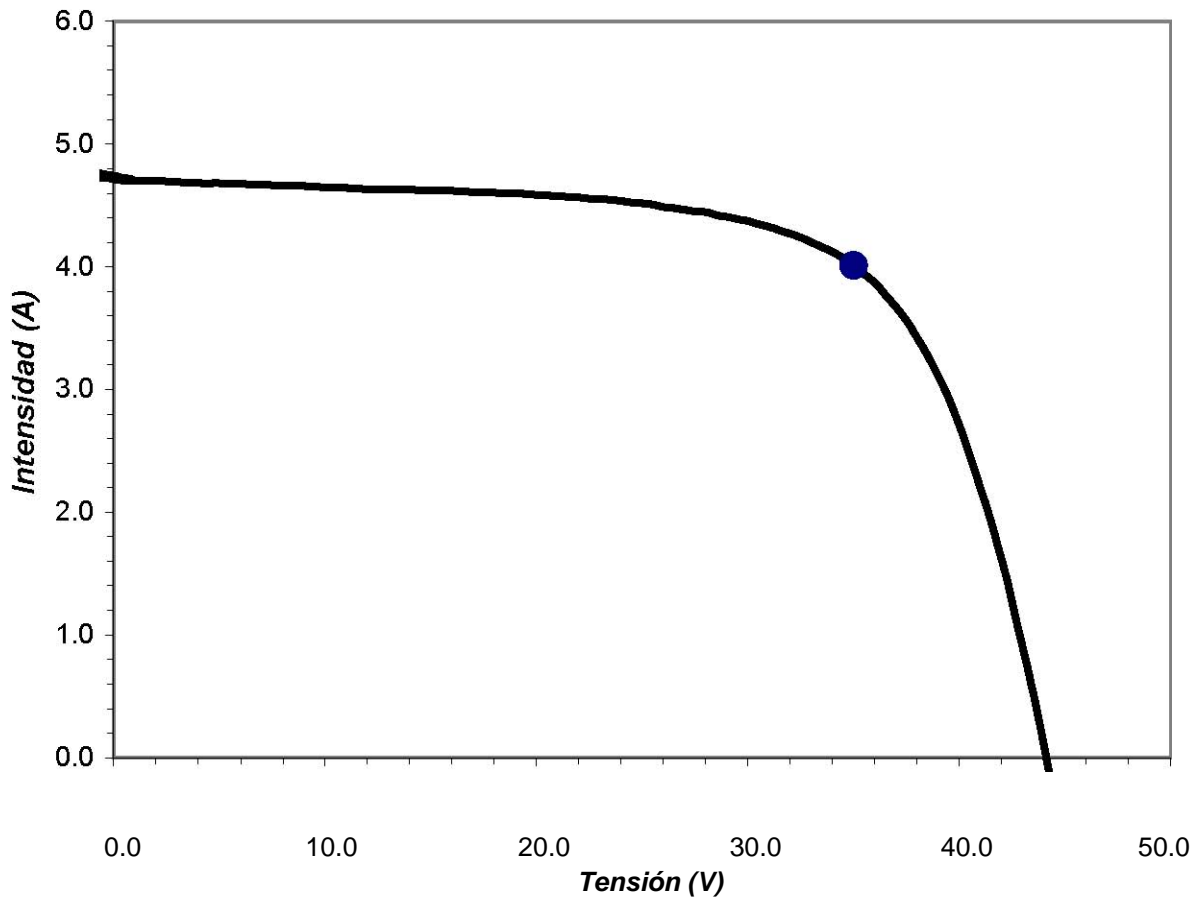
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000158362										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.45	44.67	136.4	3.79	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF											(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:31:00

