

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico

por

Miguel Ângelo Silveiro Valente

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Electrotécnica e Computadores.

Orientador: Prof. Mário Ventim Neves

Co-Orientador: Eng. Pedro Pereira

2011

Título da dissertação de Mestrado: Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico, "Copyright", Miguel Ângelo Silveiro Valente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

"A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor".

,

Resumo

A presente dissertação estuda, analisa e propõe um método para a caracterização automática de painéis fotovoltaicos. O método em causa consiste no desenvolvimento de um circuito electrónico de baixo custo, capaz de adquirir e representar as curvas I-V (corrente versus tensão) de painéis fotovoltaicos, que posteriormente será comparada com a curva ideal para cada painel.

Ao longo da dissertação é apresentado um modelo que permite estudar o funcionamento dos painéis fotovoltaicos sob o ponto de vista da influência da irradiância e da temperatura.

A abordagem teórica tem como objectivo compreender um painel fotovoltaico, estudando as principais características: funcionamento, material de construção, tipos de ligação, influência da irradiância e temperatura no desempenho, pontos característicos e utilização. Na componente prática analisa-se e testa-se o modelo matemático de um painel fotovoltaico.

Depois de consolidados os conhecimentos, foi projectado e desenvolvido um modelo para caracterização automática de um painel fotovoltaico. O modelo contempla o circuito electrónico para aquisição dos dados e, uma aplicação elaborada através de ferramentas informáticas (MATLAB) com o intuito de representar a curva característica I-V através dos dados recolhidos do circuito.

Palavras-chave: Energia renovável, sistemas fotovoltaicos, curva IV, painéis fotovoltaicos.

Abstract

This dissertation examines and proposes a method for automatic characterization of photovoltaic panels. This method consists in developing an inexpensive electronic circuit, able to acquire and represent IV curves (current versus voltage) of photovoltaic panels, which will later be compared with the ideal curve for each panel.

Throughout the dissertation is presented a model that allows study the functioning of photovoltaic panels, analyzing the influence of solar radiation and temperature.

The theoretical approach aims to understand a photovoltaic panel, studying its main characteristics: operation, construction materials, connection types, influence of solar radiation and temperature on performance, characteristic points and application. In the practical component is analyzed and tested the mathematical model of a photovoltaic panel.

After consolidated of knowledge, was designed and developed the model for automatic characterization of a photovoltaic panel. The model considers the electronic circuitry for data acquisition and an application elaborated by computer tool (MATLAB) an application that represents the IV curve of the data collected through the circuit.

Keywords: Renewable energy, photovoltaic systems, IV curve, photovoltaic panels.

,

Conteúdo

1	Introdução	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objectivo da Dissertação	4
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	Estado de Arte	7
2.1	Contribuição da dissertação	14
3	Energia Solar Fotovoltaica	15
3.1	A Radiação Solar	15
3.2	Contexto Histórico	16
3.2.1	As Células Fotovoltaicas	17
3.3	Efeito Fotovoltaico	18
3.4	Tipos de Células Fotovoltaicas	19
3.5	Formas de Conexão de um Painel Fotovoltaico	20
3.6	Características de um Painel Fotovoltaico	21
3.6.1	Curva Característica I-V	21
3.6.2	Ponto de Potência Máxima	23
3.7	Sistemas Fotovoltaicos	24
3.7.1	Sistemas Interligados à Rede	25
3.7.2	Sistemas Isolados	25
4	Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico	29
4.1	Modelo Eléctrico de uma Célula Fotovoltaica	29
4.1.1	Pontos de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica	31
4.2	Simulação do Circuito Eléctrico	32
4.2.1	Simulação em PSIM	32
4.2.2	Simulação em MATLAB	35
4.3	Protótipo Desenvolvido	46
4.3.1	Esquema do Protótipo	48
4.3.2	Simulação do Protótipo	49
4.3.3	Montagem do Circuito	53
4.3.4	Aplicação em MATLAB	54
4.4	Validação do Modelo	58
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	65

Lista de Figuras

2.1	Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico	8
2.2	Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico	9
2.3	Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico	9
2.4	Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico	10
2.5	Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico	11
2.6	Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico	12
3.1	Distribuição da radiação solar	15
3.2	Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica	18
3.3	Desenvolvimento de um painel fotovoltaico	19
3.4	Os diferentes tipos de células de silício, (a)- monocristalina, (b)-policristalino, (c)- amorfo	20
3.5	a) díodo bypass e b) díodo de bloqueio	21
3.6	Curva I-V de um painel fotovoltaico	22
3.7	Curva P-V de um painel fotovoltaico	23
3.8	Alteração da curva I-V com incidência da radiação solar	23
3.9	Alteração da curva I-V com a variação da temperatura	24
3.10	Alteração da curva P-V com a variação da temperatura	24
3.11	Configuração básica de um sistema interligado à rede eléctrica (centralizado) .	25
3.12	Configuração básica de um sistema interligado à rede eléctrica (distribuído) .	25
3.13	Configuração básica de um sistema isolado	26
3.14	Configuração básica de um sistema híbrido	27
4.1	Modelo simplificado de uma célula fotovoltaica	29
4.2	Esquema eléctrico de uma célula fotovoltaica	31
4.3	Circuito de simulação do modelo eléctrico de uma célula	33
4.4	Curva I-V obtida com a simulação do circuito eléctrico	34
4.5	Curva P-V obtida com a simulação do circuito eléctrico	34
4.6	Fluxograma para simulação do ficheiro	36
4.7	Curva I-V do painel BP MSX 110	36
4.8	Curva P-V do painel BP MSX 110	37
4.9	Curva I-V do painel BP MSX 110 em função da temperatura	37
4.10	Curva P-V do painel BP MSX 110 em função da temperatura	38
4.11	Curva I-V do painel BP MSX 110 em função da irradiância	38
4.12	Curva P-V do painel BP MSX 110 em função da irradiância	39
4.13	Fluxograma para a simulação do ficheiro	41
4.14	Curvas I-V para os diferentes valores de R_s e R_p do painel BP MSX 110 . . .	42
4.15	Figura com subfiguras	42

Lista de Figuras

4.16	Curva I-V ajustada do painel BP MSX 110	43
4.17	Curva P-V ajustada do painel BP MSX 110	43
4.18	Curva I-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da temperatura	44
4.19	Curva P-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da temperatura	44
4.20	Curva I-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da irradiância	45
4.21	Curva P-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da irradiância	45
4.22	Curvas características I-V de um painel BP MSX 110 fornecido pelo fabricante	45
4.23	Símbolo de um MOSFET	47
4.24	Curva característica de um MOSFET	47
4.25	Diagrama da unidade de teste	48
4.26	Esquema implementado em PSIM	50
4.27	Resultado da simulação do circuito	50
4.28	Curva da corrente em função da tensão	51
4.29	Esquema implementado em OrCAD	51
4.30	Resultado da simulação do circuito	52
4.31	Curva da corrente em função da tensão	52
4.32	Circuito e seus componentes	53
4.33	Fluxograma para as várias etapas da aplicação	54
4.34	Aparência da aplicação	55
4.35	Janela de inserção dos valores referentes a um painel fotovoltaico	55
4.36	Curva característica consoante os valores característicos do painel em questão	56
4.37	Valores adquiridos	56
4.38	Figura com subfiguras	57
4.39	Figura com subfiguras	57
4.40	Sistema instalado no telhado do edifício X	58
4.41	Fluxograma dos procedimentos a utilizar no teste	59
4.42	Curva característica I-V do painel em estudo em condições típicas	60
4.43	Valores de corrente e tensão adquiridos pelo circuito	61
4.44	Curva característica I-V adquirida	61
4.45	Curva característica P-V adquirida	62
4.46	Valores adquiridos de corrente	62
4.47	Valores adquiridos de tensão	63

Lista de Tabelas

2.1	Diferenças entre as diversas soluções descritas	13
3.1	Rendimento das diferentes células fotovoltaicas	20
4.1	Características do painel fotovoltaico BP MSX 110	33
4.2	Características do painel fotovoltaico em teste	59

,

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Corrente alternada
DC	Corrente continua
G	Irradiância solar global na superfície da Terra
I	Intensidade de corrente
I_{SC}	Corrente de curto-circuito de uma célula ou módulo fotovoltaico
I_{pv}	Corrente gerada pelo painel
I_{max}	Corrente produzida pela célula ou módulo fotovoltaico no ponto de potência máxima
I_d	Corrente que circula através do diodo
I_0	Corrente de saturação reversa do diodo
i_D	Corrente que atravessa o dreno do MOSFET
K	Constante de Boltzmann
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
m	Factor de idealidade do diodo
P	Potência do módulo
P_{max}	Potência máxima na curva característica de uma célula ou módulo fotovoltaico
q	Carga eléctrica do electrão
R_s	Resistência série de uma célula ou módulo fotovoltaico
R_p	Resistência paralelo de uma célula ou módulo fotovoltaico
STC	Condições de teste standard
T	Temperatura da célula
V	Tensão ou diferença de potencial
V_D	Tensão aplicada aos terminais do diodo
V_{DS}	Tensão entre o dreno e a fonte
V_{GS}	Tensão entre a porta e a fonte
V_{max}	Tensão para que ocorre a potência máxima de uma célula ou módulo fotovoltaico
V_{OC}	Tensão em circuito aberto
V_T	Potencial térmico
V_t	Tensão no limiar (valor de threshold)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Desde os tempos mais remotos, o homem utiliza diferentes formas de energia. Antigamente, utilizava-se a energia térmica proveniente da queima de troncos de árvores para obter calor e iluminação nos períodos nocturnos. Com o passar dos tempos, a dependência do homem do uso de energia e do desenvolvimento do sector industrial, bem com da utilização de equipamentos electromecânicos nas mais diversas actividades, fez com que a procura de energia sofresse aumentos exponenciais nas últimas décadas.

O aumento da procura de energia aliado aos baixos investimentos realizados no sector da geração de energia (fontes renováveis), resultou num período de colapso no sistema energético, bem como num impacto ambiental bastante negativo, aumentando demasiado a emissão de gases para a atmosfera.

No início da década de 80, face ao crescimento da procura de energia eléctrica e à escassez de combustíveis fósseis, as energias renováveis ganharam mais destaque, pois, além de serem inesgotáveis, praticamente não trazem danos ao meio ambiente. Poderá considerar-se a energia fotovoltaica uma das mais promissoras, uma vez que aproveita a energia gerada pelo sol, abundante na escala terrestre do tempo, tanto como fonte de calor como de luz.

Nos sistemas fotovoltaicos a energia proveniente do sol é transformada directamente em electricidade. Um painel fotovoltaico é constituído por células, que são os dispositivos responsáveis pela transformação da radiação solar em electricidade. Uma das principais características destes sistemas é a possibilidade de dimensionamento, ou seja, os sistemas dispõem de um conjunto de painéis para produzir uma determinada quantidade de energia, existindo a hipótese de se poder aumentar o número de painéis caso seja necessário.

A energia fotovoltaica inicialmente apresentava custos muito elevados. As primeiras células fotovoltaicas produzidas apresentavam um custo de US\$600/W, mas com o evoluir dos tempos e a aplicação em pequenas áreas, utilizando novos materiais semicondutores, permitiram o desenvolvimento da tecnologia de produção das células levando a que o custo de produção de energia dos sistemas fotovoltaicos atingisse nos dias de hoje níveis mais atractivos (US\$8/W) [1], para a produção de energia.

Os sistemas fotovoltaicos apresentam diversas vantagens tais como: total ausência de poluição; autonomia (visto não precisar de conexão à rede eléctrica ou a qualquer suplemento de combustíveis fósseis); tempo de vida elevado para os painéis; expansão à medida das necessidades bastando para isso adicionar mais painéis ao sistema. Este conjunto de características activou, nos países preocupados com a redução dos efeitos ambientais no sector energético, estímulos para a implementação de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas para operarem em paralelo com a rede eléctrica convencional.

1.2 Objectivo da Dissertação

O objectivo desta dissertação é a caracterização automática de um painel fotovoltaico, representando a curva característica I-V.

A curva característica de um painel fotovoltaico é um factor muito importante, quer na construção do painel, quer na obtenção em tempo real dos pontos de potência máxima, tensão em circuito aberto, corrente em curto-circuito e também no desempenho a longo prazo dos sistemas fotovoltaicos.

Neste contexto torna-se evidente a importância da correcta caracterização dos sistemas fotovoltaicos. Esta caracterização completa envolve ensaios eléctricos e mecânicos. É a partir da análise da curva característica corrente versus tensão (curva I-V) que são obtidos os principais factores que definem o comportamento eléctrico de um painel fotovoltaico. Factores externos, tais como, irradiância não uniforme incidente no painel, uma brusca diferença de temperatura, instrumentos de medidas eléctricas não calibrados ou inadequados, entre outros, são potenciais erros que podem reflectir-se na distorção da curva característica do painel e consequentemente no valor da potência máxima.

Para atingir o objectivo da dissertação, desenvolveu-se, um circuito para adquirir os valores da corrente e tensão do painel e uma aplicação em MATLAB para tratamento de dados e visualização da curva.

Este sistema, circuito e aplicação, permitem avaliar o desempenho de um painel fotovoltaico. Na aplicação desenvolvida, representa-se a curva I-V medida sobreposta com a curva I-V fornecida pelo fabricante, para concluir se o painel apresenta um bom rendimento.

1.3 Estrutura da Dissertação

Nesta dissertação além deste capítulo introdutório, são apresentados mais quatro capítulos onde se descrevem as principais características de um painel fotovoltaico e as metodologias utilizadas para alcançar o objectivo proposto.

No segundo capítulo é demonstrado o interesse pelo mundo nas energias renováveis e as suas formas de aplicação. É também neste capítulo que se explica o objectivo desta dissertação, em consonância com o que foi desenvolvido por outros investigadores.

No terceiro capítulo é explorado a vertente teórica sobre painéis fotovoltaicos. Descreve-se o seu percurso histórico, observado pela primeira vez por Edmund Becquerel em 1839. É também explicado o funcionamento das células, descrevendo o efeito fotovoltaico, os diferentes materiais de construção, os diversos tipos de conexões e as curvas e pontos fundamentais de células fotovoltaicas. É ainda abordada a radiação solar explicando o seu efeito numa célula e os possíveis esquemas de ligação de um sistema fotovoltaico.

O quarto capítulo é composto pela componente prática da dissertação, começando por referenciar e explicar detalhadamente o modelo matemático de uma célula fotovoltaica e, posteriormente, a sua simulação em PSIM e MATLAB. Apresenta-se o circuito e aplicação desenvolvidos para a caracterização automática de um painel fotovoltaico.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, nos termos dos capítulos anteriores, bem como sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado de Arte

A elevada preocupação da sociedade com os problemas ambientais e a escassez de combustíveis fósseis, promoveu o desenvolvimento de medidas para tentar sustentar o aumento indiscriminado do uso de combustíveis fósseis poluentes, reduzir a emissão de gases e, por conseguinte, incentivar o uso de energias renováveis. Assim, nos dias de hoje vemos um grande desenvolvimento das áreas relacionadas com as energias renováveis nomeadamente com a energia fotovoltaica.

No desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos, os investigadores/projectistas têm encontrado algumas dificuldades relacionadas com a incerteza dos parâmetros ambientais (irradiância e temperatura), aos quais os painéis fotovoltaicos são submetidos durante a sua operação.

Estas grandezas envolvidas não podem ser medidas com precisão pelos sentidos humanos. Pois é impossível a um Ser Humano quantificar a radiação solar ou a temperatura, sem que possua os instrumentos adequados para o efeito.

No caso do estudo de sistemas fotovoltaicos, além dos parâmetros eléctricos de saída (corrente e tensão do painel fotovoltaico), os parâmetros de entrada, a irradiância e temperatura não podem ser apenas valores estimados. Assim, é preciso efectuar a medição das grandezas eléctricas e dos parâmetros ambientais com rigor e de forma precisa, recorrendo a equipamentos adequados.

Assim, com a finalidade de estudar o comportamento dos sistemas fotovoltaicos, este trabalho apresenta um projecto para a caracterização automática de um painel fotovoltaico. Descrevem-se os circuitos e programas desenvolvidos e implementados para a obtenção de cada parâmetro de um sistema fotovoltaico.

Para a aquisição da curva característica de um painel fotovoltaico foram desenvolvidos vários estudos e soluções.

O Instituto de Educação Cles, envolvido no programa de educação científica proporcionada pela Fundação Caritro [2], apresenta um esquema bastante simples que consiste num pequeno conjunto de equipamentos, um painel fotovoltaico, uma resistência variável, um amperímetro para medir a corrente e um voltímetro para medir a tensão, geradas respectivamente, pelo painel. É a resistência que simula uma carga externa. Após a interligação destes equipamentos, como se pode observar na figura 2.1, é possível avançar com a simulação registando

os valores numa tabela. Realizada a simulação e com os valores representados na tabela é possível desenhar a curva característica I-V.



Figura 2.1: Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico [2]

No decorrer da experiência, para se obter os valores da corrente e tensão, é necessário variar a resistência manualmente, e à medida que se vai variando a resistência registam-se os valores referidos numa tabela.

Um dos inconvenientes desta solução passa pelo facto de, sempre que se varia a resistência, ter de se anotar os valores correspondentes à corrente e tensão. Ou seja, pelo facto da experiência ser realizada manualmente e com tarefas em simultâneo existe uma forte possibilidade de ocorrerem erros, pois não é permitido ao Ser Humano realizar operações em milésimos de segundo e, também porque o processo pode tornar-se complicado e cansativo, se for repetido diversas vezes. Mas em contrapartida a sua implementação é bastante simples e de baixo custo.

Em [3], é proposto um circuito para obter a curva característica I-V de painéis fotovoltaicos de baixa potência com correntes até 5A, de fácil implementação e baixo custo. A ideia inicial é obter a curva dos painéis de forma automática com a utilização de um micro controlador, facilitando o processo e reduzindo os erros humanos na medição dos valores.

No artigo são apresentadas duas formas de controlar a tensão de referência, que é o ponto-chave do projecto. É através do controlo da tensão, que é permitido encontrar as coordenadas I-V de um painel. O primeiro modo, será controlar manualmente a tensão através de um divisor de tensão e o segundo modo seria através de um micro controlador que não foi implementado mas fica como ideia para projectos futuros.

No circuito proposto na figura 2.2, o amplificador operacional (AmpOp) é alimentado por uma tensão contínua V_{CC} de origem externa. Para garantir que não ocorrem possíveis interferências entre tensões do painel e do circuito acrescentou-se um diodo para assegurar que a corrente inversamente polarizada não circule pelo circuito.

No terminal não inversor do AmpOp, foi acrescentada uma tensão de referência e através do curto-circuito entre os terminais do AmpOp, uma tensão V_{ref} imposta por R_1 , pois um dos terminais da resistência está ligado ao terminal inversor do AmpOp. Pela Lei de Ohm, V

$= R \times I$, que por sua vez, $I = V_{ref}/R_1$, R_1 possui um valor fixo, pois a corrente I vai variando à medida que V_{ref} varia.

Assim, pode-se observar as coordenadas de um painel, desde circuito aberto (sem carga) até ao curto-circuito (resistência nula).

As resistências R_2 e R_3 , representadas no circuito da figura 2.2 em série com o potenciômetro, são utilizadas para obter uma maior precisão na aquisição dos valores de tensão e corrente. Está ainda representado no circuito, uma chave de selecção que teria como objectivo seleccionar entre o modo manual e automático.

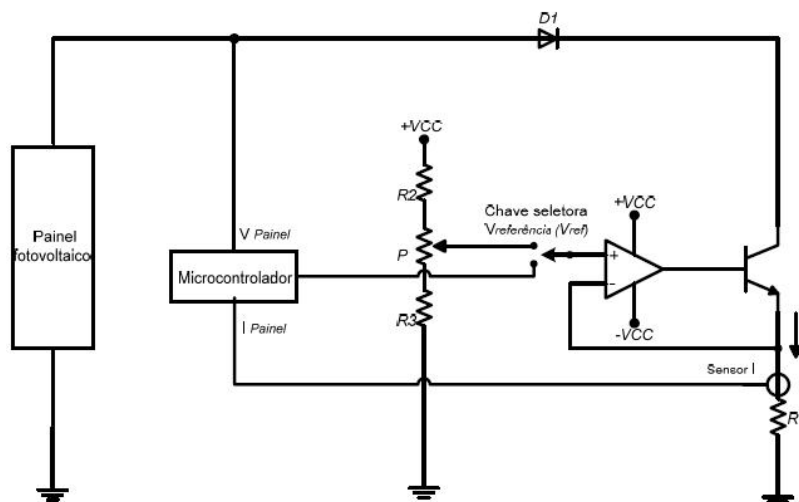


Figura 2.2: Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico [3]



Figura 2.3: Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico [3]

Pela observação das figuras 2.2 e 2.3, pode-se concluir que esta solução apresenta um esquema mais elaborado em comparação com a figura 2.1. Foram inseridos alguns componentes para garantir uma maior precisão dos dados. Mas relativamente à leitura dos dados depara-se com o mesmo tipo de problema que o modelo anterior, ou seja, uma vez que são utilizados dois multímetros para a leitura e o registo dos dados é realizado manualmente, possibilita a

ocorrência de erros.

Outros sistemas foram desenvolvidos por Prieb e Hecktheu [4, 5], que apresentam uma solução um pouco mais elaborada. Os autores não se limitaram apenas a adquirir os sinais da corrente e tensão, mas também a aplicar dispositivos para a leitura dos valores da temperatura e irradiância. Na figura 2.4 está representado o esquema de ligação dos equipamentos.

