

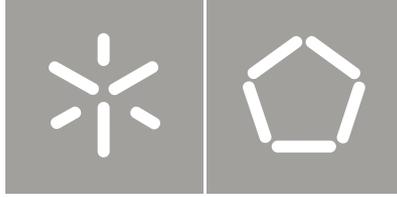


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Miguel Sousa Gomes
Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos elétricos

José Miguel Sousa Gomes

Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos elétricos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Miguel Sousa Gomes

Power-Film: Um filme flexível autónomo para
alimentar dispositivos elétricos

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

DECLARAÇÃO

José Miguel Sousa Gomes

Endereço eletrónico: a24617@alunos.uminho.pt Telemóvel: 937305556

Número do Bilhete de Identidade: 11526376

Título dissertação:

Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos elétricos

Orientador:

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Ano de conclusão: 2012

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Departamento de Eletrónica Industrial

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO,
MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação apenas foi possível com o apoio de várias pessoas e instituições às quais quero deixar o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar à minha esposa Cristina, pelo apoio e motivação, sem os quais não seria possível a realização desta dissertação.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Luís Gonçalves do Departamento de Eletrónica Industrial da Universidade do Minho, pelo apoio, disponibilidade, orientação científica e revisão da tese.

Aos meus amigos José Cruz e Nino Pereira pela cedência de equipamento de medição e equipamento de fabrico de placas de circuito impresso.

Ao Professor Doutor Carlos Tavares do Departamento de Física da Universidade do Minho pela cedência do radiómetro.

Ao Joaquim Jorge Peixoto do Departamento de Engenharia Têxtil pela ajuda na elaboração do ensaio físico.

Ao meu colega João Ribeiro do Departamento de Microeletrónica da Universidade do Minho pelas dicas preciosas.

Finalmente à minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio e motivação demonstrados durante o meu percurso académico.

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/EEA-ELC/114713/2009



Governo da República Portuguesa



UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



RESUMO

A procura crescente de energia em dispositivos sem fios requer novos sistemas de geração de energia, capazes de aproveitar a energia do ambiente e disponibilizá-la quando necessário. Esta geração de energia elétrica baseia-se essencialmente na termoelectricidade, na energia da vibração e na energia fotovoltaica. Relativamente à energia fotovoltaica, a corrente e potência de saída das células varia consideravelmente em função da intensidade e espectro de iluminação, e um sistema eficiente de geração de energia elétrica a partir desta fonte é de difícil obtenção, devido a condições de iluminação variáveis. Por outro lado, as baterias utilizadas para armazenamento de energia fornecem tensões que diminuem ao longo da descarga da bateria. Durante a carga da bateria, a tensão aplicada deve também ser adaptada à evolução do potencial elétrico da bateria e da carga armazenada.

Esta dissertação apresenta um sistema de geração de energia para dispositivos sem fios para superar estas limitações, proporcionando uma fonte de energia autónoma: um dispositivo de filme flexível para geração de energia fotovoltaica, que integra um painel fotovoltaico, uma bateria de lítio recarregável e eletrónica para carregar a bateria. Dado a reduzida potência deste filme, as técnicas convencionais de circuitos MPPT baseados em microcontrolador são ineficientes, e uma nova solução foi procurada.

O dispositivo é suficientemente flexível para ser aplicado em superfícies curvas, e fornecer energia elétrica a dispositivos sensores sem fios. O filme é composto por três partes:

- Um painel fotovoltaico de filme fino.
- Uma bateria de lítio recarregável flexível.
- Um circuito eletrónico de montagem superficial (SMD) de perfil reduzido, para recarregar a bateria.

Utilizando um painel fotovoltaico (com área inferior a 50 cm²) e uma bateria de lítio adquiridas no mercado, ambos flexíveis, desenvolveu-se o circuito eletrónico para recarregar a bateria de lítio utilizando a energia fornecida pelo painel fotovoltaico. O circuito foi desenvolvido em SMD, com espessura de alguns milímetros apenas, e em substrato (PCB) flexível. No final, os três substratos flexíveis (o painel fotovoltaico, a pilha e a eletrónica) foram integradas (em sanduíche) num único filme flexível.