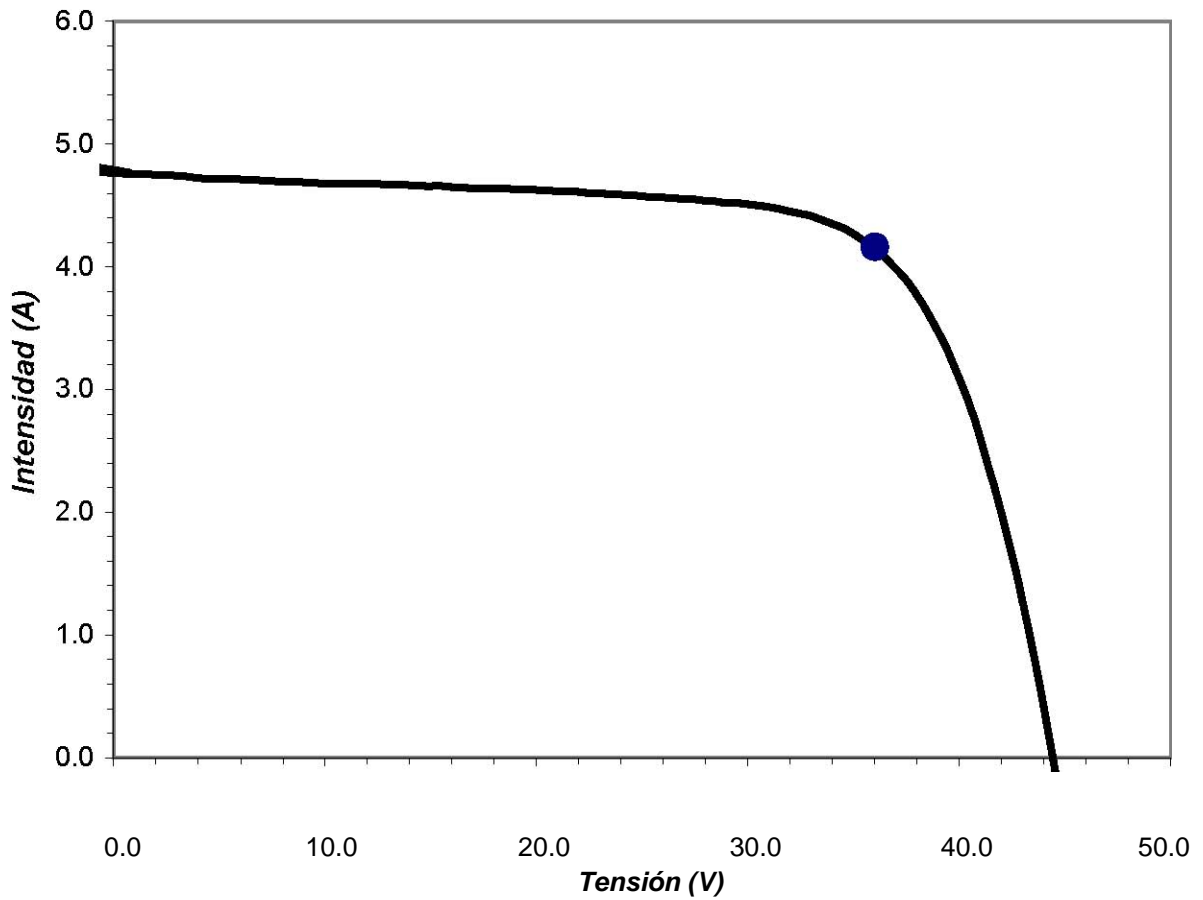
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000172940					
							STC
Irradiance	Temperature	Isc	Voc	Pm	Im		1000 25 4.54 44.12 139.7 3.93 (W/m <sup>2</sup> ) (°C)
Vm	FF						35.5 69.7 (A) (V) (W)
							(V) (A) (%)



mar 03 marzo 2009

12:30:00

<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000172941										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.71	44.11	140.5	4.01	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF									35.0	67.6	(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)