Como se pode observar na figura 2.4, o sistema dispõe de diversos equipamentos para medição e aquisição dos diversos dados necessários para a caracterização de um painel fotovoltaico na construção da curva característica I-V, bem como os valores da temperatura e irradiância. Na figura estão representados o painel fotovoltaico em teste, uma célula de referência do mesmo material que o painel para a medir a irradiância e os equipamentos são: um computador para tratamento e armazenamento dos dados, 3 multímetros (Hewlett Packard HP34401A de grande precisão, com capacidade de armazenagem até 512 leituras e que permitem a ligação ao computador através da interface GPIB) utilizados para registar os valores da corrente e tensão do painel fotovoltaico e da irradiância, uma fonte de tensão (Kepco BOP 50-20) que simboliza a carga electrónica e uma placa de aquisição de dados (da Hewlett Packard HP34970A) para a medição da temperatura.

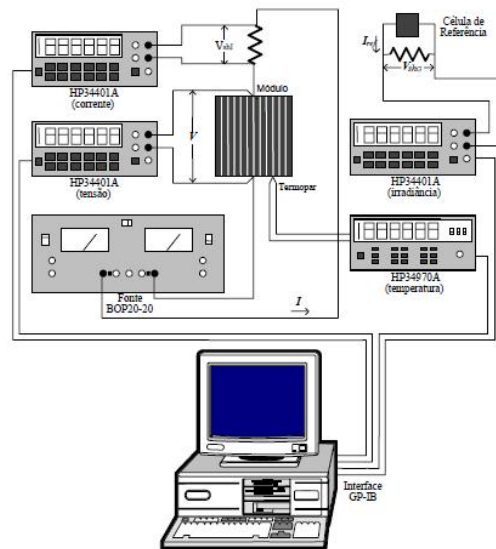


Figura 2.4: Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico [5]

Os testes decorreram ao ar livre, utilizando radiação solar proveniente do Sol. A realização dos testes começa com a medição da temperatura, medida por um termopar colocado no painel. Uma vez atingida a temperatura $25^{\circ}C$ é retirado o termopar do painel e disparada a fonte que irá polarizar o mesmo desde o curto-circuito até ao circuito aberto. Este processo é controlado pelo computador. A corrente que circula pelo painel fotovoltaico é medida a partir da queda de tensão sobre a resistência e a tensão é medida directamente nos terminais do painel. Os sinais, quer da tensão do painel, quer da tensão da resistência (utilizada para medir a corrente do painel) bem como a tensão da célula de referência (utilizada para medir a irradiância), são medidos simultaneamente através dos multímetros e posteriormente armazenados no computador.

O processo para aquisição da curva característica I-V, demora aproximadamente 2 segundos, e são adquiridos 500 pares de pontos I-V. A temperatura é medida duas vezes, no início e no fim da aquisição dos pares de pontos, sendo utilizada uma placa de aquisição de dados Hewlett Packard HP 34970 para exportar os dados para o PC. É importante salientar que, no ensaio, a taxa de variação da temperatura não é relevante, mas sim garantir que a temperatura não varie muito durante o teste. O controlo dos instrumentos utilizados e aquisição de dados é realizado através do software TRACER 1.0, que foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

André Tomaz de Carvalho [6], apresenta uma proposta de monitorização constante da operação de painéis fotovoltaicos inseridos num sistema isolado e num sistema interligado com a rede eléctrica. A monitorização é realizada em condições reais, ou seja, os painéis estão expostos ao ar livre directamente sob a radiação solar. O trabalho consiste na medição dos valores a cada minuto e no armazenamento dos dados, sendo depois disponibilizados numa página da internet.

O estudo consiste na monitorização dos parâmetros eléctricos (variáveis de saída), e nos parâmetros ambientais (variáveis de entrada) dos sistemas fotovoltaicos, como ilustra a figura 2.5.

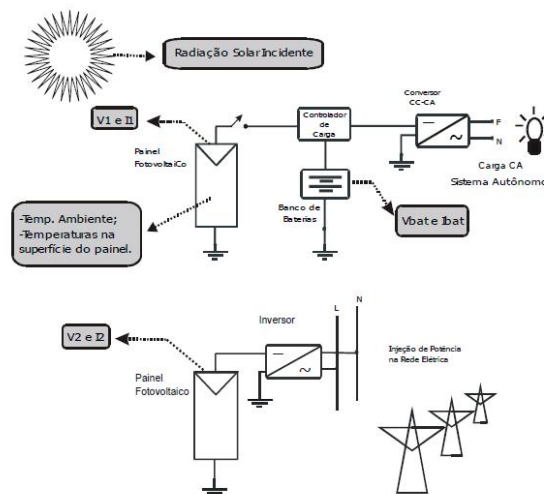


Figura 2.5: Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico [6]

É utilizado um sensor adequado para medir o valor de cada parâmetro, devolvendo um sinal referente a cada um. Esse sinal passa por um circuito condicionador de sinal, colocando-o em condições de ser lido pela placa de aquisição de dados. Em seguida, os sinais são tratados e armazenados por um programa. Depois de armazenados, os dados são colocados numa página da internet para visualização.

Para a aquisição dos valores dos parâmetros ambientais instalou-se, no painel, um sensor para medir a irradiância (piranómetro) e quatro sensores para medir a temperatura (díodos), colocando um na parte frontal do painel (exposta ao sol) e os restantes três na parte de trás do painel. No sistema isolado foram instalados, um sensor de corrente e um sensor de tensão, tanto no painel como no banco de baterias. No sistema interligado à rede eléctrica colocou-se

um sensor de corrente e um sensor de tensão no painel.

O sistema proposto divide-se em duas componentes: a bancada de aquisição de dados e os circuitos colocados no topo do edifício. A bancada de aquisição de dados contempla uma fonte de tensão simétrica de 12V, os circuitos para a medição dos parâmetros eléctricos (tensão e corrente) e um computador destinado ao armazenamento de dados. Os circuitos colocados no topo do edifício consistem no painel fotovoltaico e nos sensores para a medição dos parâmetros ambientais (irradiância e temperatura), que são posteriormente enviados para a bancada de aquisição de dados para tratamento e armazenamento.

Para o tratamento dos dados, foi desenvolvido um software em Turbo Pascal for Windows que recebe os dados directos da placa de aquisição de dados. É este software que controla todo o processo desde o início, passando pela aquisição dos dados, tratamento, armazenamento, e visualização na página da internet.

Yingying Kuai [7], apresenta uma proposta de monitorização das curvas características I-V e P-V de um painel fotovoltaico. O trabalho apresenta uma carga electrónica (MOSFET) para testar um conjunto de painéis fotovoltaicos.

A figura 2.6 ilustra o esquema utilizado para a representação das curvas características corrente/tensão e potência/tensão. No esquema é utilizado um divisor de tensão para ser possível a sua visualização nos osciloscópios. Neste sistema deverá ainda ser implementado o controlo de MOSFET para que a curva possa ser "varrida".

Com este sistema é possível testar painéis fotovoltaicos em qualquer lugar, bastando para isso dispor de um osciloscópio (para visualização das curvas) e do esquema com todos os seus componentes implementados, como representa a figura 2.6.

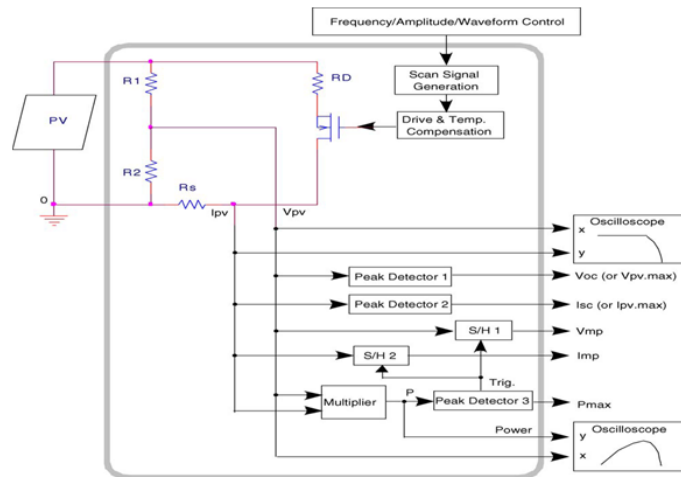


Figura 2.6: Sistema para aquisição das características de um painel fotovoltaico [7]

As propostas apresentadas pelos diversos autores anteriormente descritas podem dividir-se em dois grupos. No primeiro grupo os sistemas são simples e de fácil implementação ([2, 3]) e no segundo grupo, os sistemas apresentam alguma complexidade e com recursos que merecem alguma perícia por parte do projectista para a sua implementação ([4, 5, 6, 7]).

Para uma melhor visualização e comparação dos trabalhos apresentados, apresenta-se em seguida uma tabela com as características mais importantes de cada um.

Tabela 2.1: Diferenças entre as diversas soluções descritas

Características	Sistemas propostos				
	Fundação Calitro	Santos	Prieb e Heckethrue	André Caravalho	Yingying Kuai
Esquema	Simples	Simples	Complexo	Complexo	Complexo
Complexidade de Implementação	Simples	Simples	Complexo	Complexo	Complexo
Utilização	Complexo	Complexo	Simples	Simples	Complexo
Dados adquiridos	Corrente, tensão	Corrente, tensão	Corrente, tensão, temperatura, irradiância	Corrente, tensão, temperatura, irradiância	Corrente, tensão
Variação de carga	Manual	Manual	Automática	Automática	Automática
Possibilidade de erros de leitura	Sim	Sim	Não	Não	Não
Aquisição de dados	Manual	Manual	Automática	Automática	Manual
Tratamento de Dados (software)	Não	Não	Sim	Sim	Não
Realização dos testes	Laboratório	Laboratório	Condições reais	Condições reais	Condições reais
Custos de equipamentos	Baixo	Baixo	Elevado	Médio	Baixo

Em seguida, descreve-se de forma sucinta o significado de cada característica, para uma melhor percepção do teor exibido na tabela anterior:

- **Esquema** - uma análise sobre a concepção do sistema a implementar;
- **Complexidade de implementação** - saber se é simples ou complexa a implementação apresentada em cada solução;
- **Utilização** - manuseamento do circuito depois de concebido;
- **Dados adquiridos** - que tipo de dados são analisados em cada solução;
- **Variação da carga** - a variação da carga para a obtenção dos valores de corrente e

tensão é realizada manualmente (variação de uma resistência ou potenciômetro) ou é realizada automaticamente, através de uma fonte de tensão controlada por computador;

- **Possibilidade de erros na leitura dos dados** - existe a possibilidade de, no processo de aquisição dos dados, ocorrerem erros de leitura;
- **Aquisição de dados** - a aquisição dos dados é realizada manualmente (leitura através de um multímetro e registo numa tabela) ou realizada automaticamente, através de um computador;
- **Tratamento de dados** - após a aquisição dos dados, a solução dispõe de um software para a análise e visualização;
- **Realização de teste** - descreve como os testes são realizados, ou em laboratório ou em condições reais, com o painel exposto à radiação solar;
- **Custos de equipamentos** - preço total da solução apresentada.

2.1 Contribuição da dissertação

Esta dissertação propõe um protótipo e uma aplicação que permite a visualização da curva característica I-V.

O protótipo desenvolvido é constituído por um painel fotovoltaico, um MOSFET para simular a carga e uma placa de aquisição de dados para transmitir os dados para o computador. No computador desenvolveu-se uma aplicação em MATLAB, para visualizar os resultados.

Da interligação do protótipo com a aplicação resultou num sistema para aquisição da curva característica I-V. Este sistema permite caracterizar um painel fotovoltaico em qualquer ambiente real, devido à sua portabilidade e fácil utilização.

Importa referir que a aplicação desenvolvida nesta dissertação permite uma fácil interpretação dos resultados obtidos bem como, a visualização do resultado teórico ideal consoante as circunstâncias reais dos testes através da inserção dos valores característicos.

Em termos conclusivos, esta dissertação contribui para uma melhor avaliação do desempenho de painéis fotovoltaicos, recorrendo a um sistema constituído por componentes de baixo custo.

Capítulo 3

Energia Solar Fotovoltaica

3.1 A Radiação Solar

O sol é imprescindível para a existência e manutenção de seres vivos e da natureza no planeta: é a nossa fonte de energia. Caracteriza-se por ser um recurso constante e imensurável, podendo-se dizer que é praticamente inesgotável, fornecendo anualmente 10.000 vezes o consumo mundial de energia (avaliada em $1,5 \times 10^{18}$ KWh) [8].

A superfície terrestre recebe constantemente radiação solar, cuja distribuição é alterada à medida que passa através das nuvens, vapor de água, gases, poeiras e vegetação. A radiação solar, após atravessar a atmosfera, atinge a superfície terrestre de três formas distintas:

- Radiação directa - atinge directamente a superfície terrestre;
- Radiação difusa - desviada em diferentes direcções pelos componentes da atmosfera;
- Radiação reflectida - reflectida pelo solo e objectos circundantes.

As três formas de radiação solar que atingem a superfície terrestre, a directa, a difusa e a reflectida encontram-se exemplificadas a vermelho, verde e amarelo respectivamente na figura 3.1. A restante radiação solar existente é absorvida ou reflectida para fora da atmosfera pelos vários elementos da atmosfera também exemplificado na figura 3.1 [1].

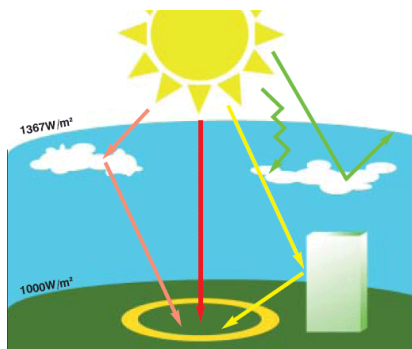


Figura 3.1: Distribuição da radiação solar, Fonte: <http://www.energiasrenovaveis.com/>

O movimento da Terra em torno do Sol, descreve uma trajectória elíptica com inclinação aproximadamente de $23,5^\circ$ em relação ao plano equatorial. Devido à inclinação, cada hemisfério recebe diferentes quantidades de energia, que associadas à translação da terra determinam as estações do ano: Primavera, Verão, Outono e Inverno [1].

Os movimentos efectuados pela Terra são o de rotação e o de translação. A rotação é o movimento que a Terra faz em torno do seu eixo e a translação é o movimento que a Terra realiza em torno do sol. Devido ao formato e movimento da Terra, o aproveitamento da energia solar fotovoltaica está directamente dependente da orientação e inclinação dos painéis. Estes factores devem ser analisados para cada aplicação [9].

Uma vez que a produção de energia depende da radiação solar que incide nos painéis, estes deverão estar orientados de forma a receberem a maior exposição solar possível ao longo do ano [1]. No caso da inclinação, depende da sua aplicação. Para sistemas isolados é necessário maximizar a produção de energia em alturas de menor radiação, necessitando de um ângulo de inclinação maior. Para sistemas ligados à rede, em que o objectivo é maximizar a produção anual de energia, é necessário de um ângulo menor [1, 9].

3.2 Contexto Histórico

Os principais momentos da história das células fotovoltaicas:

- 1839** : Edmond Becquerel, descobriu o efeito fotovoltaico;
- 1873** : Willoughby Smith descobriu o efeito fotovoltaico num material semi-condutor (selénio);
- 1876** : Adams e Days detectaram o efeito fotovoltaico no selénio e constroem a primeira célula fotovoltaica com rendimento estimado de 1%;
- 1883** : Charles Fritts, descreveu as primeiras células constituídas a partir de junções de selénio;
- 1905** : Albert Einstein, propôs a ideia dos "Quanta de Luz"(os actuais fótons) e mostrou como poderiam ser utilizados para explicar fenómenos como o efeito fotovoltaico;
- 1954** : Anunciada a primeira célula fotovoltaica utilizando silício, produzida nos laboratórios Bell;
- 1958** : Primeiras aplicações espaciais, satélites Vanguard e Explorer;
- 1959** : Primeiras células de silício multicristalino;
- 1976** : Primeiras células de silício amorfo;
- 1990** : A década de 90 é marcada pelo aparecimento das células de película fina;
- 2004** : Os cinco fabricantes (Sharp, Kyocera, Shell Solar, Bp Solar e RWE SHOTT SOLAR) formam 60% do mercado fotovoltaico;
- 2007** : Investigadores da Universidade de Delaware, Estados Unidos, desenvolvem célula fotovoltaica com rendimento de 42,8%.

Em 1839, Alexander Edmond Becquerel, físico francês descobriu o efeito fotovoltaico. Mas só em 1883 por Charles Fritts, foi produzida a primeira célula fotovoltaica utilizando selénio, a característica de fotocondutividade deste material foi descoberta por Smith em 1983 [10].

A célula de selénio apresentava um rendimento inferior a 1%, mas com a evolução científica do início do século XX, e em 1905 a teoria de Albert Einstein sobre o efeito fotovoltaico, referia que a mecânica quântica com a teoria das bandas de energia, física dos condutores com

os processos de purificação e dopagem aplicadas aos transmissores [11].

A primeira geração de células fotovoltaicas teve início em 1954 quando os laboratórios Bell, através de testes a materiais semicondutores, descobriram acidentalmente que o silício dopado era extremamente sensível à luz [10, 11].

Esta descoberta teve como resultado a produção da primeira célula com rendimento de 6%, o que levou os Estados Unidos da América em 1958 a adicionarem as primeiras células fotovoltaicas no seu satélite Explorer [11]. Esta nova geração de energia viabilizou o desenvolvimento e o lançamento de satélites de posicionamento global e comunicações, resultando num grande investimento na investigação e aperfeiçoamento das células fotovoltaicas.

Em 2007, investigadores da Universidade de Delaware nos Estados Unidos, conseguiram bater o recorde de eficiência energética de uma célula fotovoltaica (silício), atingindo um rendimento de 42,8% de conversão sobre condições normais de iluminação [12].

3.2.1 As Células Fotovoltaicas

A primeira geração de células fotovoltaicas consiste numa junção simples p-n de material cristalino capaz de produzir energia eléctrica a partir da luz solar [13].

A segunda geração de células fotovoltaicas, baseia-se no uso de pequenos depósitos de semicondutores em cada célula, existindo dois tipos: o espacial e o terrestre. As células espaciais têm maior rendimento (28% a 30% em laboratório) utilizadas apenas para satélites e estações espaciais devido ao seu elevado custo de produção. Por outro lado as células terrestres que têm um rendimento mais baixo (7% a 9% em laboratório) um custo de produção também mais baixo [14]. Esta tecnologia de células de segunda geração possibilitou a produção de módulos translúcidos, e maleáveis. Neste momento, estão em desenvolvimento as células denominadas de "células-finas" baseadas em Arsenieto de Gálio (GaAs), com uma eficiência superior a 37%, para serem utilizadas em aplicações que necessitem de elevada eficiência [13].

A terceira geração de células fotovoltaicas reside em propósitos diferentes das anteriores gerações baseadas em semicondutores. Para aplicações espaciais estão em desenvolvimento dispositivos à base de nanotubos de carbono, que têm uma eficiência prevista de 45%. Para utilizações terrestres também estão em desenvolvimento células solares de efeito fotoelectroquímico, à base de polímeros e de micro cristais [13].

Pondera-se o aparecimento de uma quarta geração, que permitirá uma maior eficiência e um menor custo, tendo por base uma mistura de polímeros e nanopartículas, criando uma camada multiespectro. Esta tecnologia é, actualmente, utilizada pela NASA nas viagens a Marte, estando em desenvolvimento para utilização terrestre num futuro próximo.

Actualmente o perfil de consumo mundial é diferente em utilizações terrestres e espaciais devido ao seu custo e rentabilidade. Cerca de 90% das aplicações de células fotovoltaicas em ambiente espacial é feita com células de 2ª geração sendo o restante utilizado de 1ª geração. Já o consumo terrestre tem nas células de silício a maior concentração 86% do mercado global actualmente.

3.3 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico consiste, na transformação de energia solar em energia eléctrica, ou seja, na transformação de energia que proporcionam os fotões (partículas de luz) incidentes sobre os materiais semicondutores, em electricidade. De entre os materiais mais utilizados destaca-se o silício, que produzem uma corrente eléctrica quando atingidos pela radiação luminosa.

Tudo começou com os átomos que absorvem os fotões (partículas de luz) e transferem a sua energia para os electrões, que assim se libertam e através de um campo eléctrico interno são conduzidos para os contactos, produzindo assim a corrente na célula fotovoltaica.

Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produz energia eléctrica. Para produzir energia eléctrica, é necessário que exista um campo eléctrico, ou seja, uma diferença de potencial entre as duas zonas da célula. A diferença de potencial numa célula fotovoltaica ocorre através do processo de dopagem do silício, que consiste na introdução de elementos estranhos com o objectivo de alterar as propriedades eléctricas do silício. A dopagem do silício cria na célula duas camadas, uma tipo p e outra tipo n, que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e negativas relativamente ao silício [15]. Partindo do silício puro, pode-se introduzir átomos de boro numa camada e átomos de fósforo na outra, formando o que se chama junção pn. O que ocorre na junção pn é que os átomos livres do lado n passam para o lado p onde encontram buracos que os apreendem. Estas cargas capturadas dão origem a um campo eléctrico permanente que dificulta a passagem dos electrões do lado n para o lado p. Se a junção pn for exposta a fotões ocorrerá a geração de pares electro-lacuna, gerando assim, uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial que se denomina de efeito fotovoltaico [14, 16].

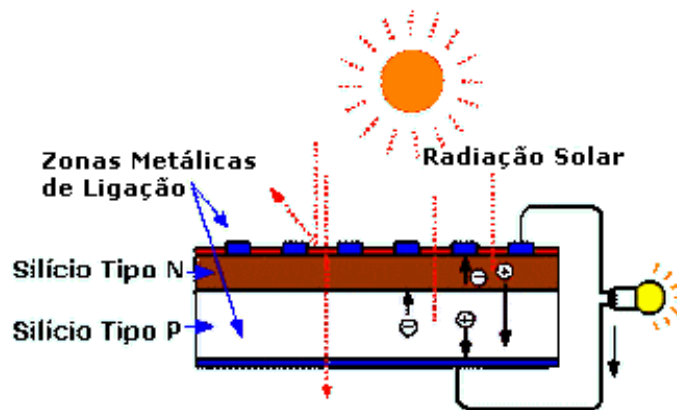


Figura 3.2: Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica, Fonte: <http://www.electronica-pt.com>

Em 1839, Edmond Becquerel descreve, o efeito fotovoltaico como sendo a diferença de potencial nos extremos de um material semiconductor. A primeira célula fotovoltaica foi construída em 1964 pelos laboratórios Bell e tinha a fisionomia indicada na figura 3.2 [1].