ABSTRACT

The increasing demand of energy for wireless devices requires for new energy generation systems which can harvest energy from the environment, and supply it when necessary. This electric generation is provided mainly from thermoelectricity, energy from vibration and photovoltaic energy. Relative to photovoltaic energy, the current and power from the cells varies considerably by function of the intensity and illumination spectrum, and an efficient electric generator system based on this power source is difficult to project, mainly due to the varying illumination conditions. On the other hand, the batteries used to store energy see their voltage dropping with battery discharge. Through battery charge, the applied voltage must also be adapted to the evolution of the battery electric potential and stored charge.

This dissertation presents an energy generator system for wireless devices in order to overcome these limitations, by providing an autonomous energy source: a flexible film device for photovoltaic energy generation, consisting of a photovoltaic panel, a rechargeable lithium battery and electronics to charge the battery. Due to the reduced power, conventional MPPT technics based on microcontrollers are inefficient, and a different solution was adopted.

The device has the needed flexibility to be applied in curved surfaces, supplying energy to wireless sensor devices. This film consists of three parts:

- A thin film photovoltaic panel.
- A rechargeable thin flexible battery.
- An electronic surface mounted (SMD) circuit with low profile, for battery charge.

Using a photovoltaic panel (with an area below 50 cm²) and a lithium battery acquired in the market, both flexible, an electronic circuit was developed to recharge the lithium battery using the electric power provided by the photovoltaic panel. This circuit was developed in SMD, with a thickness of a few mm, in a flexible substrate (PCB). Finally the three substrates (photovoltaic panel, lithium battery and electronic circuit) were integrated (sandwiched), in a single flexible film.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
LISTA DE FIGURAS	XVII
LISTA DE TABELAS	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.3.1. <i>Tarefas</i>	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO AUTÓNOMOS.....	5
2.2. ORIGEM E EVOLUÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	7
2.3. HISTÓRIA DA BATERIA DE LÍTIO	12
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
3.1. TEORIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	17
3.1.1. <i>Funcionamento do painel fotovoltaico</i>	17
3.1.2. <i>Circuito equivalente da célula fotovoltaica</i>	19
3.1.3. <i>Rendimento da célula fotovoltaica</i>	21
3.1.4. <i>Fator de forma</i>	22
3.1.5. <i>Efeito da temperatura e irradiação solar na curva I-V</i>	23
3.1.6. <i>Adição de células fotovoltaicas em série</i>	24
3.2. TEORIA DA BATERIA DE LÍTIO	25
3.2.1. <i>Princípio de funcionamento da bateria de lítio</i>	25
3.3. TÉCNICAS DE CARGA DE BATERIAS.....	27
3.3.1. <i>Método da Corrente Constante</i>	27
3.3.2. <i>Método da Tensão Constante</i>	28

3.3.3.	<i>Método da Corrente Constante – Tensão Constante</i>	28
3.3.4.	<i>Método de Impulsos de Corrente</i>	29
3.3.5.	<i>Método de Carga Refletiva</i>	30
3.4.	PROTEÇÃO DE BATERIAS	30
3.5.	CONVERSORES DC-DC	31
3.5.1.	<i>Teoria do conversor DC-DC</i>	31
3.5.2.	<i>Conversor Step-Down (Buck)</i>	36
3.5.3.	<i>Conversor Step-Up (Boost)</i>	38
3.5.4.	<i>Conversor Buck-Boost</i>	39
3.6.	ALGORITMOS DE SEGUIMENTO DE POTÊNCIA MÁXIMA – MPPT	40
3.6.1.	<i>Função do algoritmo de potência máxima</i>	40
3.6.2.	<i>Método da Tensão Constante</i>	41
3.6.3.	<i>Método da Tensão em Aberto (OV)</i>	42
3.6.4.	<i>Método da Corrente de Curto-circuito (SC – Short Current)</i>	43
3.6.5.	<i>Método de Perturba e Observa (P&O – Perturbe and Observe)</i>	44
3.6.6.	<i>Método da Condutância Incremental</i>	46
3.7.	SUBSTRATOS	49
3.7.1.	<i>Polidimetilsiloxano (PDMS)</i>	49
3.7.2.	<i>PCB flexível</i>	51
4.	PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES	53
4.1.	COMPONENTES	53
4.1.1.	<i>Bateria</i>	53
4.1.2.	<i>Painel fotovoltaico</i>	54
4.1.3.	<i>Conversor DC-DC</i>	55
4.1.4.	<i>IC de proteção da bateria</i>	56
4.2.	ESTUDO DO PAINEL FOTOVOLTAICO	56
4.2.1.	<i>Escolha do valor de V_{MPP}</i>	59
4.3.	CIRCUITO DO CONVERSOR DC-DC	62
4.4.	CIRCUITO DE PROTEÇÃO DA BATERIA	64
4.5.	CIRCUITO FINAL	65
4.6.	MONTAGEM E TESTES DO CIRCUITO PROPOSTO	66
4.6.1.	<i>Influência do valor da indutância do conversor DC-DC no rendimento</i>	67
4.6.2.	<i>Escolha da indutância para o conversor DC-DC</i>	69
5.	CONSTRUÇÃO E CARATERIZAÇÃO DO POWER-FILM	73
5.1.	CONSTRUÇÃO DO POWER-FILM	73
5.2.	CARATERIZAÇÃO DO POWER-FILM	75
5.2.1.	<i>Potência e Rendimento do Power-Film</i>	75