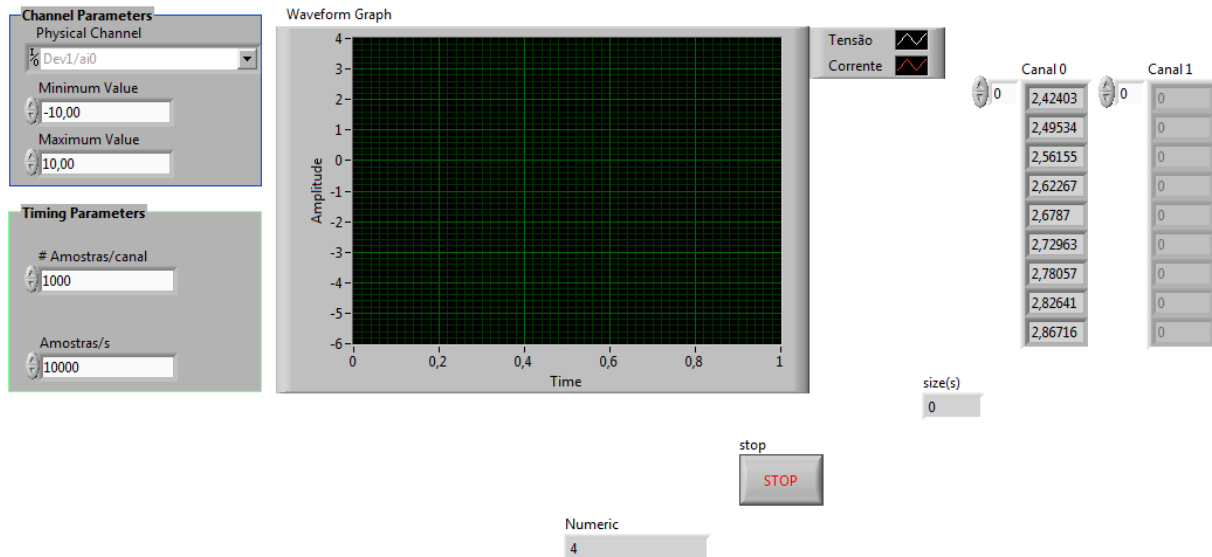
mar 03 marzo 2009

12:32:00

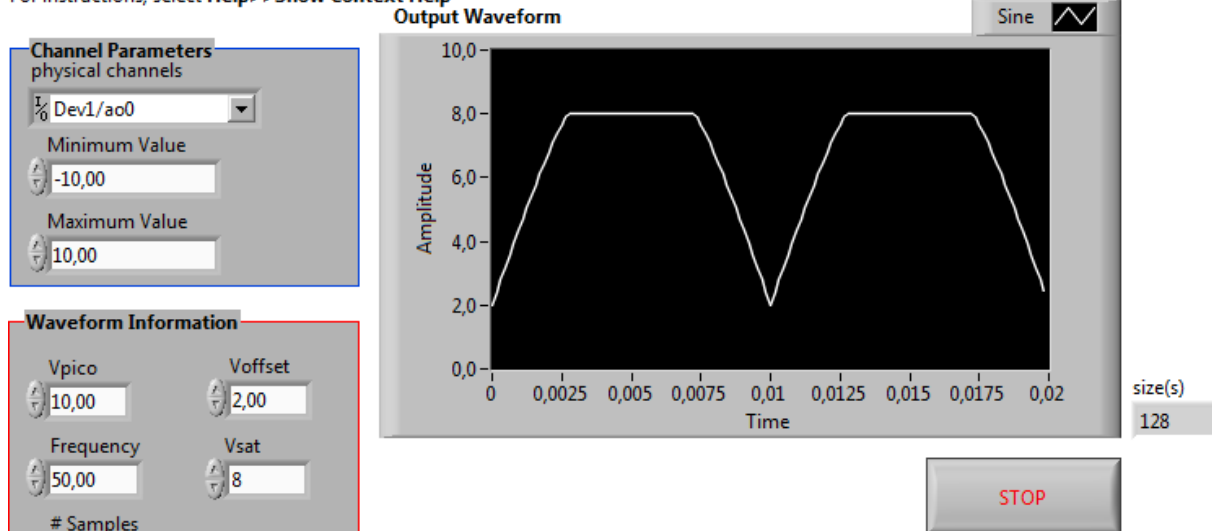
<b>PHOTOWATT PW1400-24V</b>		014000173052										
							STC					
Irradiance	Temperature	I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>m</sub>	I <sub>m</sub>	1000	25	4.76	44.44	149.7	4.16	(W/m <sup>2</sup> ) (°C)
V <sub>m</sub>	FF									36.0	70.8	(A) (V) (W)
												(V) (A) (%)

## Anexo C

No anexo C, são ilustrados dois VI implementados em *LabView*, desenvolvidos respectivamente para traçar a curva I-V e efectuar o controlo do *MOSFET* através deste *software*.



For instructions, select **Help>>Show Context Help**



**Note:**  
By setting "Use all onboard memory" to true, the "Number of Samples" input is ignored and the waveform is represented as accurately as possible using the entire FIFO on the device. This gives less timing resolution, however, as the sample rate must increase. Because this sample clock is divided down from a master timebase, higher frequencies are not as

**Nota:**  
FIFO Size da carta=16 384 amostras  
Output.OnbrdBufSize=16 384 (1 canal)  
Output.OnbrdBufSize=int (16 384/2=8 192) >> 2 canais  
Output.OnbrdBufSize=int (16 384/3=5 461) >> 3 canais  
.....