As células fotovoltaicas podem ser ligadas em série, constituindo um módulo que exibe normalmente aos seus terminais uma tensão contínua de 12 V. Por sua vez, os módulos podem ser ligados em série/paralelo para aumentar a potência do conjunto, constituindo o painel

fotovoltaico, como mostra a figura 3.3. O silício deteriora-se ao longo do tempo, sobretudo o silício amorfo, pese embora, os fabricantes garantam tempos de vida útil na ordem dos 20 anos para os painéis.

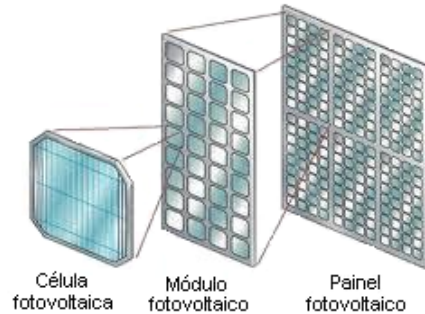


Figura 3.3: Desenvolvimento de um painel fotovoltaico, Fonte: Adaptada de <http://www.aros.it/>

Desde as suas primeiras aplicações, na década de 50, estes sistemas têm evoluído bastante, o que tem proporcionado uma diminuição do seu custo de produção e uma inserção cada vez maior no mercado da energia. O custo da energia fornecida por estes sistemas é relativamente baixo, afirmando-se como uma potencial solução para os consumidores domésticos em regiões rurais isoladas (sem rede eléctrica).

3.4 Tipos de Células Fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica tem como propósito converter a energia proveniente do sol em energia eléctrica. Esta conversão realiza-se através do efeito fotovoltaico. Existem três tipos de células fotovoltaicas mais comuns, as de silício com cristais monocristalinos, com cristais policristalinos e as de silício amorfo.

- **Silício monocristalino** - A célula de silício monocristalino é histórica e comercialmente a mais utilizada na composição de painéis fotovoltaicos. A uniformidade da estrutura molecular resulta da utilização de um cristal único, o que é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. O rendimento máximo atingido em laboratório ronda os 24%, o qual em utilização prática se reduz para cerca de 15%. A produção de silício cristalino é cara. Atingindo cerca de 60% do mercado [14, 16, 17].
- **Silício policristalino** - A célula de silício policristalino é constituída por um número elevado de pequenos cristais da espessura milimétrica. Por este motivo os rendimentos em laboratório e em utilização prática não excedem os 18% e 12%, respectivamente. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício monocristalino. A utilização desta célula representa uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de electrões e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída [14, 16, 17].
- **Silício amorfo** - O silício amorfo absorve a radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma fina película de silício amorfo sobre um substrato (metal, vidro, plástico). Este processo de fabrico é

ainda mais barato do que o silício policristalino. Em laboratório é possível obter rendimentos na ordem dos 13%, mas as propriedades conversoras do material deterioram-se na utilização prática, pelo que os rendimentos descem para cerca de 6%. Os equipamentos solares (calculadoras, relógios, entre outros) são habitualmente compostos com células de silício amorfo, representando cerca de 4% do mercado [14, 16, 17].

A figura 3.4 mostra o aspecto das células fotovoltaicas de silício.

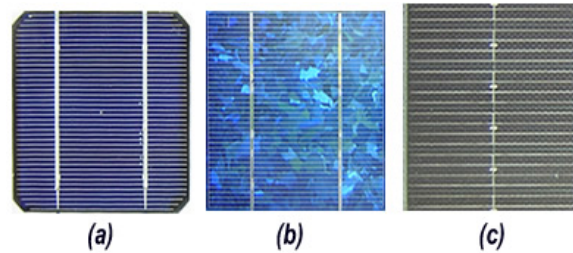


Figura 3.4: Os diferentes tipos de células de silício, (a)- monocristalina, (b)-policristalino, (c)- amorfo, Fonte: <http://www.domus-solaris.com/index.php?pg=16>

Na tabela 3.1 observa-se uma comparação ao nível de rendimento dos 3 tipos de células fotovoltaicas.

Tabela 3.1: Rendimento das diferentes células fotovoltaicas

Células	Rendimenno		
	Rendimento típico	Máximo rendimento em aplicações	Máximo rendimento em laboratório
Monocristalinas	12-15%	22.7 %	24%
Policristalinas	11-14%	15.3%	18.6%
Silício amorfo	6-7%	10.2%	12.7%

Pela tabela pode-se concluir que as células monocristalinas apresentam maior rendimento, embora representem 60% do mercado tem um custo de produção elevado. As células policristalinas e de silício amorfo apresentam rendimentos inferiores mas custos de produção também inferiores.

3.5 Formas de Conexão de um Painei Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é constituído por inúmeras células fotovoltaicas. A conexão das células dentro dos módulos pode ser feita em série ou em paralelo ou então, em conexão mista. Os módulos fotovoltaicos são conectados de modo a proporcionarem a tensão e corrente necessárias. Assim, quando é necessário uma tensão elevada, agrupa-se as células em série. E

quando se deseja uma corrente elevada, as células são agrupadas em paralelo. É também possível uma conexão mista, ou seja, em série e paralelo, simultaneamente [1, 14].

Quando existir uma ligação em série entre módulos e se um dos módulos dentro do sistema for encoberto por uma sombra, a potência do sistema cairá. Uma forma de resolver esta situação é usar um diodo de "bypass" para cada módulo (figura 3.5 a), assim, a corrente do sistema não se limitará à corrente do módulo encoberto. Este diodo serve de caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor do módulo. Geralmente o uso do diodo de "bypass" é feito no módulo, o que torna os sistemas mais baratos, comparando com uma conexão do diodo a cada célula [16].

Outro problema que pode surgir, é uma corrente negativa circular pelas células, ou seja, em vez do módulo produzir corrente, passa a receber mais do que produz. Esta corrente pode causar diminuição na eficiência das células e, em casos mais drásticos, a célula pode ser separada do sistema provocando a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar este tipo de problemas, pode se usar um diodo de bloqueio, que impede as correntes reversas de circularem pelo sistema, como ilustra a figura 3.5 b) [16].

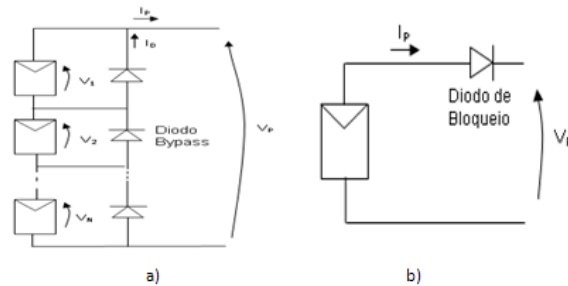


Figura 3.5: a) diodo bypass e b) diodo de bloqueio

3.6 Características de um Painel Fotovoltaico

3.6.1 Curva Característica I-V

Para a análise do desempenho elétrico de um módulo fotovoltaico é imprescindível o estudo da curva que relaciona a tensão com a corrente. Esta curva, denominada curva característica I-V apresenta a mesma forma para qualquer painel fotovoltaico nas condições STC (Standard Test Conditions, irradiância de $1000W/m^2$ e temperatura $25^{\circ}C$), como está ilustrado na figura 3.6 [18].

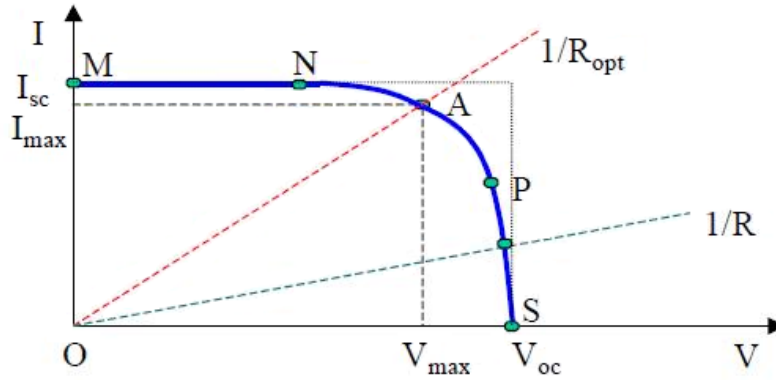


Figura 3.6: Curva I-V de um painel fotovoltaico [19]

Na representação da curva característica I-V considera-se que o painel está a produzir uma corrente positiva, quando recebe radiação solar, ou seja, o sol está a brilhar, e é aplicada uma tensão positiva nos terminais do mesmo.

Se os terminais do painel estiverem conectados a uma resistência variável R , o ponto de operação é determinado pela intersecção da curva característica I-V do painel fotovoltaico com a recta de carga como ilustra a figura 3.6. Para uma carga resistiva, a característica de carga é uma linha recta com inclinação $I/V = 1/R$ [19, 20]. Deve-se salientar que a potência entregue à carga depende unicamente do valor da resistência. O funcionamento de um painel fotovoltaico pode ser de dois tipos. Se estiver na zona entre os pontos MN da curva e para um R pequeno, o painel é considerado como uma fonte de corrente constante, sendo o valor da corrente igual ao da corrente de curto-circuito I_{SC} . Se estiver na zona entre os pontos PS da curva com um R elevado, o seu comportamento é como uma fonte de tensão constante e o valor da tensão é igual ao valor da tensão em circuito aberto V_{OC} . O painel transfere a potência máxima na zona entre os pontos NP, e é no ponto de coordenadas I_{max} e V_{max} que o sistema disponibiliza a potência máxima [19, 20].

Ainda no seguimento da figura 3.6, um painel fotovoltaico pode ser caracterizado pelos seguintes parâmetros fundamentais [19, 20]:

- **Corrente de curto-circuito** (I_{sc}) - corrente máxima que um dispositivo pode produzir, correspondendo a tensão nula e consequentemente potência nula.
- **Tensão de circuito-aberto** (V_{oc}) - tensão máxima que um dispositivo pode produzir correspondendo a corrente nula e consequentemente potência nula.
- **Ponto de potência máxima** (P_{max}) - é o valor máximo de potência que um dispositivo pode produzir. Corresponde ao ponto em que a curva P-V tem o seu valor máximo.
- **Corrente no ponto de máxima potência** (I_{max}) - é o valor da corrente para a potência máxima.
- **Tensão no ponto de máxima potência** (V_{max}) - é valor da tensão para a potência máxima.

3.6.2 Ponto de Potência Máxima

O ponto de potência máxima é o ponto de funcionamento óptimo, sendo este o ponto desejado para o funcionamento do painel. Mesmo no ponto de funcionamento óptimo, o painel também é influenciado por condições ambientais, mais concretamente pela temperatura e incidência da radiação solar [30].

A figura 3.7 representa a curva característica potência versus tensão de um painel fotovoltaico.

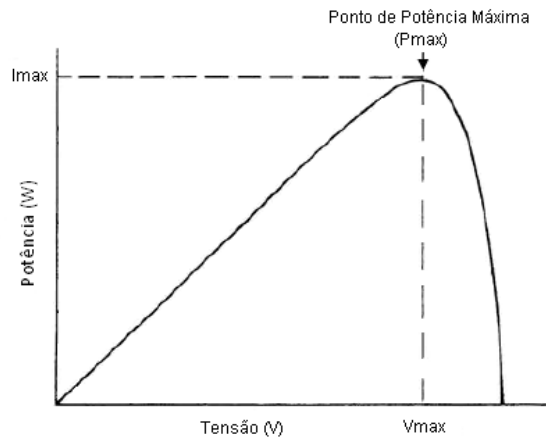


Figura 3.7: Curva P-V de um painel fotovoltaico Fonte: adaptado [1]

No caso da radiação solar, uma mudança na intensidade da radiação resulta numa variação na corrente de saída para qualquer valor de tensão. A corrente varia com a radiação de forma directamente proporcional. A tensão mantém-se praticamente constante, conforme se conclui a partir da figura 3.8.

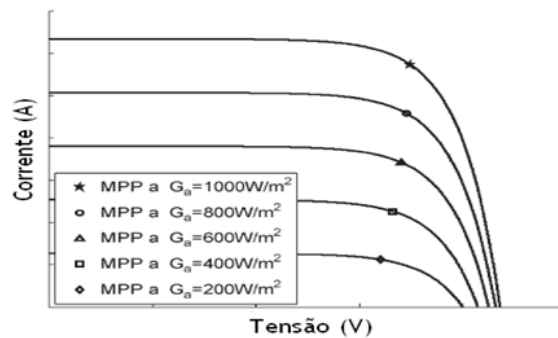


Figura 3.8: Alteração da curva I-V com incidência da radiação solar [30]

Como se pode verificar na figura 3.8, o valor da corrente diminui com a diminuição do valor da radiação. O mesmo acontece com o ponto de potência máxima (P_{max}) que também vai diminuir com a diminuição da radiação [30].

No caso da temperatura, uma mudança na temperatura resulta numa variação na tensão

de saída para qualquer valor de corrente. A tensão varia com a temperatura de forma diretamente proporcional, como se constata na figura 3.9.

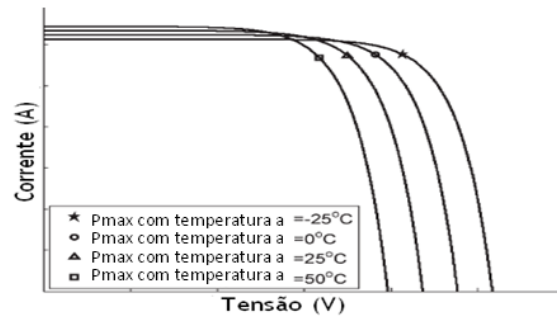


Figura 3.9: Alteração da curva I-V com a variação da temperatura [30]

Ao observar a figura 3.9, o valor da tensão diminui com o aumento da temperatura e o ponto de potência máxima (P_{max}) também se altera (diminui) com o aumento da temperatura.

Seguindo o mesmo pensamento, é necessário manter o ponto de funcionamento próximo do ponto de potência máxima (P_{max}) de maneira a garantir a máxima eficiência do painel. A potência é igualmente afectada pelas condições ambientais, pois a potência é expressa por $P = V \cdot I$, como se apresenta na figura 3.10, para variações de temperatura [30].

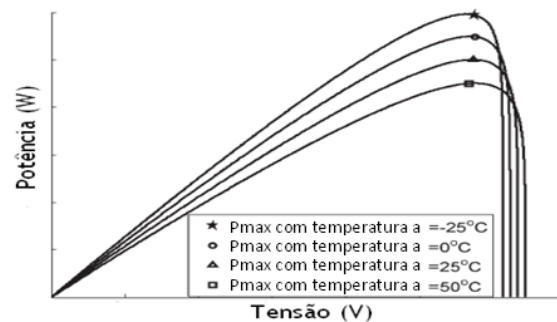


Figura 3.10: Alteração da curva P-V com a variação da temperatura [30]

3.7 Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas ligados à rede ou sistemas isolados. Os sistemas são compostos por um conjunto de painéis fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos complementares: baterias (armazenamento de energia), regulador de carga (unidade de controlo de potência) e inversor. Estes componentes variam de acordo com a aplicação do sistema fotovoltaico.

3.7.1 Sistemas Interligados à Rede

Um outro modo de utilizar a energia fotovoltaica, consiste num sistema de energia interligado à rede que actua como uma fonte de energia auxiliar. Os sistemas interligados à rede podem ser centralizados ou distribuídos.

Os sistemas centralizados fornecem exclusivamente energia à rede e os sistemas distribuídos para além da energia entregue à rede fornecem também energia a cargas. Este sistema utiliza um elevado número de painéis fotovoltaicos e não armazena energia, pois toda a energia produzida é entregue à rede e para consumo próprio. Todo o sistema é interligado a inversores, que servem de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as grandezas eléctricas em corrente contínua (DC) gerada pelo painel com a corrente alternada (AC) existente na rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afectada [1, 14].

Os sistemas interligados com a rede vêm aumentar a capacidade de rentabilização da utilização de energia dos países industrializados. Com as medidas da União Europeia em relação à produção de energia através de energias alternativas, estes sistemas podem ser um incentivo ao investimento de particulares, com algumas vantagens oferecidas pelos governos, com se verifica em Portugal e em alguns países da União Europeia.

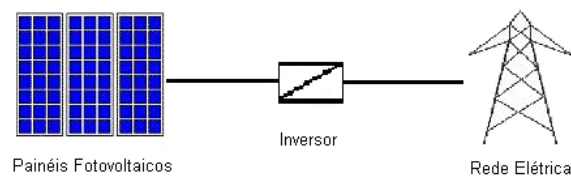


Figura 3.11: Configuração básica de um sistema interligado à rede eléctrica (centralizado)

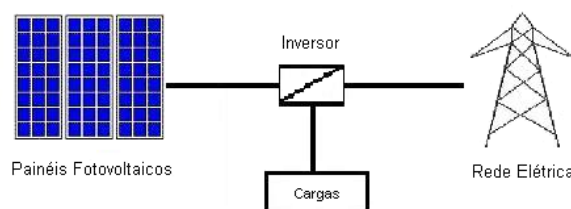


Figura 3.12: Configuração básica de um sistema interligado à rede eléctrica (distribuído)

3.7.2 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados constituíram o primeiro campo de operação económica da tecnologia fotovoltaica. A aplicação deste tipo de sistemas, observa-se em regiões onde o fornecimento de energia eléctrica através da rede pública, não se verifica por razões técnicas e/ou económicas. Nestes casos, os sistemas fotovoltaicos podem constituir alternativas com uma vertente

económica de elevado interesse.

Na prática, os sistemas isolados precisam de armazenar energia, para compensar as diferenças entre a produção de energia e a procura de energia, para o funcionamento de equipamentos como luzes, bombas de água, semáforos, entre outros. As baterias recarregáveis são apropriadas para a acumulação de energia [1, 14].

No caso de um sistema isolado em que o armazenamento da energia produzida é feito por baterias, é necessário que o sistema disponha de:

- **Baterias** - de modo a assegurar o abastecimento nos períodos em que o recurso é insuficiente ou não está disponível. As baterias são carregadas quando o recurso disponível permite obter uma potência superior à potência de carga.
- **Regulador de carga** - tem como principal função não deixar que ocorram danos nas baterias por sobrecarga ou descarga total.
- **Inversor** - quando existir a necessidade de alimentar equipamentos que funcionem em corrente alternada.

Os sistemas isolados, encontram grandes oportunidades de mercado em países em desenvolvimento, onde existem vastas zonas de fornecimento de energia eléctrica. As sucessivas evoluções tecnológicas e a diminuição dos custos de produção nos países industrializados, poderão também contribuir para a generalização deste tipo de aplicação.

Este tipo de sistemas também pode ser aplicado em pequenos equipamentos nos quais só é preciso um painel de pequena dimensão para o fornecimento de energia eléctrica, podendo observar-se, por exemplo, em calculadoras, relógios, carregadores de pilhas ou baterias, lanternas e rádios.

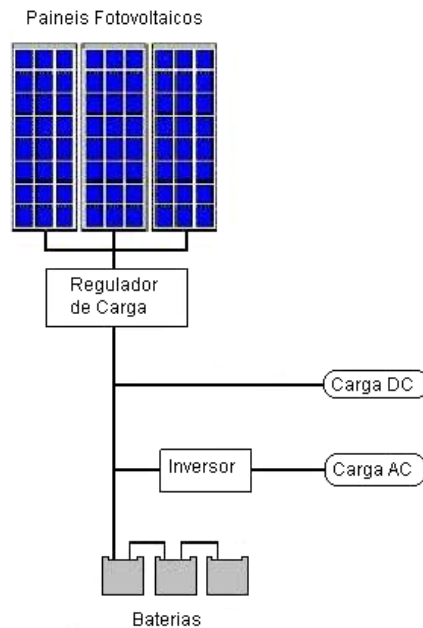


Figura 3.13: Configuração básica de um sistema isolado

Os sistemas fotovoltaicos podem ainda fazer parte de sistemas híbridos. Os sistemas híbridos não estão ligados à rede eléctrica mas apresentam várias fontes de geração de energia, como por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, biomassa e painéis fotovoltaicos, podendo estar interligados num único sistema. A utilização de várias fontes de geração de energia eléctrica torna complexo o processo de controlo para uma máxima eficiência na entrega da energia [1, 14].

Em geral, os sistemas híbridos são implementados para sistemas de média a grande dimensão, de forma a contemplar um maior número de utilizadores. Devido à grande complexidade dos sistemas e multiplicidades de opções, para maximizar um sistema é necessário um estudo personalizado para cada caso.

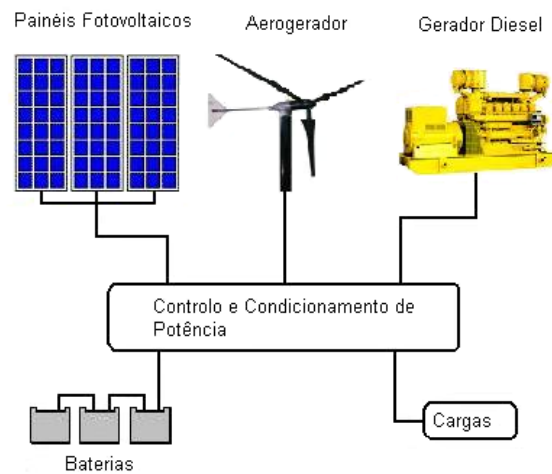


Figura 3.14: Configuração básica de um sistema híbrido

Capítulo 4

Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico

A caracterização automática de uma célula fotovoltaica, consiste na construção da curva I-V. Os parâmetros que habitualmente são utilizados para caracterizar são a corrente em curto-circuito, a tensão em circuito aberto e o ponto de potência máxima.