5.2.2.	<i>Comportamento do Power-Film a alimentar uma carga</i>	76
5.2.3.	<i>Carga completa da bateria interna do Power-Film</i>	78
5.2.4.	<i>Potência versus curvatura do Power-Film</i>	79
5.2.5.	<i>Ensaio de flexão de 3 pontos</i>	80
5.3.	ANÁLISE DE RESULTADOS	82
6.	CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	85
6.1.	CONCLUSÃO	85
6.2.	TRABALHO FUTURO.....	86
7.	BIBLIOGRAFIA	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Lista de abreviaturas e siglas	Inglês	Português
PCB	Printed circuit board	Placa de circuito impresso
CCM	Continuous conduction mode	Modo de condução contínuo
CV	Constant voltage	Tensão constante
DC	Direct current	Corrente contínua
DCM	Discontinuous conduction mode	Modo de condução descontínuo.
DIP	Dual inline package	-
FF	Fill factor	Fator de forma
IC	Integrated circuit	Circuito integrado
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor	Transistor de efeito de campo metal-óxido
MPPC	Maximum power point control	Controlo do ponto de potência máxima
MPPT	Maximum power point tracker	Procura do ponto de potência máxima
MSOP	Mini small outline plastic	-
PDMS	Polidimetilsyloxane	Polidimetisiloxano
PTFE	polytetrafluoroideethylene	politetrafluoroetileno
PWM	Pulse width modulation	Modulação por largura de pulso
SC	Short current	Corrente de curto-circuito
SMD	Surface mounted devices	Tecnologia de montagem superficial

LISTA DE SÍMBOLOS

Lista de símbolos	
η	Rendimento
E	Irradiação solar
E_{GAP}	Energia
I	Corrente
k	10^3
K	Constante
Li ⁺	ião de lítio
m	Fator de idealidade do díodo
n	Negativo
p	Positivo
P	Potência
q	Carga elétrica do eletrão
R	Resistência
T	Temperatura
V	Tensão
δ	Dutty cycle