4.1 Modelo Eléctrico de uma Célula Fotovoltaica

O conhecimento do modelo matemático de uma célula fotovoltaica e conseqüentemente de um módulo fotovoltaico é essencial para o melhor entendimento do comportamento de um sistema de painéis sob diferentes condições de operação.

O circuito simplificado de uma célula fotovoltaica é constituído por uma fonte de corrente e um díodo. Este modelo pode ser considerado com uma aproximação ideal do seu funcionamento uma vez que não possui as resistências associadas aos elementos parasitas [4, 15, 22, 23].

A figura 4.1 ilustra o circuito simplificado.

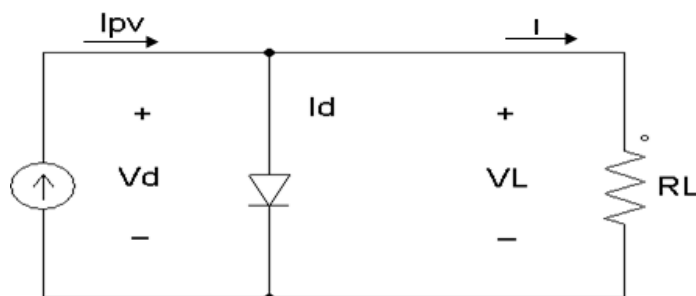


Figura 4.1: Modelo simplificado de uma célula fotovoltaica

Ao observar a figura 4.1, reparamos que o circuito é constituído por uma fonte de corrente, que representa a corrente eléctrica I_{pv} , gerada pelo feixe de radiação luminosa ao atingir a superfície activa da célula (efeito fotovoltaico), enquanto I_d é a corrente que circula através do díodo. Aplicando a lei de Kirchoff ao circuito, podemos concluir que, a corrente I que a célula é capaz de entregar à carga é a diferença entre a corrente I_{pv} e a corrente I_d , expresso na equação 4.1:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (4.1)$$

A corrente que flui através do díodo, em função da tensão, pode ser escrita pela equação 4.2:

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{V_D}{m \cdot V_T}\right] - 1 \right\} \quad (4.2)$$

Ao que corresponde:

- I_0 - corrente inversa de saturação do díodo;
- V_D - tensão aplicada aos terminais do díodo;
- m - factor de idealidade do díodo (ideal $m = 1$, real $m > 1$);
- V_T - designado por potencial térmico $V_T = \frac{KT}{q}$;
 - K - representa a constante de Boltzmann ($K = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
 - T - temperatura absoluta da célula em K ($K = 273,16 + C^\circ$);
 - q - carga eléctrica do electrão ($q = 1,6 \times 10^{-19}$ C).

Atendendo a que $V_T = \frac{K \cdot T}{q}$, podemos substituir na equação 4.2 e obtem-se:

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q}{m \cdot k \cdot T} \cdot V_D\right] - 1 \right\} \quad (4.3)$$

Substituindo a equação da corrente do díodo 4.3 na equação 4.1, resulta na corrente produzida pela célula fotovoltaica:

$$I = I_{pv} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q}{m \cdot k \cdot T} \cdot V_D\right] - 1 \right\} \quad (4.4)$$

4.1.1 Pontos de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica

Existem dois pontos de operação da célula que merecem atenção, o ponto de curto-circuito e o ponto de circuito aberto.

O ponto de curto-circuito é o valor máximo da corrente, igual, portanto, à corrente gerada pelo efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de irradiância e temperatura (STC) [24]. Onde:

$$\begin{aligned} V &= 0; \\ I_d &= 0; \\ I &= I_{pv} = I_{sc}; \end{aligned} \quad (4.5)$$

O ponto de circuito aberto é o valor máximo de tensão nos terminais da célula. O seu valor é fornecido pelo fabricante para determinadas condições de irradiância e temperatura (STC) [24]. Onde:

$$\begin{aligned} I &= 0; \\ V_{oc} &= m \cdot V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_{pv}}{I_0}\right); \end{aligned} \quad (4.6)$$

Este modelo não permite, contudo descrever correctamente o funcionamento da célula, dada a sua simplicidade. Assim, torna-se necessário incluir alguns elementos adicionais no modelo para se obter uma descrição mais completa, obtendo-se o modelo da figura 4.2 [4, 15, 22, 23, 25].

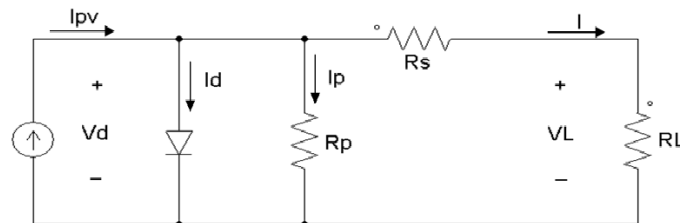


Figura 4.2: Esquema eléctrico de uma célula fotovoltaica

Neste circuito mais complexo que caracteriza uma célula fotovoltaica real, a resistência R_S representa a resistência dos contactos metálicos entre as células e entre o painel e a carga. A resistência R_P pode ser interpretada como uma resistência de fugas [15, 22, 23, 25].

Considerando agora, o esquema eléctrico da célula fotovoltaica representado na figura 4.2 e, aplicando as leis de Kirchoff novamente ao circuito, temos que a soma das correntes é dada por:

$$0 = I_{pv} - I_d - I_P - I \quad (4.7)$$

E, analisando o mesmo circuito, sabendo que a corrente I_d é a corrente que atravessa o díodo representada na equação 4.3 e que $V_D = V_L + I \cdot R_S$, pode-se deduzir a expressão de I_P :

$$I_P = \frac{V_D}{R_P} = \frac{V_L + I \cdot R_S}{R_P} \quad (4.8)$$

Substituindo 4.3 e 4.8 em 4.7 obtém-se a equação que descreve a corrente de saída:

$$I = I_{pv} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{m \cdot k \cdot T} \cdot (V_L + I \cdot R_S) \right] - 1 \right\} - \frac{V_L + I \cdot R_S}{R_P} \quad (4.9)$$

A equação anterior pode ser resolvida iterativamente, recorrendo a um método numérico, como Newton-Raphson. Este método será implementado em MATLAB [23, 25, 26, 27].

O valor das resistências R_S e R_P do modelo pode ser calculado através das relações que se seguem [23, 25]:

$$R_S = \frac{V_{OC} - V_{max}}{I_{max}} \quad (4.10)$$

$$R_P = \frac{V_{max}}{I_{SC} - I_{max}} \quad (4.11)$$

Em que,

- I_{SC} - corrente de curto-circuito (A)
- V_{OC} - tensão em circuito aberto (V)
- V_{max} - tensão no ponto de potência máxima (V)
- I_{max} - corrente no ponto de potência máxima (A)

O modelo acima descrito pode ser utilizado para a maioria das aplicações que envolvem células fotovoltaicas, representando uma caracterização do funcionamento.

4.2 Simulação do Circuito Elétrico

4.2.1 Simulação em PSIM

Para uma melhor compreensão do funcionamento de um painel fotovoltaico, utilizou-se o PSIM para simular o circuito da figura 4.2, software específico para a simulação de circuitos

de electrónica de potência [28].

Para simular o circuito eléctrico, dimensionou-se cada um dos componentes, utilizando os parâmetros característicos de um painel fotovoltaico BP MSX 110 representados na tabela 4.1 [29].

Tabela 4.1: Características do painel fotovoltaico BP MSX 110

Características	Valor
Número de células	72
Potência máxima (Pmax)	110 W
Tensão em potência máxima (V_{max})	32,9 V
Corrente em potência máxima (I_{max})	3,34 A
Corrente em curto-circuito (I_{CC})	3,69 A
Tensão em circuito aberto (V_{OC})	41,2 V
Coefficiente de Temperatura de I_{CC}	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}C$
Coefficiente de Temperatura de V_{OC}	$-(160 \pm 10)mV/^{\circ}C$
Coefficiente de Temperatura da potência	$-(0,5 \pm 0,05)\%/^{\circ}C$
Temperatura nominal de operação da célula	$47 \pm 2^{\circ}C$

Com as equações (4.10) e (4.11) é possível calcular o valor das resistências R_S e R_P , sendo os valores, respectivamente, $R_S = 2,485\Omega$ e $R_P = 117,719\Omega$. A tensão em circuito aberto define a queda de tensão no díodo, correspondendo a $V_D = 41,2V$. Colocando na fonte de corrente o valor correspondente à corrente de curto-circuito chega-se ao circuito eléctrico para simular a célula escolhida. Apresenta-se o esquema do circuito na figura 4.3.

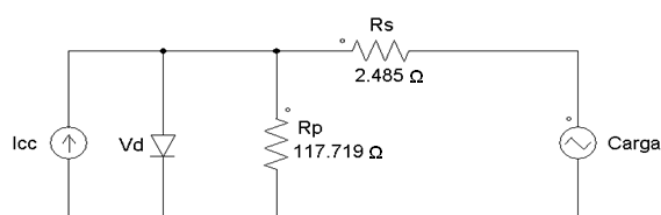


Figura 4.3: Circuito de simulação do modelo eléctrico de uma célula

A fonte de tensão triangular representada no esquema, foi utilizada como carga para permitir gerar na saída do circuito uma tensão que percorresse toda a gama de valores necessários ao estudo, ou seja, desde os 0V até ao 41,2V. Os resultados obtidos apresentam-se nas figuras 4.4 e 4.5.

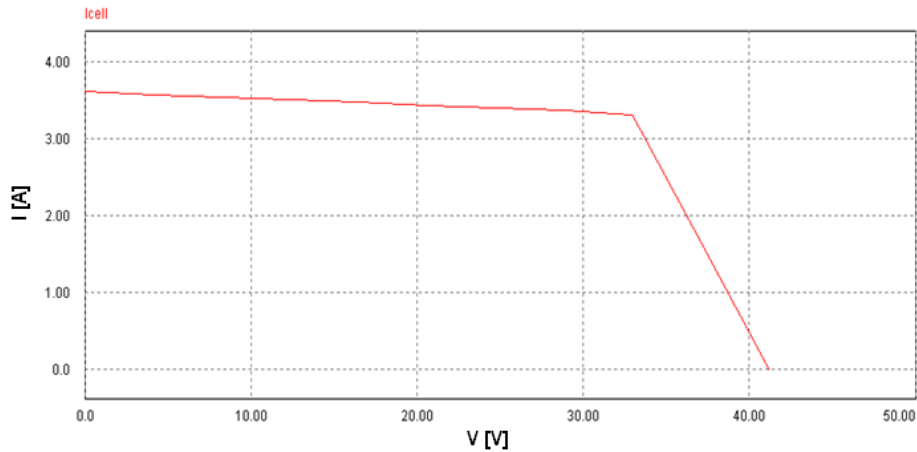


Figura 4.4: Curva I-V obtida com a simulação do circuito eléctrico

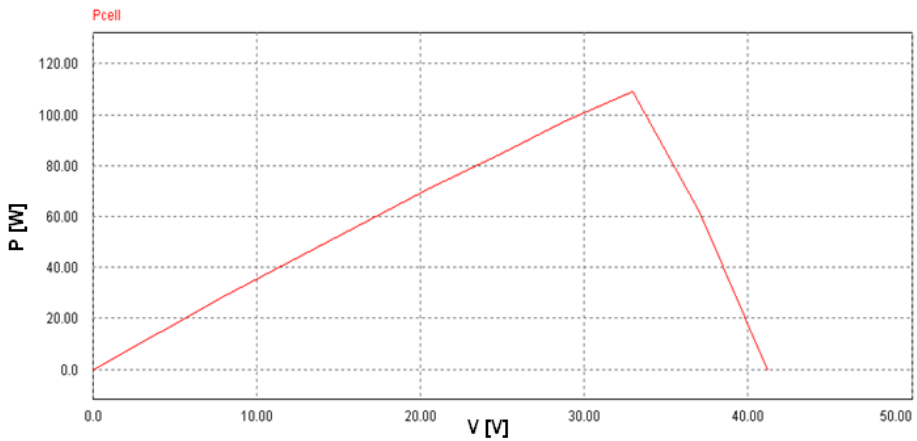


Figura 4.5: Curva P-V obtida com a simulação do circuito eléctrico

A análise das figuras 4.4 e 4.5, permite verificar que as curvas características são aproximadamente rectas. Esta aproximação deve-se ao facto de o programa utilizar componentes ideais na simulação.

Em PSIM não é possível visualizar a variação das curvas características em função da irradiância e da temperatura. Podendo-se dizer que a simulação do circuito eléctrico caracteriza de forma imperfeita o funcionamento de uma célula fotovoltaica. Pese embora ainda com estas incorrecções seja possível verificar algumas características do comportamento das células fotovoltaicas. Entre elas pode-se verificar as três zonas distintas da curva I-V como referido na secção 3.6.1. Verifica-se, ainda, a existência do ponto em que se transfere a potência máxima, sendo o seu valor de 109,88 W, o que corresponde ao valor fornecido pelo fabricante de 110 W.

Por esta razão optou-se por uma abordagem diferente que permita obter as curvas características das células em que sejam evidentes as não linearidades e ainda que permita verificar

a influência das condições climatéricas.

4.2.2 Simulação em MATLAB

Este modelo baseia-se na simulação das equações matemáticas que descrevem o funcionamento das células. Para a simulação do funcionamento de painel fotovoltaico recorreu-se a equações matemáticas, e foram criados dois casos em MATLAB. No primeiro caso, foram desenvolvidos três ficheiros para a simulação de um painel fotovoltaico, o primeiro ficheiro mostra a curva I-V e P-V para condições típicas, e os outros dois ficheiros mostram a variação das curvas I-V e P-V em função da temperatura e da irradiância. E, no segundo caso, desenvolveu-se um código que ajusta os valores de R_s e R_p para obter uma simulação mais perto do real, observando-se posteriormente a melhor solução para diferentes valores de temperatura e irradiância.

No primeiro caso foi desenvolvido um código, para a simulação do painel em condições típicas ($G = 1000W/m^2$ e $T = 25^\circ C$), e posteriormente para diferentes valores de temperatura e irradiância. Em seguida exemplificam-se as equações utilizadas no código desenvolvido.

As equações de Corrente de curto circuito (I_{sc}) e Tensão de circuito aberto (V_{oc}) dependem da temperatura e irradiância.

$$I_{sc} = I_{scst} * (1 + aI_{sc} * (temp - tempst)); \quad (4.12)$$

$$V_{oc} = Vocst + aV_{oc} * (temp - tempst); \quad (4.13)$$

A equação de corrente do painel varia com a corrente de curto-circuito e tensão em circuito aberto.

$$i = I_{sc} * (1 - exp((v - V_{oc})/(VT * ns))); \quad (4.14)$$

A potência é calculada através dos valores da corrente e tensão.

$$P = v * i; \quad (4.15)$$

O vector das tensões de saída (v) é composto pelo conjunto de valores de tensão de saída da célula. Este parâmetro tem como objectivo simular uma carga, ou seja, fazer com que a curva I-V percorra todos os pontos para uma representação correcta. O vector é criado com o comando $v = [0 : 0.1 : 41.5]$, que representa um vector com valores desde 0V até 41,5V com intervalos de 0,1V. A equação i representa os valores de corrente para cada valor de tensão criado pelo vector v . A figura 4.6 apresenta os passos seguidos na implementação do código.

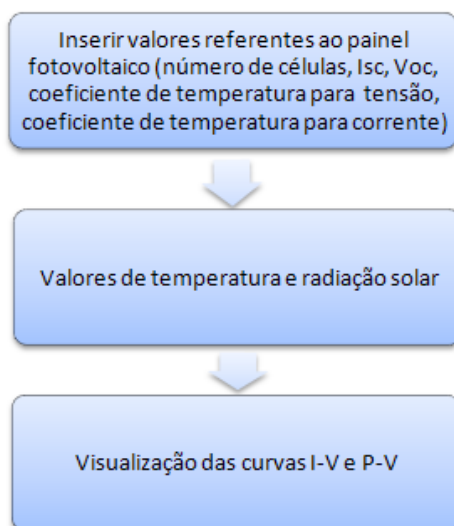


Figura 4.6: Fluxograma para simulação do ficheiro

Simulando o ficheiro desenvolvido segundo os parâmetros do fluxograma, obteve-se os resultados representados nas figuras seguintes.

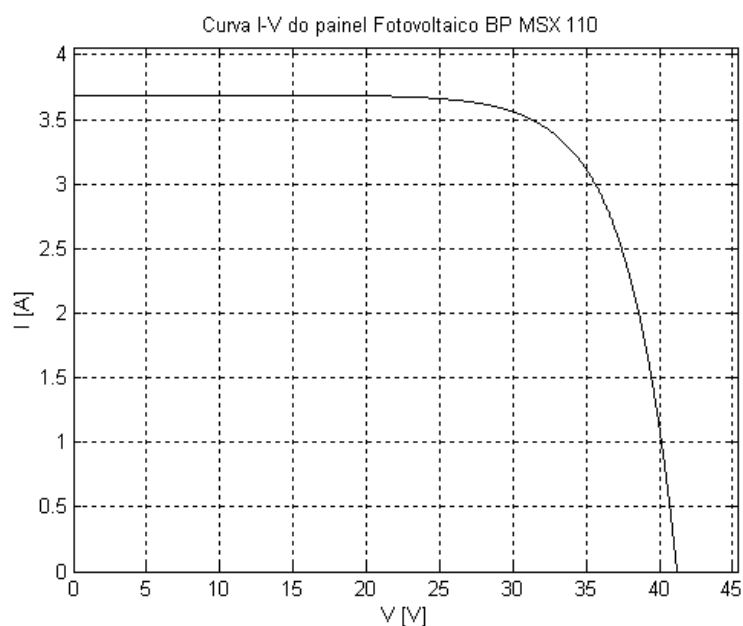


Figura 4.7: Curva I-V do painel BP MSX 110

A figura 4.7 apresenta a curva característica I-V de um painel fotovoltaico sob intensidade de irradiância constante de $1000W/m^2$ e uma temperatura de $25^{\circ}C$.

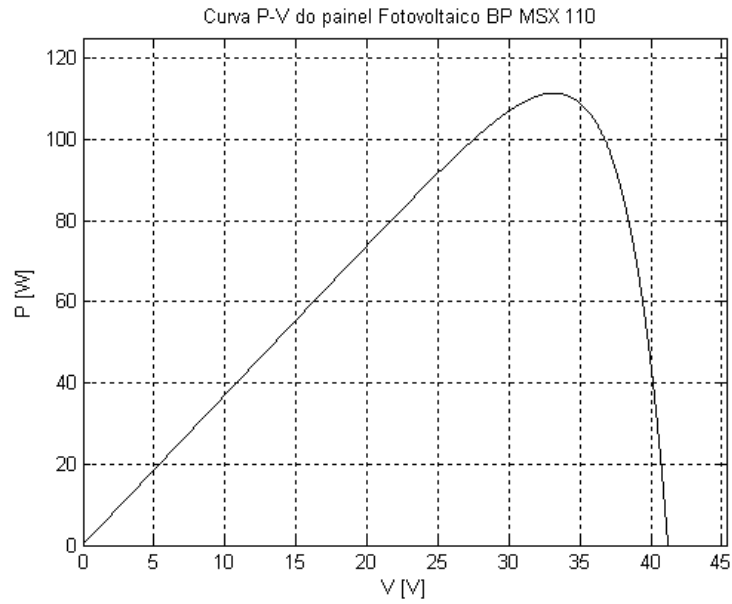


Figura 4.8: Curva P-V do painel BP MSX 110

Na figura 4.8 é apresentada a curva P-V e o ponto de potência máxima ($P_{max} = 109,88W$), considerando a irradiância constante a $1000W/m^2$ e uma temperatura de $25^{\circ}C$.

Em seguida representam-se as curvas I-V e P-V para diferentes valores de irradiância e temperatura.

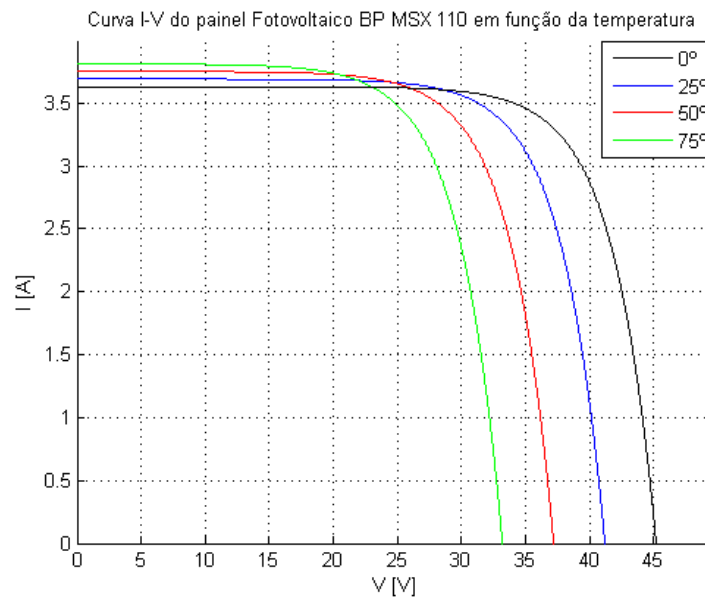


Figura 4.9: Curva I-V do painel BP MSX 110 em função da temperatura

Capítulo 4. Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico

A figura 4.9 apresenta a curva característica I-V de um painel fotovoltaico sob intensidade de irradiação constante ($1000W/m^2$) a diferentes temperaturas.

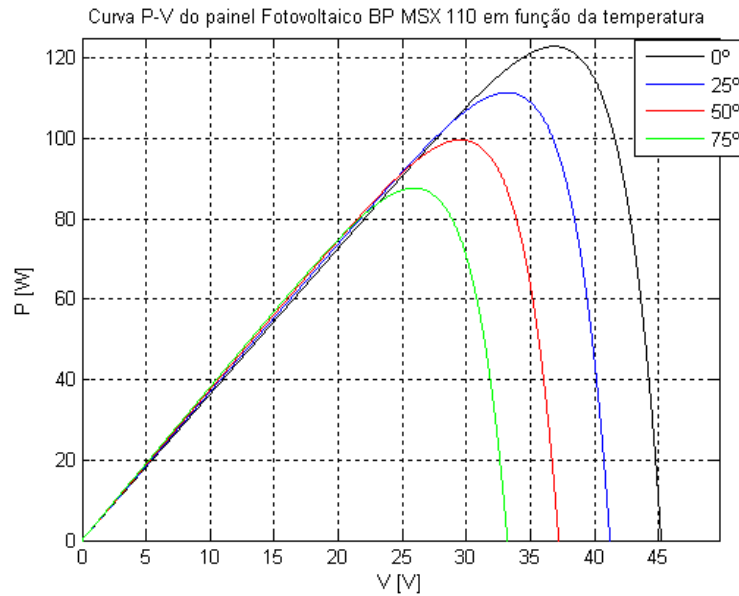


Figura 4.10: Curva P-V do painel BP MSX 110 em função da temperatura

Na figura 4.10 é apresentada a curva P-V e o deslocamento do ponto de potência máxima para a variação da temperatura, considerando a irradiação constante a $1000 W/m^2$.

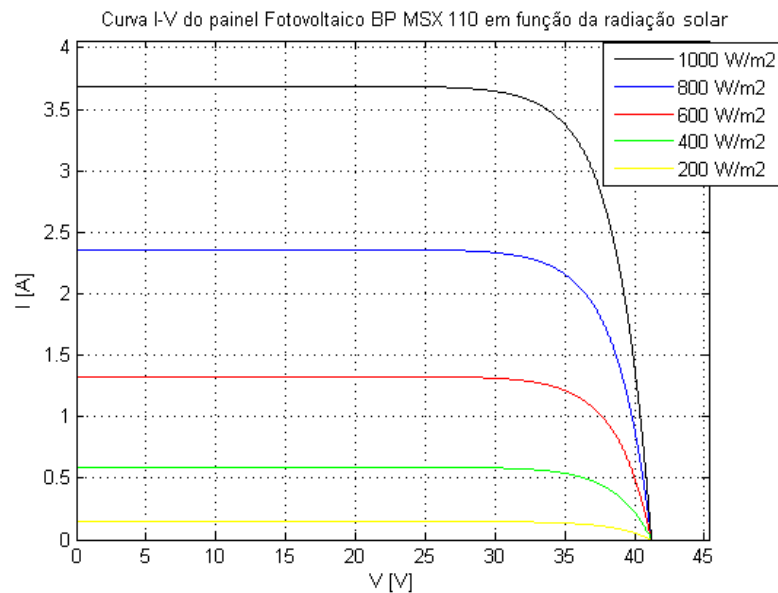


Figura 4.11: Curva I-V do painel BP MSX 110 em função da irradiação

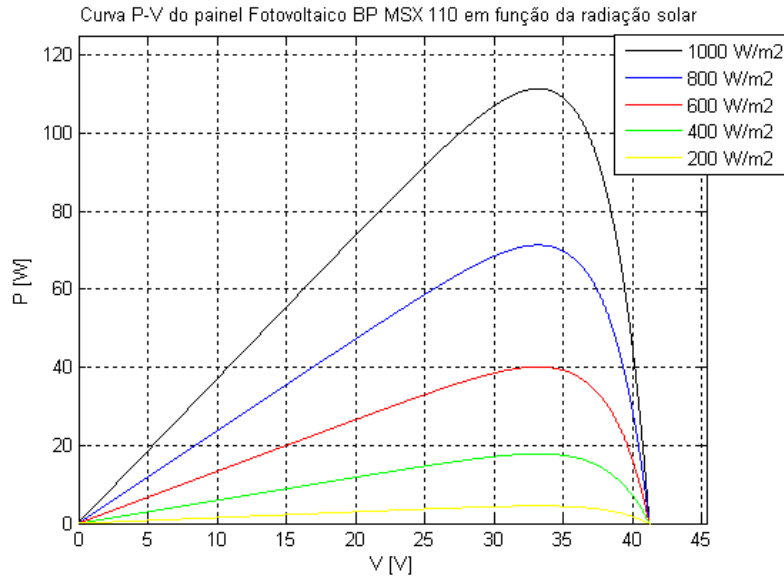


Figura 4.12: Curva P-V do painel BP MSX 110 em função da irradiação

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam as curvas características I-V e P-V de um painel fotovoltaico sob temperatura constante (25°C) a diferentes níveis de irradiação.

As mesmas figuras mostram uma caracterização correcta do princípio do funcionamento das células fotovoltaicas. A análise das figuras anteriores mostra uma dependência com a temperatura e irradiação. Na relação das curvas com a temperatura, nota-se um ligeiro aumento da corrente na curva I-V e P-V e, também, uma subida do ponto de potência máxima. Na relação das curvas com a irradiação nota-se que na curva I-V é considerável a descida do valor da corrente e na curva P-V observa-se uma descida acentuada da potência.

As três zonas distintas do funcionamento, de células fotovoltaicas, encontram-se bem discriminadas e por analogia às figuras da secção 3.6.1, pode-se tirar algumas conclusões:

- Na zona considerada de corrente constante, verificou-se uma dependência directa com temperatura, ou seja, com o aumento da temperatura a corrente aumenta. Por sua vez a irradiação afecta a corrente de maneira inversa.
- Na zona de tensão constante ocorre o fenómeno inverso, a tensão diminui com a temperatura e aumenta com a irradiação.

Como consequência das afirmações anteriores o ponto de potência máxima desloca-se com a alteração dos parâmetros como se pode observar nas figuras anteriormente apresentadas.

Com este código é possível fazer uma simulação de um painel fotovoltaico, pese embora não seja uma simulação muito pormenorizada. Os gráficos são construídos a partir dos valores de tensão em circuito aberto, corrente em curto-circuito e no ponto de potência máxima.

No segundo caso foi desenvolvido um código mais complexo, tentando uma melhor caracterização de um painel fotovoltaico. O objectivo é encontrar os parâmetros da equação I-V,

ajustando a curva em três pontos: circuito aberto, potência máxima e curto-circuito, fornecidos por todos os fabricantes de painéis fotovoltaicos (datasheet). Este código mais complexo, vai encontrar a melhor solução para painéis fotovoltaicos, incluindo os efeitos das resistências série e paralelo e, dizer se a potência máxima coincide com a potência máxima real. As linhas de código descritas em seguida, representam o equações utilizadas no código desenvolvido.

Valores máximos e mínimo das resistencias Rs e Rp respectivamente

$$Rs_{max} = (V_{ocn} - V_{mp})/I_{mp}; \quad (4.16)$$

$$Rp_{min} = V_{mp}/(I_{scn} - I_{mp}); \quad (4.17)$$

Valores iniciais das resistencias Rp e Rs

$$Rs = 0; \quad (4.18)$$

$$Rp = Rp_{min}; \quad (4.19)$$

Em que Rp é dado por:

$$Rp = V_{mp} * (V_{mp} + I_{mp} * Rs) / (V_{mp} * I_{pv} - V_{mp} * I_o * \exp((V_{mp} + I_{mp} * Rs) / Vt / Ns / a) + V_{mp} * I_o - P_{max_e}); \quad (4.20)$$

Calcular a corrente através do método Newton-Raphson. Onde g(J) representa a função da corrente, glin(j) a derivada da função da corrente, $I_{(j)}$ o valor da corrente actual e I(j) o valor da corrente que se queria calcular.

$$g(j) = I_{pv} - I_o * (\exp((V(j) + I(j) * Rs) / Vt / Ns / a) - 1) - (V(j) + I(j) * Rs) / Rp - I(j); \quad (4.21)$$

$$glin(j) = -I_o * Rs / Vt / Ns / a * \exp((V(j) + I(j) * Rs) / Vt / Ns / a) - Rs / Rp - 1; \quad (4.22)$$

$$I_{(j)} = I(j) - g(j) / glin(j); \quad (4.23)$$

$$I(j) = I_{(j)}; \quad (4.24)$$

Calculo da potência utilizando a equação I-V

$$P = (I_{pv} - I_o * (\exp((V + I * Rs) / Vt / Ns / a) - 1) - (V + I * Rs) / Rp) * V; \quad (4.25)$$

Para uma melhor compreensão do código descrito, na figura 4.13 descreve-se os passos seguidos na compilação do ficheiro [20, 26, 30].

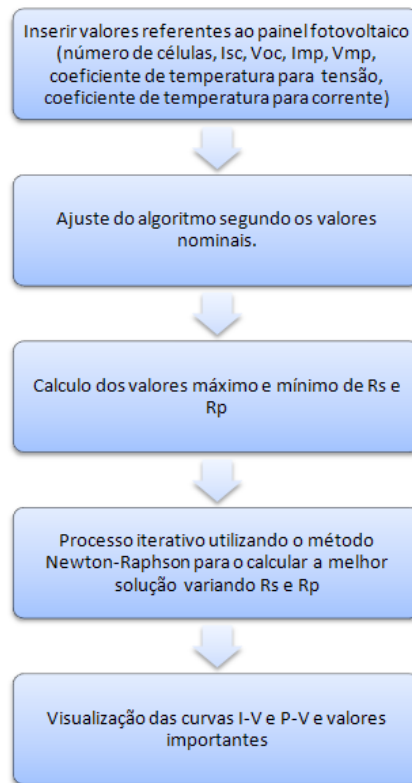


Figura 4.13: Fluxograma para a simulação do ficheiro

O objectivo da simulação é ajustar os valores de R_s e R_p de modo a obter a melhor solução. Ao variar R_s e R_p , as curvas I-V e P-V também variam, uma vez que observando as equações 4.21 até 4.25, constatamos que em todas as equações aparece R_s e R_p . A simulação começa com valor de $R_s = 0$ e $R_p = R_{p_{mim}}$, e estes valores vão variar até $R_{s_{max}}$ incrementando R_s em 0,01 descrito na equações 4.18 e 4.19. Para o ajuste dos valores recorreu-se ao método iterativo Newton-Raphson [31], onde o próximo valor da corrente é calculado sabendo o actual, segundo a equação descrita abaixo:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (4.26)$$

Em que x_n representa o valor actual da corrente, x_{n+1} o próximo valor e $f(x)$ e $f'(x)$ a função que descreve o comportamento do sistema e a sua respectiva derivada [31].

No fim da simulação obtêm-se os valores de R_s e R_p para a melhor solução, ou seja, rendimento máximo da célula [27].

Na simulação utilizou-se uma irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura de 25°C , para o ajuste do valor de R_s e R_p . Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 4.14 e 4.15.

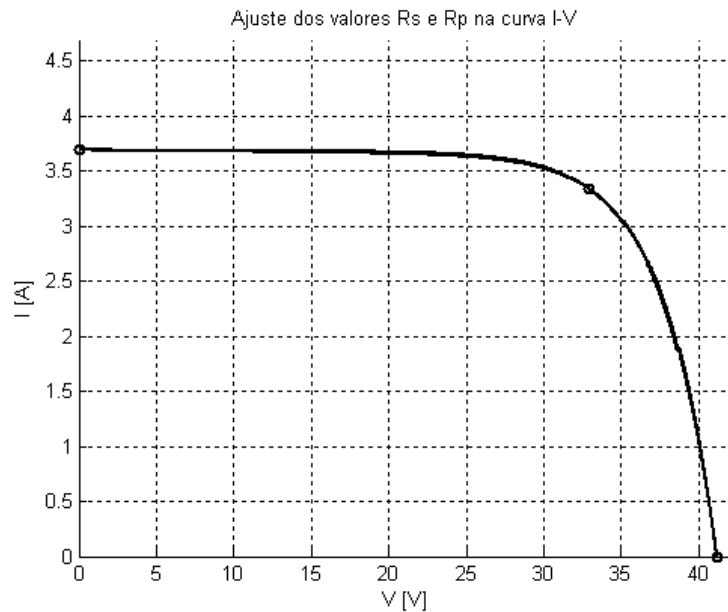


Figura 4.14: Curvas I-V para os diferentes valores de R_s e R_p do painel BP MSX 110

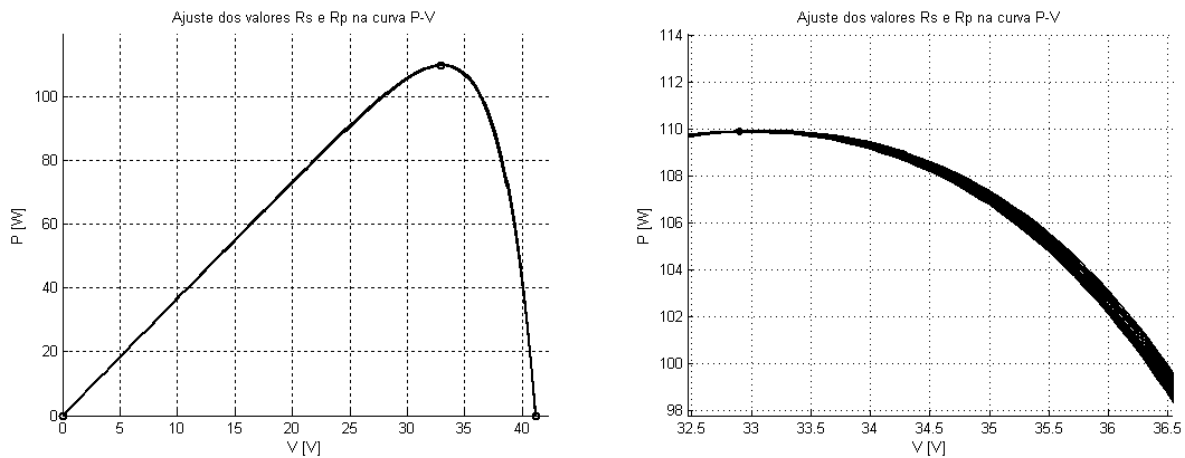


Figura 4.15: Curva P-V, a) para diferentes valores de R_s e R_p , b) zoom da curva P-V

As figuras 4.14 e 4.15 apresentam as curvas I-V e P-V para os diferentes valores de R_s e R_p . A figura 4.15 b) representa um seguimento da curva P-V, onde se observa diferentes curvas para diferentes valores de R_s e R_p . Sendo que, a melhor solução revela um valor para $R_s = 0,09\Omega$ e $R_p = 2044,42\Omega$.

As figuras 4.16 e 4.17 exibem as curvas I-V e P-V, respectivamente, para os melhores valores de R_s e R_p em condições típicas.

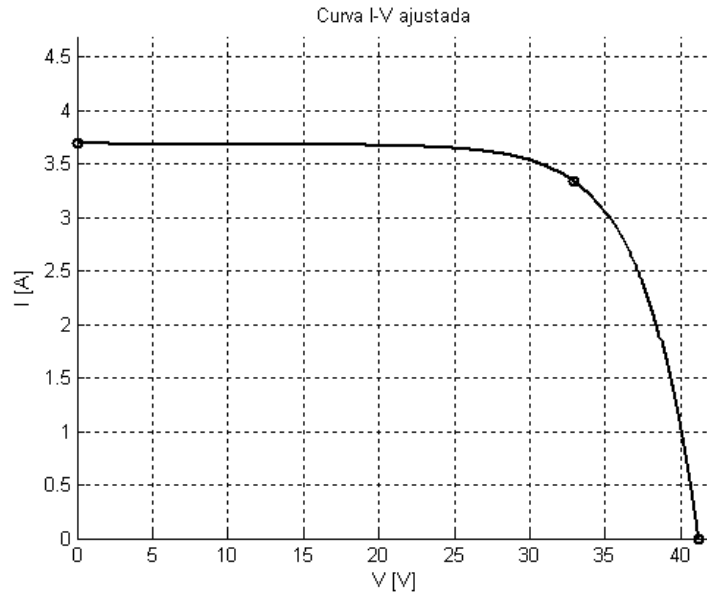


Figura 4.16: Curva I-V ajustada do painel BP MSX 110

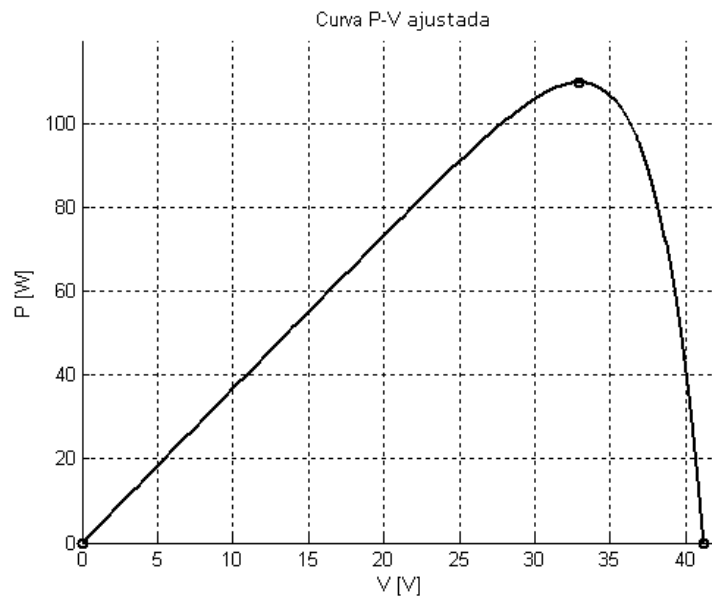


Figura 4.17: Curva P-V ajustada do painel BP MSX 110

Encontrada a melhor solução, pode-se agora visualizar as consequências da alteração dos valores da temperatura e irradiância no desempenho de um painel fotovoltaico. As figuras 4.18 a 4.21 representam a melhor solução, para diferentes valores de temperatura e irradiância, onde é possível visualizar a afectação das curvas.

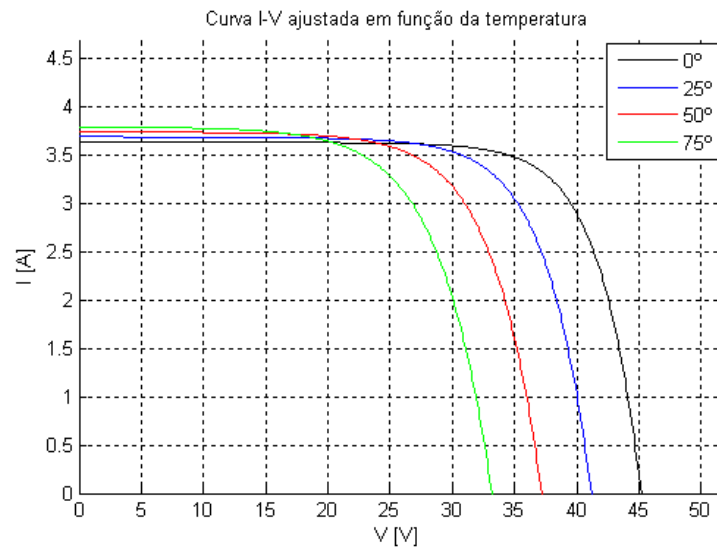


Figura 4.18: Curva I-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da temperatura

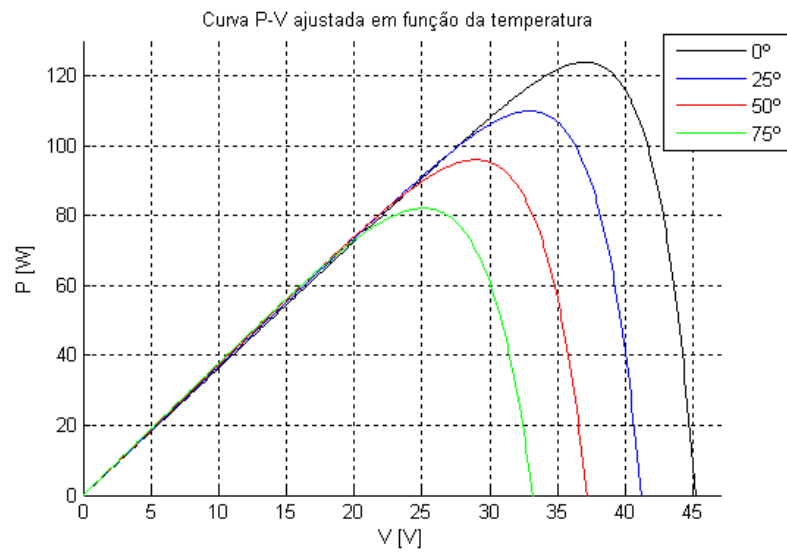


Figura 4.19: Curva P-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da temperatura

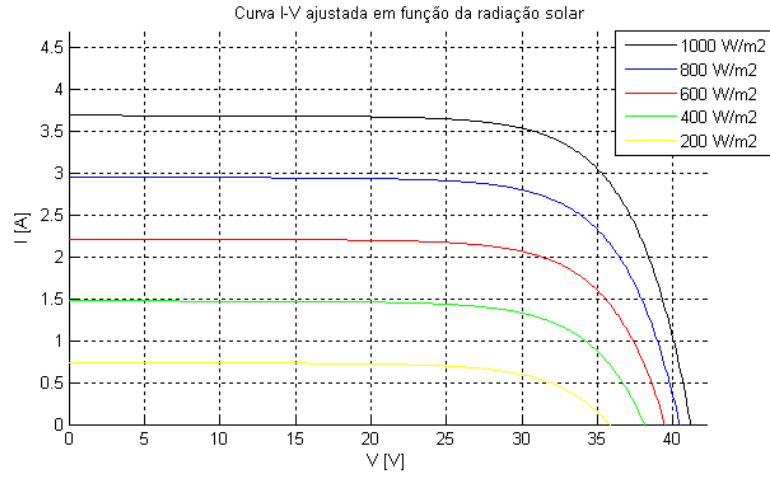


Figura 4.20: Curva I-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da irradiância

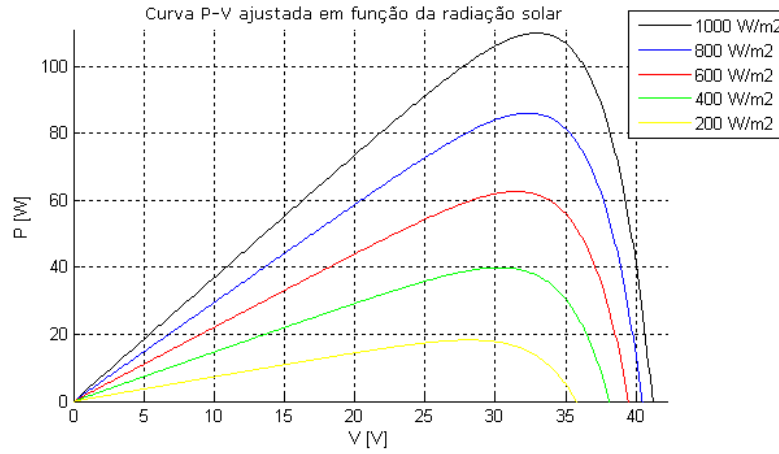


Figura 4.21: Curva P-V ajustada do painel BP MSX 110 em função da irradiância

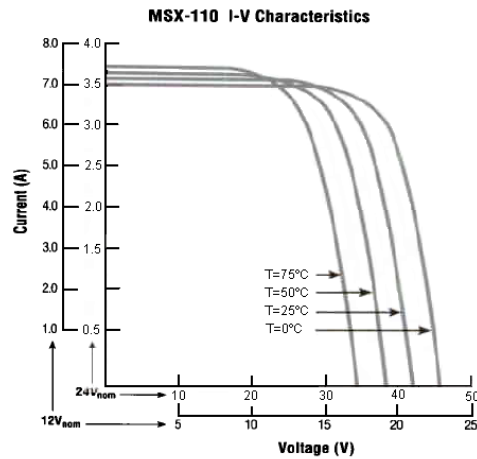


Figura 4.22: Curvas características I-V de um painel BP MSX 110 fornecido pelo fabricante [29]

Concluindo, as figuras 4.14 e 4.15 representam o ajusto de R_s e R_p para obtenção da melhor solução e, é possível visualizar as curvas para os diversos valores de R_s e R_p . As figuras 4.16 e 4.17 representam a melhor solução com $R_s = 0,09\Omega$, $R_p = 2044,42\Omega$ e uma potência de 109,88 W. Na variação das curvas ajustadas em função da temperatura repara-se uma diminuição da tensão com o aumento da temperatura, representadas nas figuras 4.14 e 4.15. Na variação das curvas ajustadas em função da irradiância diminui a corrente com a diminuição da irradiância, representadas nas figuras 4.18 a 4.21. O ponto de potência máxima diminui com a variação da temperatura e da irradiância como é possível constatar nas figuras referidas. A figura 4.22 apresenta a curva característica I-V em função da temperatura do painel fotovoltaico BP MSX 110 fornecido pelo fabricante.