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: ESQUEMA DO POWER-FILM.....	3
FIGURA 2.1: A) BATERIA DE FILME FINO EM ESTADO SÓLIDO DA CYMBET; B) KIT DE CAPTURA DE ENERGIA SOLAR DA CYMBET; C) SENSOR DE PRESSÃO E TEMPERATURA DESENVOLVIDO NA UNIVERSIDADE DO MICHIGAN.....	6
FIGURA 2.2: PROTÓTIPO DA MAXIM: A) LADO COM A BATERIA; B) LADO COM PAINEL FOTOVOLTAICO E CIRCUITO DE GESTÃO DE ENERGIA.....	7
FIGURA 2.3: ALEXANDRE-EDMOND BECQUEREL, O DESCOBRIDOR DO EFEITO FOTOVOLTAICO.....	8
FIGURA 2.4: PRIMEIRA BATERIA SOLAR BELL.....	9
FIGURA 2.5: PAINEL FOTOVOLTAICO CIGS COM RENDIMENTO DE 18,7%	11
FIGURA 2.6: BATERIAS DE LIPO POWERSTREAM COM 0,6MM DE ESPESURA.....	14
FIGURA 2.7: CORTE TRANSVERSAL DE UMA BATERIA DE FILME FINO EM ESTADO SÓLIDO.	15
FIGURA 3.1: A) COMPOSIÇÃO MOLECULAR DO SILÍCIO; B) DOPAGEM COM BORO; C) DOPAGEM COM FÓSFORO.	18
FIGURA 3.2: FUNCIONAMENTO DA CÉLULA SOLAR.	18
FIGURA 3.3: RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA E ENERGIA DE BAND-GAP.....	19
FIGURA 3.4: CIRCUITO EQUIVALENTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.	19
FIGURA 3.5: CURVA I-V TÍPICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.	21
FIGURA 3.6: PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	21
FIGURA 3.7: EFEITO DA DIMINUIÇÃO DO FATOR DE FORMA.....	23
FIGURA 3.8: EFEITO DA TEMPERATURA NO FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.	23
FIGURA 3.9: EFEITO DA IRRADIAÇÃO SOLAR NA CURVA I-V DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.	24
FIGURA 3.10: LIGAÇÃO EM SÉRIE DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	24
FIGURA 3.11: DENSIDADE ENERGÉTICA DE VÁRIOS TIPOS DE BATERIAS.....	25
FIGURA 3.12: CARGA E DESCARGA DA BATERIA DE LÍTIU.....	26
FIGURA 3.13: MÉTODO DA TENSÃO CONSTANTE	28
FIGURA 3.14: MÉTODO DA CORRENTE CONSTANTE – TENSÃO CONSTANTE.	29
FIGURA 3.15: A) BATERIA DE LIPO COM CIRCUITO DE PROTEÇÃO; B) ESQUEMA DO CIRCUITO DE PROTEÇÃO.	31
FIGURA 3.16: CURVAS I-V PARA 4 TIPOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS DE 75 Wp.....	31
FIGURA 3.17: FORNECIMENTO DE ENERGIA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO A UMA CARGA RESISTIVA.....	32
FIGURA 3.18: LIGAÇÃO DE UM CONVERSOR DC-DC ENTRE O PAINEL E A CARGA.....	32
FIGURA 3.19: CONVERSOR DC-DC LINEAR.....	33
FIGURA 3.20: EFEITO DA VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DA CARGA.....	35
FIGURA 3.21: COMPORTAMENTO DAS 3 PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DE CONVERSOR DC-DC.....	36
FIGURA 3.22: CIRCUITO DC-DC STEP-DOWN (BUCK).....	37
FIGURA 3.23: CIRCUITO DC-DC STEP-UP (BOOST).....	38
FIGURA 3.24: CIRCUITO DC-DC BUCK-BOOST	39
FIGURA 3.25: FLUXOGRAMA DO MÉTODO DA TENSÃO CONSTANTE.....	41