As figuras enumeradas mostram uma caracterização correcta de uma célula fotovoltaica. Da análise destas figuras pode-se concluir a dependência das células com a temperatura e irradiância. Para baixas temperaturas e maiores taxas de irradiância, a célula permite obter potências maiores.

Comparando a curva I-V em função da temperatura, figura 4.18, com as curvas fornecidas pelo fabricante, figura 4.22, conclui-se que são muito idênticas e que o modelo caracteriza correctamente um painel fotovoltaico.

Comprovada a validade das equações e comparando estes resultados com as figuras teóricas descritas na secção 3.6 e com os dados do fabricante, podemos concluir que o modelo implementado permite o estudo correcto de painéis fotovoltaicas.

4.3 Protótipo Desenvolvido

Com vista a alcançar os objectivos propostos, foram realizados estudos introdutórios e testes de montagens electrónicas para verificar possíveis soluções para a aquisição da curva I-V.

Após vários estudos, a montagem que se verificou ser mais adequada baseia-se no autor Yingying Kuai [7], uma vez que o MOSFET permite uma rápida variação de carga, adaptando-se as sucessivas alterações atmosféricas.

Para a aquisição dos valores de corrente e tensão é necessário efectuar o controlo do MOSFET. Mais especificamente, configurou-se o gerador de sinais para produzir uma onda sinusoidal com amplitude de 10V, visto que, para o MOSFET utilizado entrar em condução (zona tródo) necessita de 2V. Nesta zona a corrente do dreno para a fonte é controlada pela tensão V_{GS} , com exemplifica a figura 4.23. Para uma melhor compreensão, na figura 4.24 é ilustrada a característica corrente/tensão de funcionamento de um MOSFET.

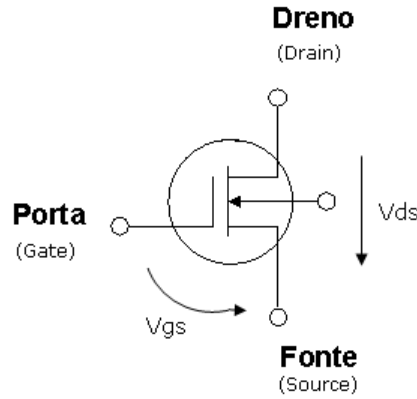
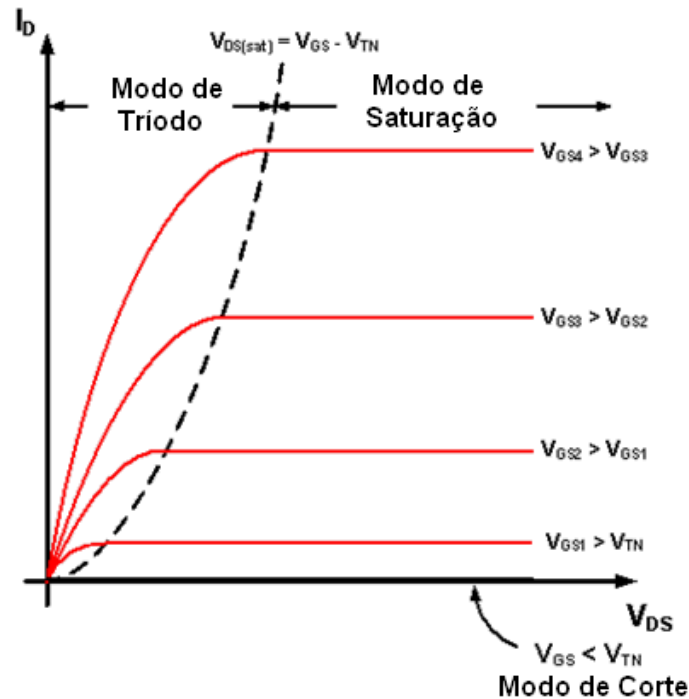


Figura 4.23: Símbolo de um MOSFET

Figura 4.24: Curva característica de um MOSFET, Fonte: <http://macao.communications.museum/>

Observando a figura destaca-se três zonas (tríodo, saturação e corte) de funcionamento de um MOSFET. Nas zonas de tríodo e saturação o transistor conduz. Na zona de tríodo é onde existem maiores variações, quanto maior V_{GS} maior I_D , na zona de saturação o valor da corrente é constante e pouco altera o seu funcionamento e na zona de corte o transistor não conduz até atingir o valor de threshold (no caso 2V) [32].

O transistor está na zona de tríodo se:

$$V_{DS} < V_{GS} - V_t \quad (4.27)$$

e nesse caso a corrente é expressa por:

$$i_D = k[(2(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2)] \quad (4.28)$$

em que k é um parâmetro que depende do material e das dimensões do transistor. É importante notar que, se:

$$V_{DS} \ll V_{GS} - V_t \quad (4.29)$$

então a corrente é expressa por:

$$i_D = 2k \cdot (V_{GS} - V_t) V_{DS} \quad (4.30)$$

que significa que o transistor se comporta como uma resistência R_{DS} (entre o dreno e fonte) comandada por V_{GS} :

$$R_{DS}^{-1} = 2k \cdot (V_{GS} - V_t) \quad (4.31)$$

O transistor encontra-se na zona de saturação se:

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_t \quad (4.32)$$

e a corrente passa a ser independente de V_{DS}

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_t)^2 \quad (4.33)$$

4.3.1 Esquema do Protótipo

O trabalho realizado por Yingying Kuai [7] serviu de base para o desenvolvimento de um circuito para a caracterização automática de um painel fotovoltaico. O circuito desenvolvido apresenta-se na figura 4.25.

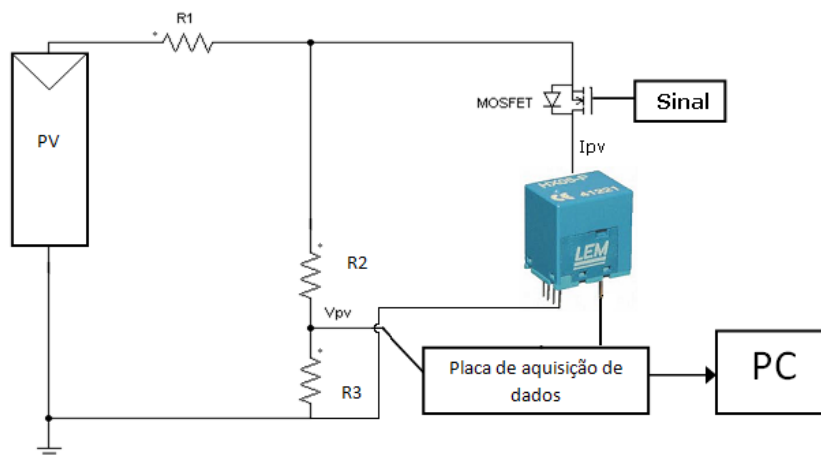


Figura 4.25: Diagrama da unidade de teste

O trabalho desenvolvido divide-se em duas partes, uma parte corresponde ao circuito construído para aquisição dos valores de corrente e tensão provenientes do painel fotovoltaico e outra parte uma aplicação desenvolvida para tratamento dos dados adquiridos.

Na figura 4.25 observam-se os elementos que constituem o circuito: painel fotovoltaico, resistência, MOSFET, gerador de sinais, divisor de tensão, sensor de corrente, placa de aquisição de dados, computador. As características destes elementos passam pela placa de aquisição de dados (NI USB 6008), que recebe os valores da corrente e tensão do circuito, transmitindo-os para o computador. Esta placa disponibiliza 8 entradas analógicas, 2 saídas analógicas e 12 entradas/saídas digitais e tensões de entrada entre os $\pm 10V$. O MOSFET (IRFP048) disponibiliza uma corrente máxima no dreno de 64A. O divisor de tensão, por sua vez, divide o valor da tensão por um factor que irá permitir à placa transmitir o valor da mesma ($V_{saida} = V_{entrada}/11$), para o computador. O sensor de corrente (LEM HX-05), trata-se de um sensor de Hall, que recebe a corrente lida pelo circuito e devolve na saída um valor de corrente dentro dos parâmetros da referida placa.

As curvas características I-V e P-V são apresentadas no computador através da utilização da placa de aquisição de dados. Para se conseguir observar a curva característica I-V de um painel fotovoltaico é necessário existir uma carga para consumir a corrente produzida pelo painel. Essa carga é simulada através do MOSFET que, injectando uma tensão (onda sinusoidal) na porta, o faz entrar em funcionamento, zona de triódo ($V_{GS} > 2V$). Devido às características dos painéis fotovoltaicos, mais concretamente, aos valores de corrente e tensão, não é possível ligar directamente o circuito à placa de aquisição de dados, que apresenta valores de entrada de $\pm 10V$, sendo, por isto, necessário implementar um divisor de tensão e um sensor de corrente para colocar os valores em condições de serem lidos pela placa. A este sistema tem, ainda, de ser implementado o controlo do MOSFET para que as curvas possam ser percorridas desde a corrente de curto-circuito até tensão em circuito aberto. Controlo este, que é efectuado pela aplicação de uma onda sinusoidal, com uma amplitude de 10V, visto que, para o MOSFET entrar em condução (zona triódo) ser necessário 2V (valor de treshold). Nesta zona, a corrente do dreno para a fonte é controlada pela tensão V_{GS} , definindo-se uma tensão com amplitude de 10V, para que esta não fosse muito elevada e o MOSFET não entrasse em "saturação". No seguimento deste sistema e, estando os valores em condições de serem lidos pela placa de aquisição de dados, passa-se à segunda parte do trabalho, ou seja, a aplicação desenvolvida em MATLAB para tratamento dos dados, mais pormenorizada no ponto 4.3.4..

Os componentes utilizados foram dimensionados de acordo com os painéis existentes para a realização dos testes. Painéis esses de baixa corrente até 5A.

4.3.2 Simulação do Protótipo

Antes de se proceder à montagem do circuito com todos os seus componentes, foi simulado o circuito em PSIM e OrCAD a fim de perceber se os resultados eram os pretendidos. Para esta simulação utilizou-se uma fonte de tensão parametrizada para 20V em vez de um painel fotovoltaico. Para o controlo do MOSFET utilizou-se uma onda sinusoidal com amplitude de 10V.

Simulação em PSIM

Da simulação em PSIM observamos as curvas da corrente que atravessa o MOSFET, da onda sinusoidal, e da tensão. Na figura 4.26 está representado o circuito para a simulação.

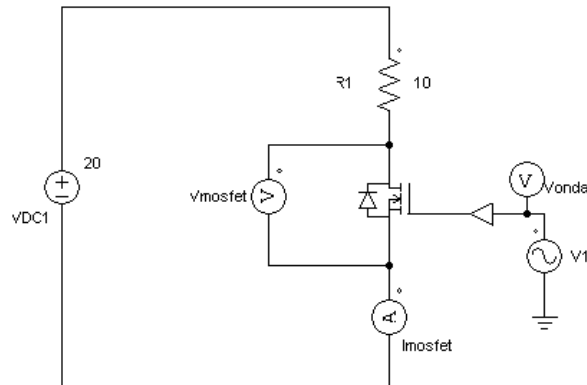


Figura 4.26: Esquema implementado em PSIM

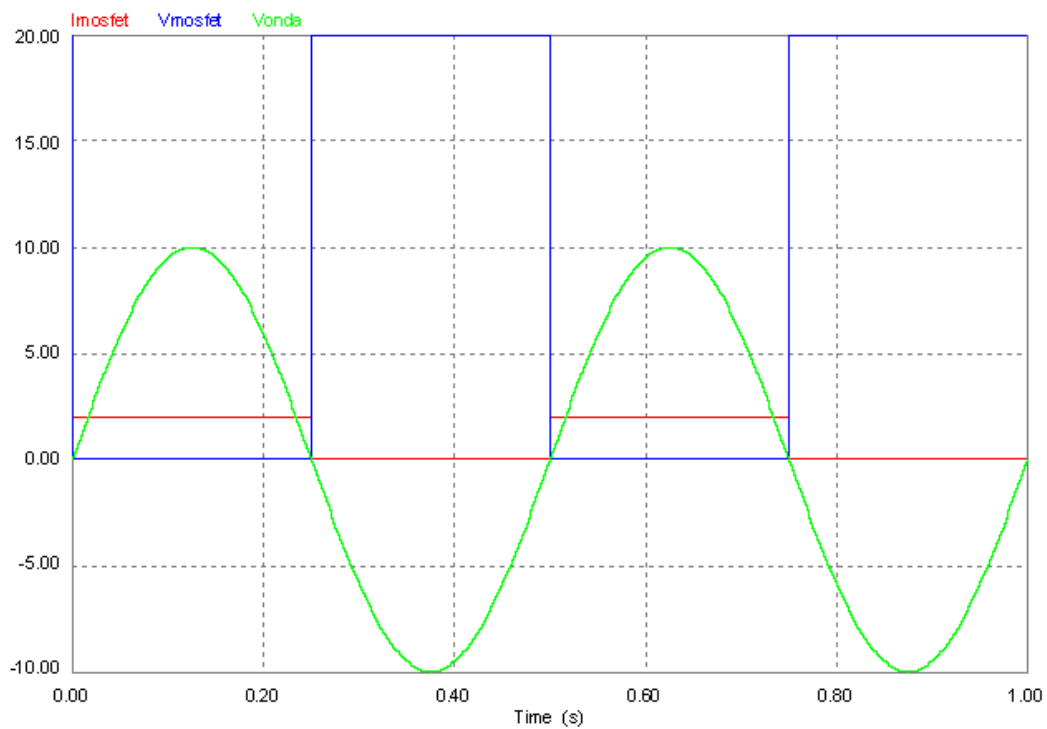


Figura 4.27: Resultado da simulação do circuito

Na figura 4.27 observa-se as curvas resultantes da simulação do circuito da figura 4.26, sendo que, a curva verde corresponde à onda sinusoidal de amplitude 10V, a azul a tensão e a vermelha a corrente que atravessa o MOSFET. Pelo gráfico contacta-se que, conforme o

andamento da onda sinusoidal os valores da tensão e corrente vão-se alterando. Quando a onda tem valores positivos a corrente tem o valor de 2A e a tensão tem de 0V. Quando a onda passa para valores negativos alteram-se os valores, passando a corrente para 0A e a tensão para 20V.

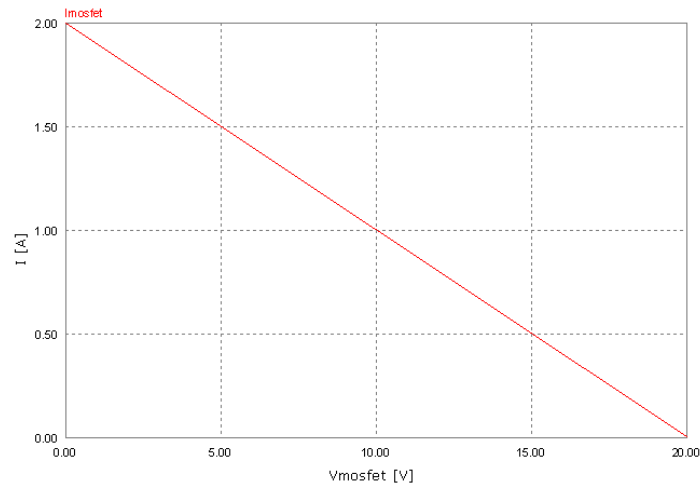


Figura 4.28: Curva da corrente em função da tensão

Na figura 4.28 pode-se visualizar a curva da corrente em função da tensão para o circuito apresentado, e pode-se concluir que o resultado é o esperado, pois apresenta a variação desde o curto-circuito até ao circuito aberto.

Simulação em OrCAD

Simulou-se o mesmo circuito em OrCAD e obtiveram-se as mesmas curvas. Embora este software seja mais indicado para a simulação de circuitos eléctricos, pois permite obter resultados mais precisos como se observará nas figuras 4.29 a 4.31.

Sabendo que o MOSFET só conduz a partir dos 2V, neste software é possível observar essa característica enquanto que em PSIM não, uma vez que o MOSFET conduzia a partir dos 0V.

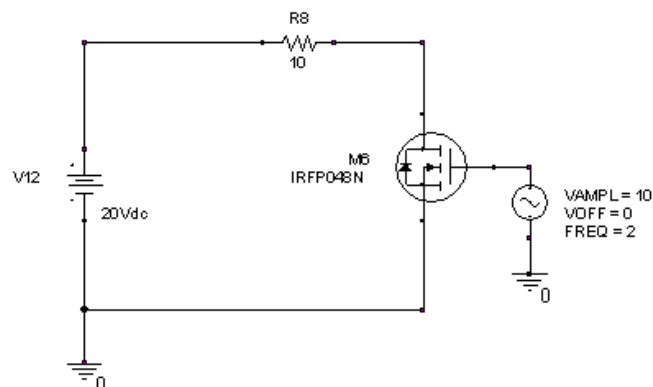


Figura 4.29: Esquema implementado em OrCAD

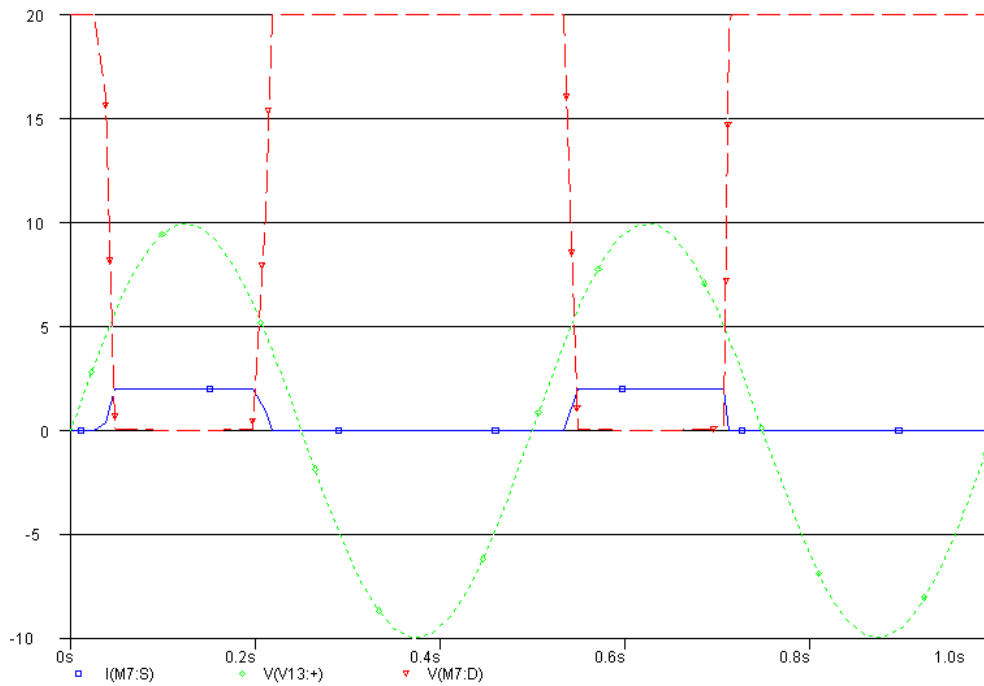


Figura 4.30: Resultado da simulação do circuito

Na figura 4.30 observa-se as curvas resultantes da simulação do circuito da figura 4.29, sendo que, a curva verde corresponde à onda sinusoidal de amplitude 10V, a vermelha a tensão e a azul a corrente que atravessa o MOSFET. É ainda possível visualizar na mesma figura a característica do MOSFET, quando a tensão V_{GS} aplicada na porta do MOSFET atinge os 2V, a tensão da fonte começa a decrescer até aos 0V e a corrente começa a aumentar até aos 2V. E quando V_{GS} atinge, novamente, os 2V acontece o oposto.

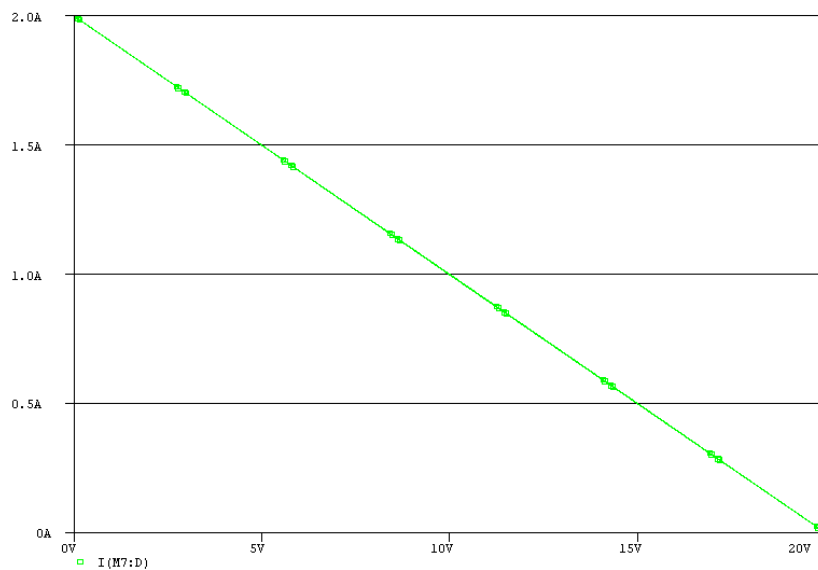


Figura 4.31: Curva da corrente em função da tensão

Na figura 4.31 pode-se visualizar a curva da corrente em função da tensão para o circuito apresentado, e pode-se concluir que o resultado é o esperado, pois apresenta a variação desde o curto-circuito até ao circuito aberto.

4.3.3 Montagem do Circuito

Depois de simular o circuito e escolher os componentes, precedeu-se à montagem. À medida que se interligavam os componentes, realizaram-se testes para verificar se tudo estava de acordo como o pretendido, tendo em vista o objectivo final do trabalho. Primeiro testou-se apenas o painel fotovoltaico com uma resistência variável e registou-se a resposta com um voltímetro e um amperímetro, tendo-se observado que, ao variar a resistência, a corrente varia desde a corrente de curto-circuito até 0A e a tensão varia desde o circuito aberto até 0V. Seguidamente, parametrizou-se a onda para verificar o funcionamento do MOSFET.

Devido às condições climáticas, as variações não eram muito significativas, pelo que se optou por utilizar uma fonte de tensão no lugar do painel fotovoltaico. Neste momento, o sistema era composto por fonte de tensão, gerador de sinais, MOSFET e osciloscópio onde se observou os resultados.

Como os resultados foram satisfatórios seguiu-se para o passo seguinte. Implementou-se o sensor de corrente e o divisor de tensão a fim de colocar os valores da corrente e tensão dentro da gama de valores lidos pela placa de aquisição de dados, para serem trabalhados na aplicação desenvolvida em MATLAB previamente construída.

A figura 4.32 mostra os componentes utilizados para na montagem do circuito.

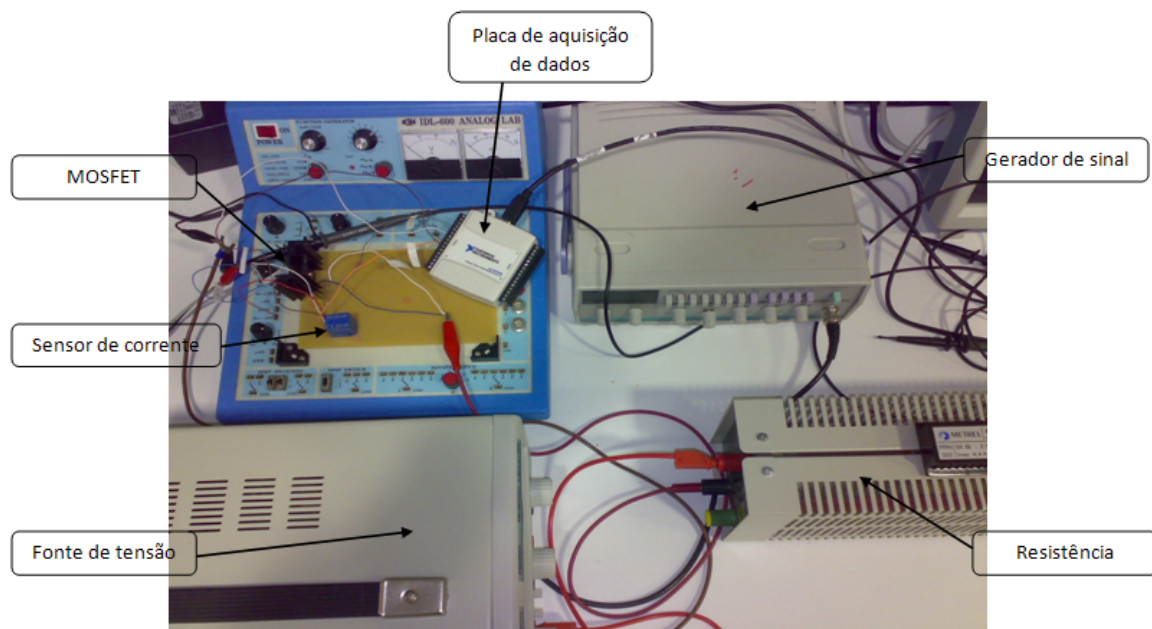


Figura 4.32: Circuito e seus componentes

A figura anterior mostra os equipamentos interligados utilizados no laboratório para a caracterização automática de um painel fotovoltaico. De entre os equipamentos destacamos, uma resistência variável com o valor de 10Ω , uma fonte de tensão que substituiu o painel fotovoltaico nos testes, um gerador de sinal que injecta uma onda no MOSFET para este funcionar, a placa de aquisição de dados para receber os valores da corrente e da tensão no computador, um sensor de corrente e um divisor de tensão para colocar os valores destes dentro dos limites da placa de aquisição.

Desenvolveu-se em MATLAB uma aplicação para a visualização das curvas I-V e P-V.

4.3.4 Aplicação em MATLAB

Depois da montagem, interligação e teste dos componentes, é necessário visualizar os dados adquiridos e para isso foi desenvolvido uma aplicação em MATLAB. Esta aplicação consiste, não só em mostrar as curvas adquiridas, bem como fazer uma pequena comparação entre a curva teórica (ideal) com o que foi adquirido.

Depois de muitas ideias e algumas executadas, construiu-se a aplicação. O fluxograma da figura 4.33 revela como decorre o funcionamento da aplicação.

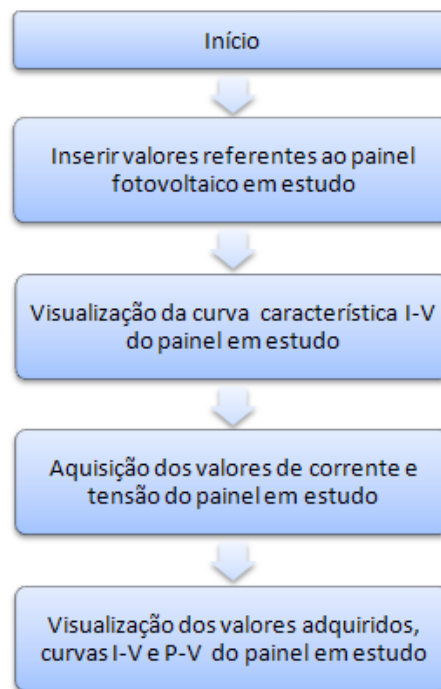


Figura 4.33: Fluxograma para as várias etapas da aplicação

Ao executar a aplicação a sua aparência é a da figura 4.34, onde se encontra um botão para inserir os dados relativos a um painel fotovoltaico, pois a aplicação é dinâmica adaptando-se a qualquer tipo de painel fotovoltaico.



Figura 4.34: Aparência da aplicação

Ao pressionar o botão Inserir valores característicos aparecem na janela oito campos, seis deles referentes às características de um painel fotovoltaico e os outros campos dizem respeito à irradiância e temperatura predefinidos para as condições típicas ($G = 1000W/m^2$ e $T = 25^{\circ}C$), como exemplifica a figura 4.35. Inserindo os valores em cada campo e clicando no botão Valores Inseridos irá aparecer na janela o gráfico da curva característica I-V de acordo com os valores inseridos.

Características de um painel fotovoltaico	
Número de células	<input type="text"/>
Corrente em curto-circuito	<input type="text"/> (A)
Tensão em circuito aberto	<input type="text"/> (V)
Potência máxima	<input type="text"/> (W)
Tensão no ponto de potência máxima	<input type="text"/> (V)
Corrente no ponto de potência máxima	<input type="text"/> (A)
Radiação Solar	<input type="text" value="1000"/> (W/m ²)
Temperatura	<input type="text" value="25"/> (°C)

Figura 4.35: Janela de inserção dos valores referentes a um painel fotovoltaico

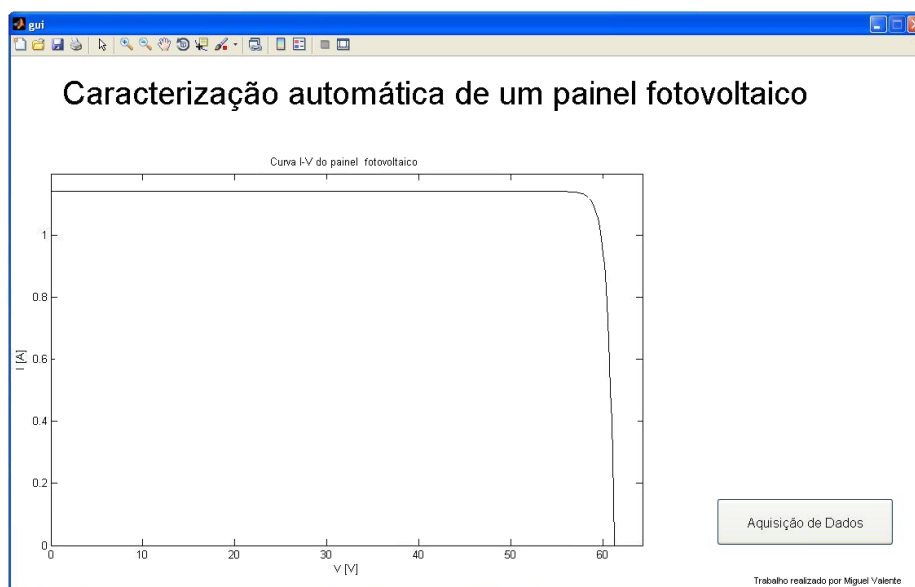


Figura 4.36: Curva característica consoante os valores característicos do painel em questão

Na figura 4.36, o botão Aquisição de Dados permite recolher e armazenar os dados do circuito, mostrando os valores referentes à corrente e tensão adquiridos. Cada vez que se carrega no botão, o sistema parametrizado adquire 1000 amostras relativamente a cada característica em 2 segundos. Para além de exibir os dados adquiridos, a aplicação grava-os em dois ficheiros distintos correspondendo um à corrente e outro à tensão. Sempre que os dados são guardados é adicionado no início, o dia, a hora e os minutos da aquisição, estando os dados distribuídos por colunas.

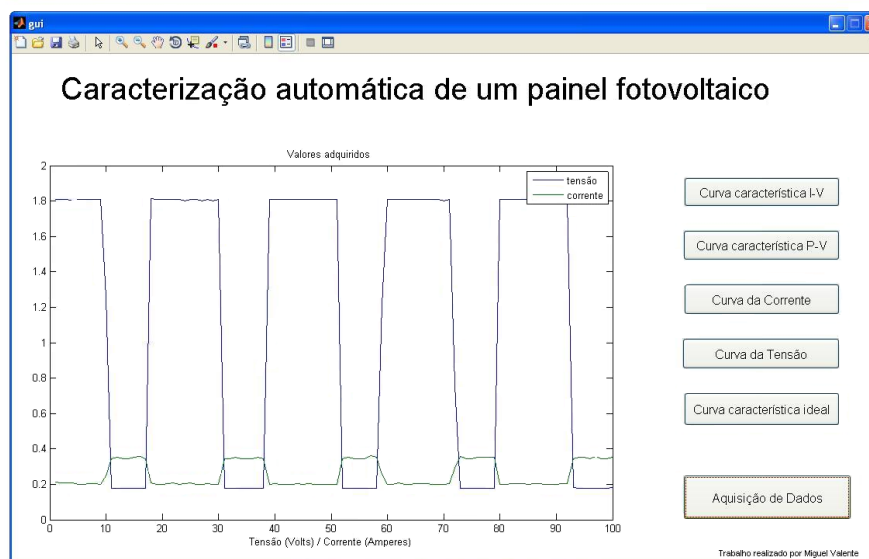


Figura 4.37: Valores adquiridos

Após a aquisição dos valores, o sistema exibi-os e a janela complementa-se com o aparecimento de mais cinco botões, como exemplifica a figura 4.37. Botões esses que reproduzem no gráfico as curvas referentes a cada opção. No caso do primeiro botão Curva característica I-V, representa a curva adquirida da corrente em função da tensão. O botão Curva característica P-V, representa a curva adquirida da potência em função da tensão. Os botões, Curva da corrente e Curva da tensão representam no gráfico as curvas adquiridas da corrente e tensão, respectivamente. E o botão Curva característica ideal, exibe a curva I-V ideal no gráfico.

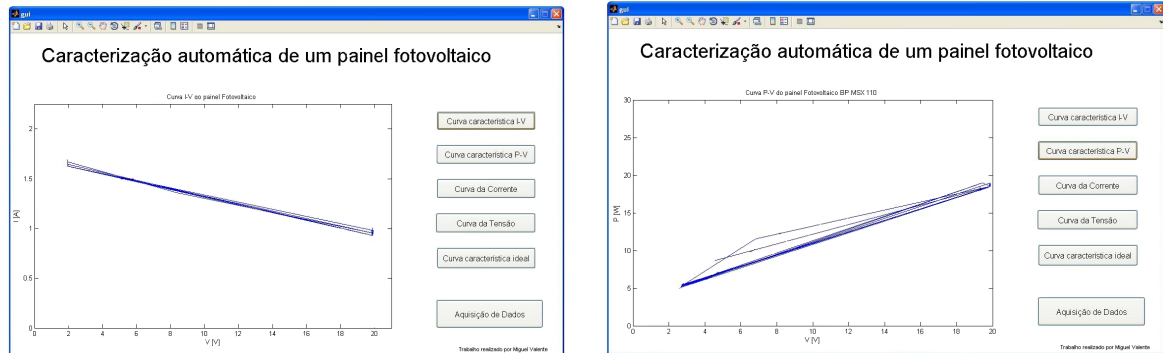


Figura 4.38: Curvas adquiridas, a) curva I-V b) curva P-V

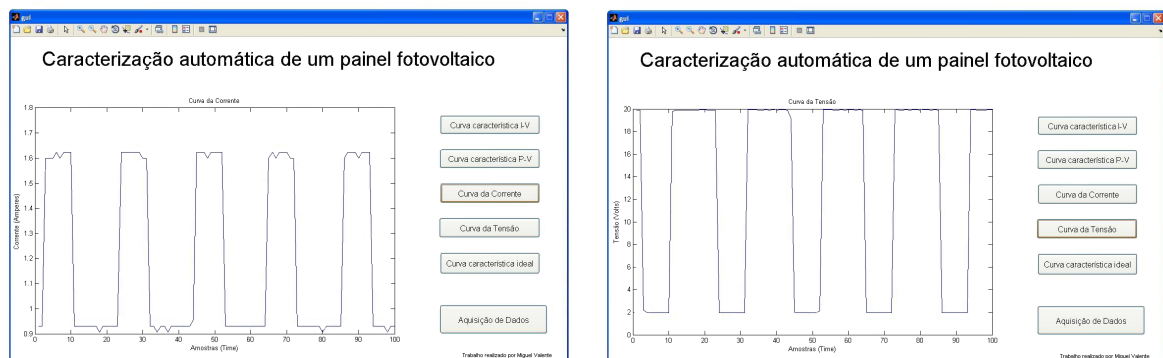


Figura 4.39: Valores adquiridas, a) valores de corrente b) valores de tensão

As figuras 4.38 e 4.39 representam as respostas da execução dos botões. Na figura 4.38 no lado esquerdo corresponde à curva característica I-V e no lado direito corresponde à curva característica P-V. Na figura 4.39 corresponde aos valores adquiridos para a corrente e tensão, respectivamente.

Uma vez adquiridos os dados, é possível em qualquer janela voltar a adquirir dados, bastando carregar novamente no botão Aquisição de Dados e volta a aparecer no gráfico os valores da corrente e tensão adquiridos e a possibilidade de visualizar as novas curvas carregando nos diferentes botões.

4.4 Validação do Modelo

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos com o sistema proposto ligado a um painel fotovoltaico.

Após a construção e realização de testes ao protótipo proposto, concluiu-se que estava tudo a funcionar de acordo com o pretendido. Seguiu-se, deste modo, para o objectivo da dissertação, ou seja, testar o sistema proposto ligado a um painel fotovoltaico sob incidência directa da radiação solar.

Os testes foram realizados no telhado do edifício X da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa onde se encontram instalados 7 painéis fotovoltaicos, sendo dois policristalinos e os cinco restantes de silício amorfo. Para a realização dos testes utilizou-se um dos painéis policristalinos.

O protótipo proposto, para a caracterização automática de um painel fotovoltaico, adquire 1000 amostras em 2 segundos, exibindo posteriormente as curvas características I-V e P-V.

A figura 4.40 exibe o sistema instalado no telhado do edifício para a realização dos testes. Na figura observa-se o sistema implementado, composto por um painel fotovoltaico, gerador de sinais, circuito desenvolvido e um computador para a visualização das curvas.



Figura 4.40: Sistema instalado no telhado do edifício X

Com o sistema instalado e todos os equipamentos interligados no telhado, procedeu-se à realização dos testes. Primeiro testou-se o painel interligado com circuito desenvolvido, e observou-se os valores da corrente e tensão do painel num amperímetro e num voltímetro respectivamente, concluindo-se que os resultados eram satisfatórios.

Prosseguindo a realização dos testes, testou-se o sistema final, ou seja, visualizando-se os dados e curvas características na aplicação desenvolvida, recebidos através da placa de aquisição de dados.

Na tabela 4.2, apresentam-se os valores característicos do painel SWEA 130 watt utilizado para a realização dos testes, para condições de irradiação de $1000W/m^2$ e temperatura de $25^{\circ}C$.

Tabela 4.2: Características do painel fotovoltaico em teste

Características	Valor
Número de células	84
Potência máxima (Pmax)	130 W
Corrente em curto-circuito (I_{CC})	3.21 A
Tensão em circuito aberto (V_{OC})	50.1 V
Tensão em potência máxima (V_{max})	40.8 V

Para uma fácil compreensão e execução do sistema proposto, a figura 4.41, representa os passos a seguir na aplicação para a obtenção dos resultados.

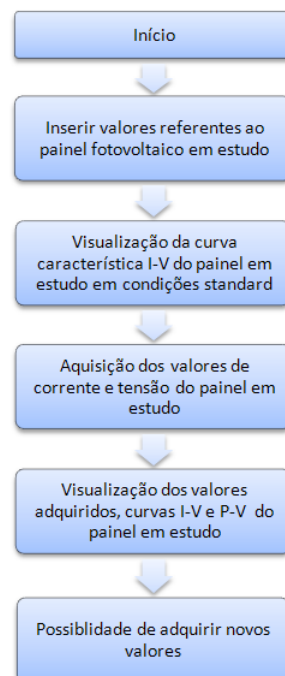


Figura 4.41: Fluxograma dos procedimentos a utilizar no teste

A realização dos testes decorreu durante o mês de Janeiro e Fevereiro de 2011. Estes meses apresentaram baixos níveis de radiação solar, temperaturas baixas e a existência de nuvens bem como períodos de chuva, factores estes que influenciaram os resultados, mas que, ainda assim, foram satisfatórios.

Dos inúmeros testes realizados, mostram-se em seguida os melhores resultados do protótipo desenvolvido.

Inicializada a aplicação, inserem-se os dados característicos do painel (número de células, I_{cc} , V_{oc} , V_{max} , I_{max} , P_{max}). Após inserção dos dados visualiza-se a curva característica I-V, em condições típicas ($G = 1000W/m^2$ e $T = 25^\circ C$), que está representada na figura 4.42.