FIGURA 3.26: FLUXOGRAMA DO MÉTODO DA TENSÃO EM ABERTO.	43
FIGURA 3.27: FLUXOGRAMA DO MÉTODO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.	44
FIGURA 3.28: FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE PERTURBA E OBSERVA.	45
FIGURA 3.29: PROCURA DO MÉTODO PERTURBA E OBSERVA.	46
FIGURA 3.30: ALGORITMO DO MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL.	48
FIGURA 3.31: ESTRUTURA QUÍMICA DO PDMS.	49
FIGURA 3.32: AMOSTRA DE PDMS NO ESTADO LÍQUIDO.	50
FIGURA 3.33: MÓDULO DE YOUNG TÍPICO PARA UMA AMOSTRA DE PDMS.	50
FIGURA 3.34: PCB FLEXÍVEL. A) LADO COM COBRE, B) LADO COM POLIIMIDA.	52
FIGURA 3.35: DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO REALIZADO.	53
FIGURA 3.36: CURVAS DE DESCARGA PARA UMA BATERIA DE 55 MAH DO FABRICANTE POWERSTREAM.	54
FIGURA 3.37: CURVAS I-V DO PAINEL FOTOVOLTAICO MP3-37 DA POWERFILM SOLAR PARA 100% E 25% DA IRRADIAÇÃO SOLAR.	55
FIGURA 3.38: PRINCIPAIS COMPONENTES DO CIRCUITO: A) PAINEL FOTOVOLTAICO, B) BATERIA DE LÍTIO FLEXÍVEL, C) IC'S DE CONTROLO E PROTEÇÃO.	56
FIGURA 3.39: EFEITO DA TEMPERATURA NA CURVA I-V DO PAINEL FOTOVOLTAICO.	57
FIGURA 3.40: CURVAS I-V E DE POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO PARA VÁRIAS INTENSIDADES DE IRRADIAÇÃO SOLAR.	59
FIGURA 3.41: POTÊNCIA Vs. V_{MPP}	60
FIGURA 3.42: RENDIMENTO Vs. V_{MPP}	60
FIGURA 3.43: VALORES DE V_{MPP} QUE PROPORCIONAM POTÊNCIA SUPERIOR COM BAIXA IRRADIAÇÃO SOLAR.	61
FIGURA 3.44: VALORES DE MPP QUE PROPORCIONAM RENDIMENTO SUPERIOR COM BAIXA IRRADIAÇÃO SOLAR.	61
FIGURA 3.45: EFICIÊNCIA DO CONVERSOR DC-DC Vs. TENSÃO DE ENTRADA.	62
FIGURA 3.46: CIRCUITO RECOMENDADO PARA O CIRCUITO INTEGRADO LTC3105.	63
FIGURA 3.47: CIRCUITO RECOMENDADO PARA O CIRCUITO INTEGRADO LTC4071.	64
FIGURA 3.48: CIRCUITO FINAL.	66
FIGURA 3.49: LUXÍMETRO (À ESQUERDA) E RADIÓMETRO (À DIREITA) COM AS CÉLULAS NO PLANO DO PAINEL FOTOVOLTAICO.	66
FIGURA 3.50: VALORES MÍNIMOS DE CORRENTE DE ARRANQUE E IRRADIAÇÃO SOLAR Vs. VALOR DA INDUTÂNCIA.	67
FIGURA 3.51: POTÊNCIA DE CARGA Vs. IRRADIAÇÃO SOLAR PARA INDUTÂNCIAS DE 13 UH E 47 UH.	68
FIGURA 3.52: RENDIMENTO Vs. IRRADIAÇÃO SOLAR PARA INDUTÂNCIAS DE 13 UH E 47 UH.	68
FIGURA 3.53: INFLUÊNCIA DA INDUTÂNCIA UTILIZADA NO RENDIMENTO DO CIRCUITO.	70
FIGURA 3.54: COMBINAÇÃO DE INDUTÂNCIAS QUE PROPORCIONAM MELHOR RENDIMENTO PARA VALORES DE IRRADIAÇÃO INFERIORES.	70
FIGURA 3.55: COMBINAÇÃO DE INDUTÂNCIAS QUE PROPORCIONAM MAIOR POTÊNCIA DE CARGA PARA VALORES DE IRRADIAÇÃO INFERIORES.	71
FIGURA 3.56: POTÊNCIA FORNECIDA DURANTE UM DIA Vs. INDUTÂNCIAS.	71
FIGURA 3.57: CORRENTE DE ARRANQUE Vs. INDUTÂNCIA.	72
FIGURA 3.58: ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENHADO NO SOFTWARE DE CAD EAGLE.	73
FIGURA 3.59: CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO. A) EXPOSIÇÃO A UV'S; B) REVELAÇÃO DA PLACA PCB; C) PCB PRONTO PARA SOLDA; D) APLICAÇÃO DE PDMS; E) PROTÓTIPO FINAL; F) ESPESSURA MÁXIMA.	74

FIGURA 3.60: COMPORTAMENTO DO POWER-FILM AO LONGO DE UM DIA DE SOL.....	75
FIGURA 3.61: COMPARAÇÃO ENTRE O POWER-FILM E O PAINEL COM BATERIA SEM CONTROLO.....	76
FIGURA 3.62: POWER-FILM A ALIMENTAR UMA CARGA VARIÁVEL.....	77
FIGURA 3.63: CARGA DA BATERIA INTERNA DO POWER-FILM.....	78
FIGURA 3.64: POTÊNCIA Vs. CURVATURA DO POWER-FILM.....	79
FIGURA 3.65: DINAMÓMETRO HOUNSFIELD H100KS.....	80
FIGURA 3.66: FASES DO ENSAIO DE FLEXÃO DE 3 PONTOS.....	80
FIGURA 3.67: ENSAIO DE FLEXÃO DE 3 PONTOS: RESPOSTA AOS PRIMEIROS 5 ENSAIOS.....	81
FIGURA 3.68: ENSAIO DE FLEXÃO DE 3 PONTOS: RESPOSTA AOS 55 ENSAIOS FINAIS.....	81

LISTA DE TABELAS

\TABELA 2.1: DENSIDADE ENERGÉTICA DE VÁRIOS TIPOS DE TRANSDUTORES.	5
TABELA 2.2: MATERIAIS CONSTITUINTES DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.	10
TABELA 2.3: DATAS RELEVANTES NA HISTÓRIA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	11
TABELA 2.4: VANTAGENS E DESVANTAGENS DA BATERIA DE LI-PO COMPARATIVAMENTE ÀS LI-ION.	14
TABELA 2.5: PRINCIPAIS TIPOS DE MATERIAIS CONSTITUINTES DA BATERIA DE LÍTIO DE FILME FINO.....	15
TABELA 3.1: VANTAGENS E INCONVENIENTES DOS CONVERSORES DC-DC COMUTADOS.	33
TABELA 3.2: COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE MPPT.....	49
TABELA 3.3: CARATERÍSTICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO MP3-37 DA POWERFILM SOLAR.....	54
TABELA 3.4: INDUTÂNCIAS SMD TESTADAS.	69
TABELA 3.5: CARATERÍSTICAS DO POWER-FILM.	86

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Esta tese de dissertação está inserida na última fase do ciclo de estudos do curso de Mestrado Integrado em Engenharia de Eletrónica Industrial e Computadores, e tem por objetivo a realização de um trabalho individual de investigação e/ou desenvolvimento. Esta unidade curricular apresenta-se com o intuito de desenvolver a capacidade de iniciativa, criação e desenvolvimento por parte do lecionando, assim como a sua análise crítica.

A presente dissertação enquadra-se no perfil de microeletrónica, e tem por objetivo a criação e desenvolvimento de um módulo de alimentação autónomo de dimensões reduzidas e elevada adaptabilidade física, recorrendo a energia fotovoltaica.

1.2. Motivação

A geração e armazenamento de energia elétrica são duas áreas onde a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias são pontos fulcrais para dar resposta à incessante escalada do consumo energético. Entre as medidas adotadas com o objetivo de reduzir os consumos, o constante aumento da eficiência energética dos equipamentos permite a realização de fontes de alimentação de baixa potência e elevada flexibilidade de integração.

O recurso a sistemas de energia autónomos com a capacidade de obter energia elétrica a partir do meio ambiente permite o uso de equipamentos eletrónicos, principalmente sensoriais, em locais de difícil acesso, onde não existe uma fonte de energia pronta a ser utilizada. Fontes de energia renováveis apresentam-se como solução para o problema energético destes equipamentos, onde a constante evolução em termos de miniaturização e adaptabilidade física, condiciona as características da fonte de energia não só em termos de autonomia e eficiência, como de flexibilidade de adaptação.

Entre todas as energias renováveis, a energia fotovoltaica surge como uma das que apresenta maior potencial. A disponibilidade global da luz solar e o constante desenvolvimento das células fotovoltaicas

permite a criação sistemas de alimentação com rendimento energético cada vez mais elevado, capazes de fornecer energia para as mais variadas aplicações.

Um painel fotovoltaico, além de fornecer energia apenas quando incide luz na sua superfície, apresenta um rendimento que é severamente condicionado pela intensidade luminosa e pela carga a alimentar. Uma fonte de alimentação autónoma com recurso ao uso de painéis fotovoltaicos deverá ser projetada para fornecer energia de forma contínua mesmo na ausência de luz solar, sendo que os requisitos mínimos para a sua construção deverão passar pela inclusão de uma bateria recarregável. Um circuito de gestão de energia devidamente dimensionado deverá ser implementado com a função de extrair a máxima potência disponível pelo painel solar, independentemente das condições meteorológicas e da potência requerida pela carga.

1.3. Objetivos

Utilizando um painel fotovoltaico (com área inferior a 50 cm²) e uma bateria de lítio adquiridas no mercado, ambos flexíveis, pretende-se desenvolver o circuito eletrónico para recarregar a bateria de lítio utilizando a energia disponível no painel fotovoltaico. O circuito será desenvolvido em SMD, com espessura de alguns milímetros apenas, e em substrato (PCB) flexível. No final, os três substratos flexíveis (o painel fotovoltaico, a bateria e a eletrónica) serão integrados (em sanduíche) num único filme flexível.