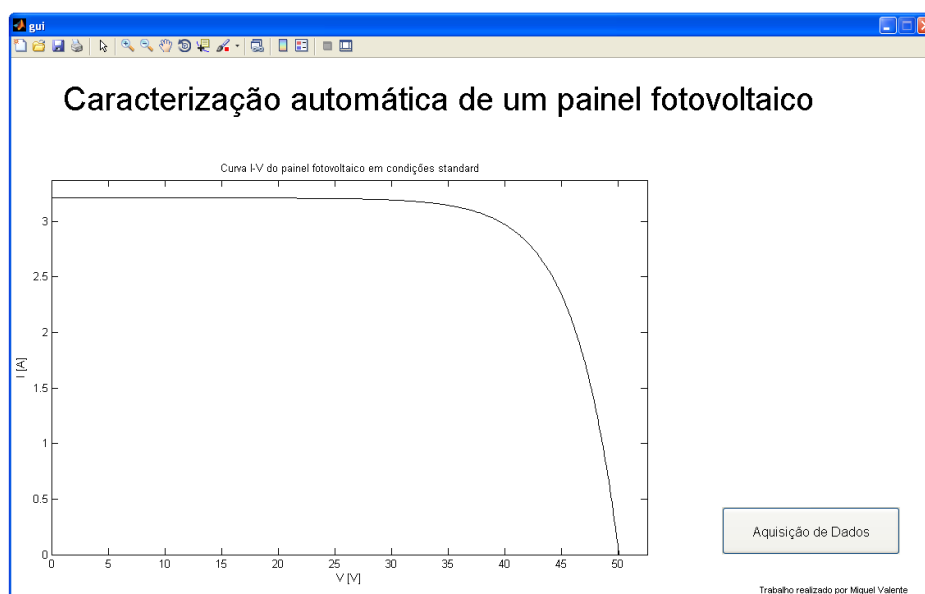


Figura 4.42: Curva característica I-V do painel em estudo em condições típicas

Visualizada a curva teórica do painel em estudo, iniciou-se o teste prático. Este teste consiste na visualização dos valores de corrente e tensão sob incidência directa da radiação solar. Ao carregar no botão Aquisição de Dados presente na aplicação, adquiriram-se 1000 amostras para cada parâmetro (corrente e tensão) provenientes do circuito, como ilustra a figura 4.43.

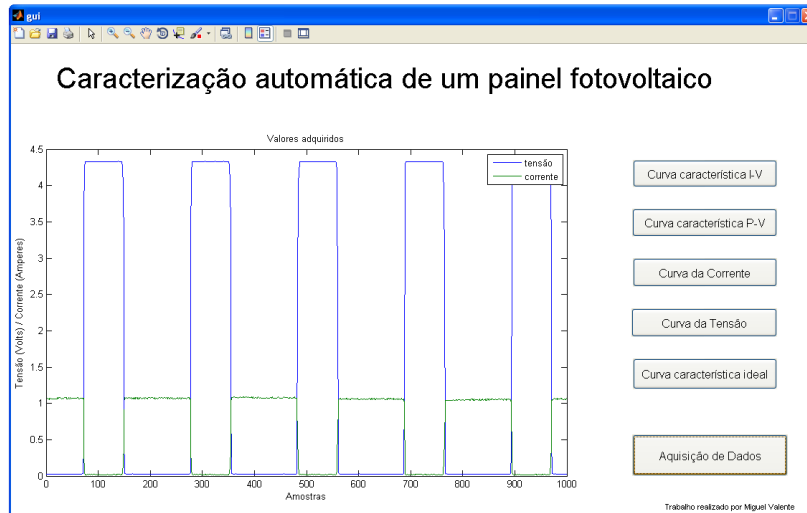


Figura 4.43: Valores de corrente e tensão adquiridos pelo circuito

Na figura 4.43, estão representados os valores de corrente e tensão adquiridos pelo circuito e transmitidos para o computador. Destaca-se na figura os cinco botões que, ao serem pressionados, exibem as curvas referentes a cada um. Ao pressionar o botão Curva característica I-V, exibe-se a curva da corrente em função da tensão, como ilustra a figura 4.44.

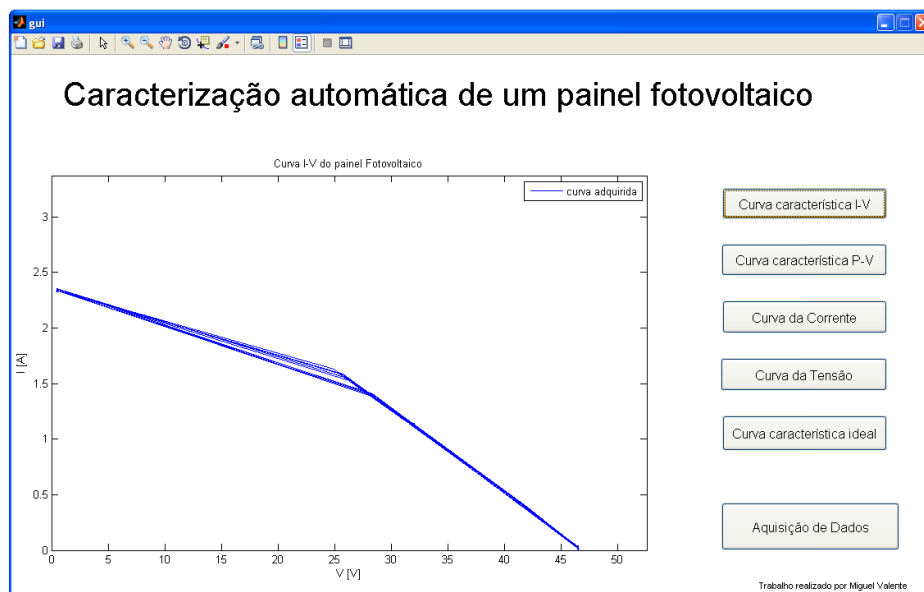


Figura 4.44: Curva característica I-V adquirida

Ao observar a figura 4.44, constata-se que a corrente varia desde a corrente em curto-circuito até 0A. Comparando a curva obtida com as curvas simuladas em PSIM e MATLAB (descritas no ponto 4.2.2), pode-se concluir que são idênticas.

Pressionando o botão Curva característica P-V, exibe a curva da potência em função da tensão.

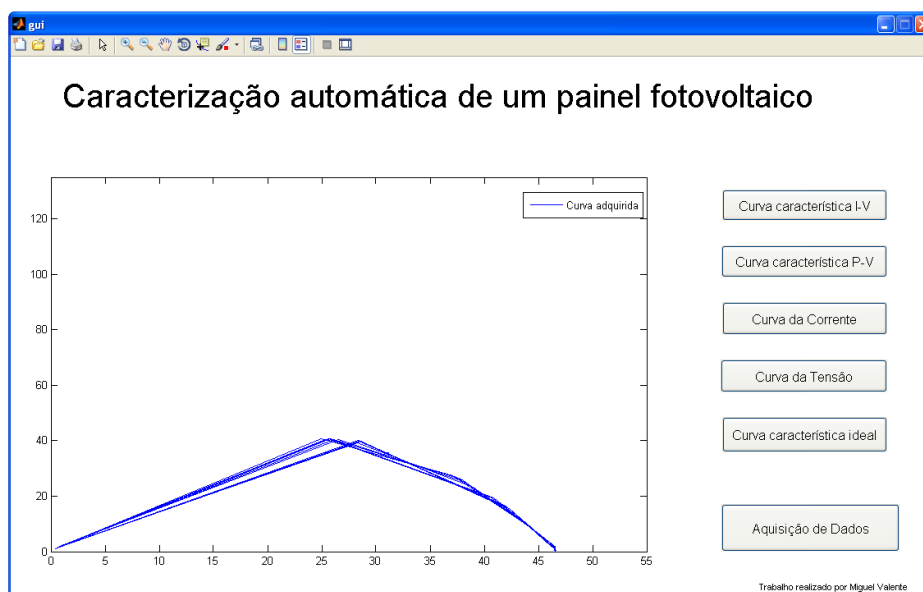


Figura 4.45: Curva característica P-V adquirida

Para a figura 4.45, pode-se fazer a mesma analogia, comparando a curva adquirida como os resultados teóricos, concluindo-se que as curvas são idênticas.

Ao pressionar os botões Curva da corrente e Curva da tensão, são exibidos os valores adquiridos referentes a cada característica, como ilustram as figuras 4.46 e 4.47.

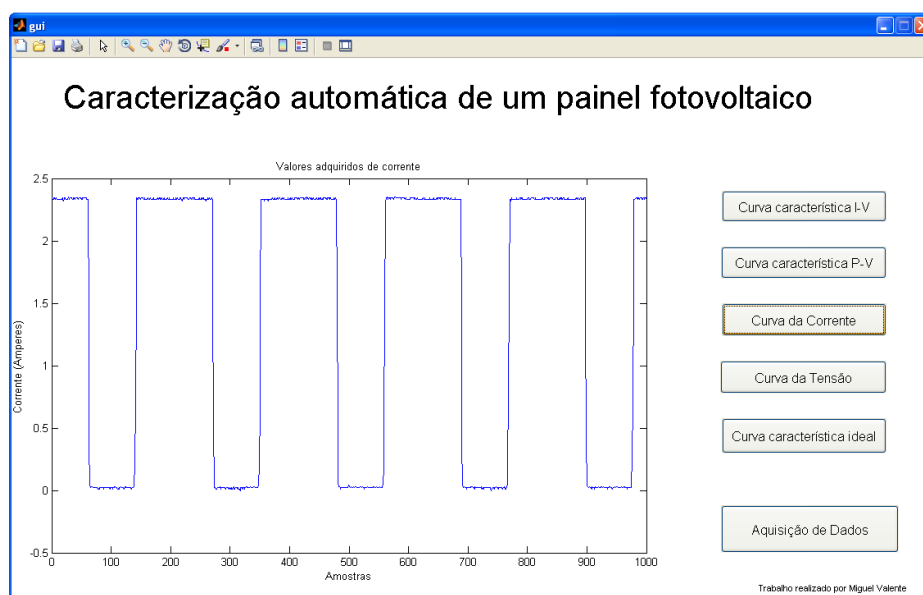


Figura 4.46: Valores adquiridos de corrente

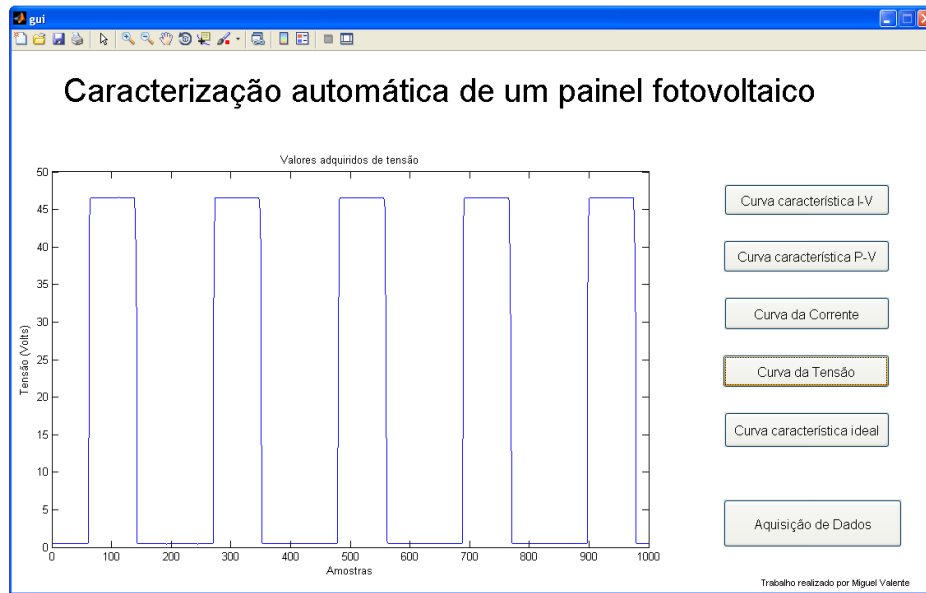


Figura 4.47: Valores adquiridos de tensão

As figuras 4.46 e 4.47 mostram os valores de corrente e tensão, respectivamente, do painel quando submetido à carga produzida pelo MOSFET.

As figuras anteriores representam o melhor resultado obtido do sistema proposto. A figura 4.43 representa os valores de corrente e tensão adquiridos pelo protótipo. Nas figuras 4.44 e 4.45 representam-se as curvas características I-V e P-V do painel. E as figuras 4.46 e 4.47 representam, respectivamente, os valores de corrente e tensão produzidos pelo painel. De realçar que, em todas as figuras anteriores se encontra o botão de Aquisição de Dados que permite em qualquer instante adquirir novos dados, voltando ao início da aplicação.

Nas figuras 4.44 e 4.45 é possível observar os parâmetros fundamentais de um painel fotovoltaico. Na figura 4.44 é possível observar a corrente em curto-circuito e a tensão em circuito aberto. Na figura 4.45 observa-se o ponto de potência máxima. As curvas características adquiridas pelo protótipo assemelham-se às curvas apresentadas na simulação de uma célula fotovoltaica em PSIM e estão próximas das apresentadas em MATLAB.

A tensão aplicada à porta do MOSFET foi uma onda sinusoidal. Devido à sua amplitude elevada, essa tensão coloca na maior parte do tempo o MOSFET fora da zona de triódo, estando portanto o dispositivo na maior parte do tempo a funcionar na zona de corte ou na zona de saturação. Outro ponto, passa pela frequência, ou seja, a frequência do sinal é de um certo modo elevada, o que faz o seu período ser pequeno, e o tempo de subida e descida da onda também vai ser pequeno, por outras palavras significa que o sinal repete-se mais rápido. Como a frequência é muito rápida, o funcionamento do MOSFET é semelhante a um interruptor, ou seja, salta rapidamente da zona de corte para a zona de saturação apanhando pouco pontos intermédios.

Este fenómeno vê-se claramente nas simulações apresentadas na figura 4.30 e nos resulta-

dos experimentais apresentadas na figura 4.37. Por isso, a maior parte das amostras obtidas ocorrem quando o MOSFET está na zona de corte ou na zona de saturação, e poucas se referem a pontos intermédios. Assim as curvas I-V têm poucos pontos de fora da zona de circuito aberto e de curto circuito, como se pode observar nas figuras 4.44 e 4.45.

Por estas razões, os resultados obtidos aparentam afastar-se da previsão teórica, mas isso deve-se essencialmente à falta de pontos suficientes na zona de interesse.

No seguimento dos estudos realizados na composição desta dissertação sobre um painel fotovoltaico, ou seja, os estudos teóricos, a simulação de uma célula fotovoltaica em PSIM e MATLAB e a simulação do circuito proposto em PSIM e OrCAD, comparando com as curvas I-V e P-V adquiridas, pode-se concluir que o protótipo desenvolvido caracteriza correctamente um painel fotovoltaico.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

A presente dissertação contempla o desenvolvimento de um sistema que permite a aquisição das curvas características de um painel fotovoltaico. Na execução do protótipo teve-se em consideração a facilidade no seu manuseamento assim como o baixo custo.

Sendo as energias renováveis tema da actualidade, a motivação para a realização deste trabalho, deveu-se ao elevado número de instalações de painéis fotovoltaicos existentes e à necessidade de comprovar o seu desempenho com o passar dos anos.

Para desenvolvimento deste tipo de projectos, é imprescindível o estudo das características e factores que influenciam as curvas características I-V e P-V. O protótipo desenvolvido consiste num MOSFET para simular a carga e representar as curvas características para painéis de baixa corrente (até 5A). O sistema apresenta as curvas características I-V e P-V, bem como os valores de corrente e tensão produzidos pelo painel. É, também, possível observar nas curvas adquiridas os parâmetros, corrente em curto-circuito e tensão em circuito aberto e ponto de potência máxima.

Os factores ambientais influenciaram os resultados, embora se tivesse atingido os objectivos propostos. O protótipo desenvolvido cumpriu todos os requisitos esperados, caracterizou de forma automática um painel fotovoltaico, representando as curvas I-V e P-V.

Ao longo da realização do trabalho, os objectivos dividiram-se entre a investigação e desenvolvimento de conhecimentos bem como na elaboração do protótipo.

A título de conclusão do trabalho realizado pode-se afirmar que os resultados obtidos são satisfatórios, pelo que se pode considerar que o protótipo e aplicação desenvolvidos caracterizam de forma automática um painel fotovoltaico.

No desenvolvimento da dissertação, surgiram algumas ideias que, não tendo sido incluídas na dissertação, contribuíram de forma importante para os resultados obtidos, podendo ser aplicadas em trabalhos futuros. Destacam-se alguns exemplos:

- Redimensionamento do controlo do MOSFET.
- Complementar o sistema com possibilidade de caracterizar painéis com correntes mais elevadas.

Capítulo 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

- Complementar o sistema com aquisição dos valores de temperatura e de irradiância.
- Portabilidade do sistema, ou seja, implementando o gerador de onda e as alimentações dos componentes no circuito.
- Possibilidade de visualizar na mesma figura, a curva teórica e a curva adquirida para valores de radiação solar e temperatura instantâneas.
- Possibilidade de interligação de protótipo com uma estação meteorológica.

Bibliografia

- [1] "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos". Grupo de Trabalho de Energia Solar, Prc-Prodeem (2004), CRESESB. Disponível em - www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/publicacoes/Manual_Livro.htm
- [2] Instituto de Educação, Programa de educação científica proporcionada pela Fundação Caritro. Disponível em - http://www.vivoscuola.it/us/rsigpp3202/solare/fv_2.htm.
- [3] Santos, B. R.; Coelho, L. H. P., e Petry, C. A., (2008). "Proposta de Desenvolvimento de um Traçador de Curvas V x I para painéis fotovoltaicos". Artigo, Programa da II Jornada de Produção Científica da Educação Profissional e Tecnológica da Região Sul.
- [4] Prieb, C. W. M., (2002). "Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [5] Hecktheu, L. M., (2001). "Análise de Associação de Módulos Fotovoltaicos". Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [6] Carvalho, A. T., (2000). "Construção de um Sistema de Aquisição de Dados para o Laboratório de Energia Solar". Projecto Final de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [7] Kuai Y., Yuvarajan S. (2006). "An electronic load for testing photovoltaic panels". Elsevier Journal of Power Sources, vol. 154, pp308-313.
- [8] DGGE, Direcção Geral de Energia e Geologia. Disponível em - www.dgge.pt/Áreas Sectoriais/Energias Renováveis/Energia Solar.
- [9] Teixeira, S., (2005). "Energia Solar - Conversão Térmica". Artigo, Núcleo Cenfim.
- [10] "Breve história da energia solar". Instituto Superior Técnico. Disponível em - <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>.
- [11] Brito, M. C. e Serra, J. M., (2005). "Células Solares para produção de energia eléctrica". Revista QUANTUM nº1.
- [12] Delaware University. Disponível em - www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html.
- [13] Hegedus, S., Luque, A., (2003). "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering". Livro, ISBN: 0-471-49196-9, Wiley.
- [14] "Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projecto e instalação". Relatório técnico, programa Alter.

Bibliografia

- [15] Castro, G. M. R., (2002). "Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à energia fotovoltaica". Instituto Superior Técnico.
- [16] Shigue, Y. C., (2010). "Célula Fotovoltaica de Silício". Relatório. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena.
- [17] "Energia Solar - Princípios e suas Aplicações". CRESESB. Disponível em - www.cresesb.cepel.br/.
- [18] Meiqin, M., Jianhui, S., Chang, L., Kai, P., Guorong, Z., Ming, D.,(2009). "Research and Development of Fast Field Tester for Characteristics of Solar Array". IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. CCECE '09. ISBN: 978-1-4244-3509-8, page(s): 1055 - 1060, Maio 2009.
- [19] Hansen, A., P. Lars, H. Hansen e H. Bindner, (2000). "Models for a Stand-Alone PV System". Risø National Laboratory, Riso-R-1219/SEC-R-12, ISBN: 87-550-2774-1.
- [20] Longatt, F., (2005), "Model of Photovoltaic Module in Matlab". Palestra 2º Congresso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (II CI-BELEC 2005).
- [21] Xiao, W., Dunford, W., Palmer, P., (2007), "Regulation of Photovoltaic Voltage". IEEE Transaction on Industrial Electronics, VOL. 54, NO. 3, page(s): 1365 - 1374, Junho 2007.
- [22] Campos, C., Eusébio, E., (2005). "Gestão de Energia". Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [23] Spertino, F., Akilimali, J. (2009). "Are Manufacturing I-V Mismatch and Reverse Currents Key Factors in Large Photovoltaic Arrays?". IEEE Transaction on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 11, page(s): 4520 - 4531 Novembro 2009.
- [24] Castanha, L.. Energia Fotovoltaica. "Apontamentos da disciplina de Energia e Desenvolvimento Sustentável". Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [25] Lopez, H., (2009). "Inversor módulo interligado utilizando um conversor CC-CC zeta com controle MPPT FEEDFORWARD". Dissertação de Mestrado, Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- [26] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert, E., (2009). "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays". IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 24, NO. 5, page(s): 1198 - 1208, Maio 2009.
- [27] Villalva, G. M., Gazoli, J. R., Ruppert, E., (2009). "Modeling and circuit-base simulation of photovoltaic arrays". Jornal Brasileiro of Power Electronics, vol14, no. 1, pp35-45. ISSN 1414-8862.
- [28] Moreira, A. P., Carvalho, P. C. M., Neto, M. R. B., Ramalho, G. L. B., Dias, S. V.. "Identificação da curva de máxima potencia de módulos FV utilizando softwares de simulação". Artigo, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Universidade Estadual de Campinas.
- [29] Photovoltaic module MSX 110 Datasheet. BP Solar.

- [30] Xiao, W., Lind, M. G. J., Dunford, W. G., Capel, A., (2006). "Real-Time Identification of Optimal Operating Points in Photovoltaic Power Systems". IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 53, NO. 4, page(s): 1017 - 1026, Agosto 2006.
- [31] The Newton-Raphson Method. Artigo, The University of British Columbia. Disponível em -www.math.ubc.ca/~ansteemath104/104newtonmethod.pdf.
- [32] Silva, M.M., (2003). Circuitos com Transistores Bipolares e MOS. Fundação Calouste Gulbenkian, ISBN 972-31-0840-2.
- [33] NI USB-6008, Datasheet. Disponível em www.ni.com.