1.3.1. Tarefas

- Estudo dos painéis fotovoltaicos e das pilhas de lítio.
- Aquisição de baterias e painéis fotovoltaicos flexíveis.
- Estudo do estado da arte dos conversores MPPT e carga de baterias.
- Projeto, implementação, teste e caracterização do circuito MPPT para carga de bateria.
- Otimização do circuito.
- Desenho e fabrico do circuito em substrato flexível.
- Testes e otimização.
- Integração da eletrónica com bateria e painel fotovoltaico flexíveis
- Teste de robustez mecânica
- Escrita de relatório e artigo.

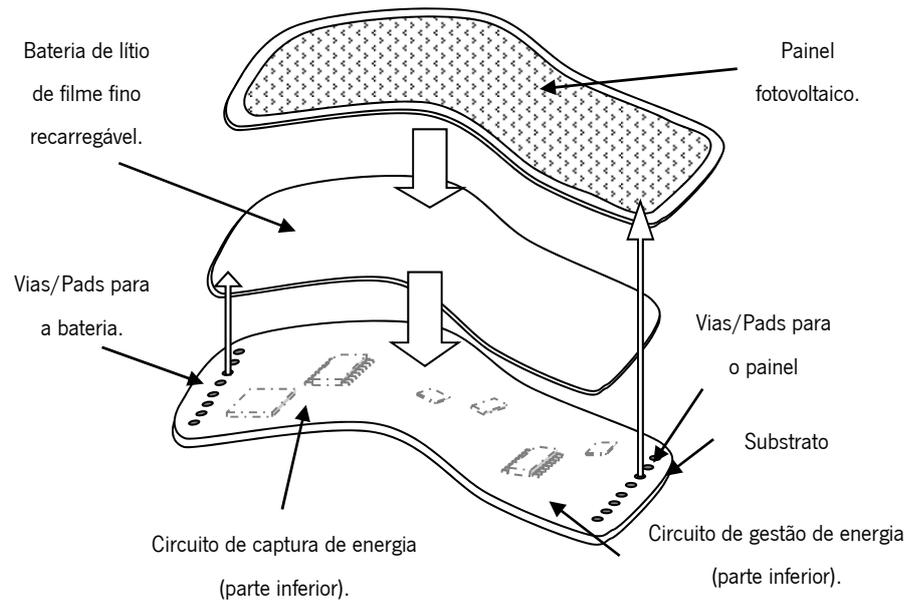


Figura 1.1: Esquema do Power-Film.

1.4. Organização da tese

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. O primeiro capítulo faz o enquadramento da dissertação, enumera os motivos que levaram à sua concretização, define os objetivos e a sua organização. O segundo capítulo apresenta o estado da arte dos sistemas de energia autônomos que recorrem à energia fotovoltaica e aborda a evolução dos painéis fotovoltaicos e das baterias de lítio.

No terceiro capítulo são descritos os princípios de funcionamento da bateria de lítio e do painel fotovoltaico. É apresentado um levantamento das técnicas de carga de baterias mais comuns, métodos de proteção de baterias, conversores DC-DC, algoritmos de MPPT e tipos de substratos flexíveis.

O quarto capítulo apresenta a escolha e descrição dos componentes, o dimensionamento e implementação do circuito, assim como os testes efetuados.

O quinto capítulo mostra a construção do protótipo, resultados dos testes efetuados e sua análise.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões e define-se o trabalho futuro.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Sistemas de alimentação autónomos

O uso de equipamentos sem fios está cada vez mais presente não só no quotidiano das pessoas como na indústria em geral. A fonte de energia local inerente a este tipo de equipamentos dota-os da flexibilidade necessária para o seu uso nas mais diversas aplicações, residindo a grande desvantagem na baixa autonomia, havendo necessidade de intervenção para recarregamento ou substituição. A energia fotovoltaica surge como uma das principais fontes de energia a ter em conta quando existe a necessidade de alimentar equipamentos eletrónicos de reduzidas dimensões. O painel fotovoltaico, componente fulcral na conversão de energia solar em energia elétrica, é um dos transdutores que apresenta, em média, valores mais elevados de densidade energética, como mostra a Tabela 2.1 [1].

Tabela 2.1: Densidade energética de vários tipos de transdutores.

Densidade energética de vários tipos de transdutores	
Transdutor	Densidade energética
Células fotovoltaicas (no exterior ao meio dia)	15 mW/cm ²
Piezoelétrico (implantes no calçado)	330 uW/cm ³
Termoelétrico (gradiente de 10°C)	40 uW/cm ³
Som acústico (100dB)	960 nW/cm ³

Com o objetivo de construir um sistema virtualmente autónomo do ponto de vista energético, Roger G. Little submeteu em 1988 uma patente para a construção integrada de uma bateria de filme fino em estado sólido, juntamente com uma célula fotovoltaica, recorrendo a métodos de deposição. Neste sistema a célula fotovoltaica convertia a energia solar em energia elétrica para carregar a bateria [2].

Em 2007 investigadores da Universidade de Johannes Kepler, situada na cidade de Linz na Áustria, e da Universidade de Tecnologia, situada na cidade de Tallinn na Estónia, desenvolveram, em cooperação com várias empresas, um conjunto de procedimentos para a construção de um protótipo consistindo numa bateria de polímeros de lítio, com a função de auto-recarga. Esta característica era possível através da integração de uma célula fotovoltaica flexível juntamente com um circuito de gestão de carga [3].

Em 2009 a cooperação entre investigadores de várias universidades dinamarquesas deu origem à criação e desenvolvimento de uma fonte de energia luminosa de baixo custo. O protótipo era constituído por um painel fotovoltaico flexível, leds e duas baterias de polímeros de lítio flexíveis. O painel fotovoltaico, além de permitir a carga das baterias através de um diodo, servia também de substrato para todo o circuito elétrico [4].

Investigadores da Universidade do Michigan desenvolveram em 2010 um sensor de pressão e temperatura autónomo com apenas 8,75 mm³, composto por duas células solares de 1mm² em série, uma bateria de 12 µAh da empresa Cymbet, uma unidade integrada de gestão de energia e uma unidade de processamento e memória. Uma das aplicações alvo deste sistema autónomo consistia na monitorização da pressão e temperatura do globo ocular [5].

Atualmente a empresa Cymbet apresenta várias soluções de sistemas de energia autónomos, baseados em energias renováveis. Os módulos CBC3105, CBC3112 e CBC3150 são constituídos por uma bateria de filme fino em estado sólido de 5 µAh, 12 µAh e 50 µAh respetivamente, com módulo de gestão de energia integrado. A estes kits podem ser acoplados painéis solares de reduzidas dimensões como fonte de energia. A Cymbet fornece também kits de desenvolvimento, como no caso do CBC-EVAL-08, que consiste num painel solar, módulo de gestão de energia e duas baterias de 50 µAh ligadas em paralelo [6].

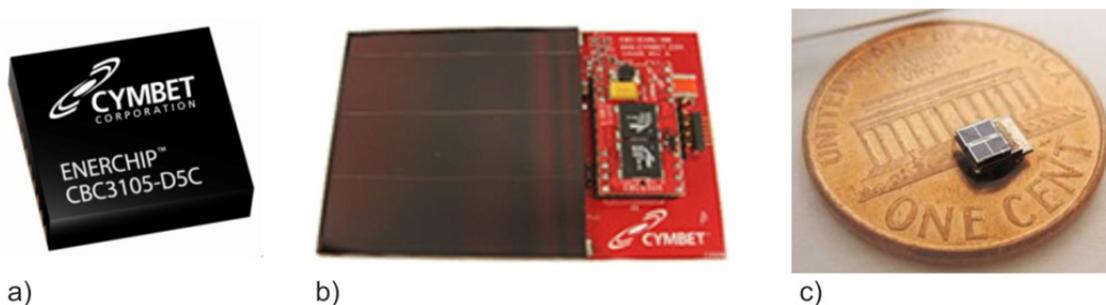


Figura 2.1: a) Bateria de filme fino em estado sólido da Cymbet; b) Kit de captura de energia solar da Cymbet; c) Sensor de pressão e temperatura desenvolvido na Universidade do Michigan.

A empresa Infinite Power Solutions, fabricante de baterias de filme fino em estado sólido flexíveis e recarregáveis, disponibiliza um kit de avaliação constituído por uma bateria de 0,7 mAh, pelo circuito integrado 17710 da Maxim com a função de gestão energética, e um painel solar. Este kit aceita na entrada valores de tensão entre 0,2 V e 5 V, e produz 150 mW de potência máxima [7].

A empresa Maxim apresentou uma solução integrada em formato de cartão de crédito, usando o mesmo circuito integrado 17710, uma bateria flexível da marca Infinite Power Solutions de 4 V e 1 mAh de capacidade, e um painel solar.

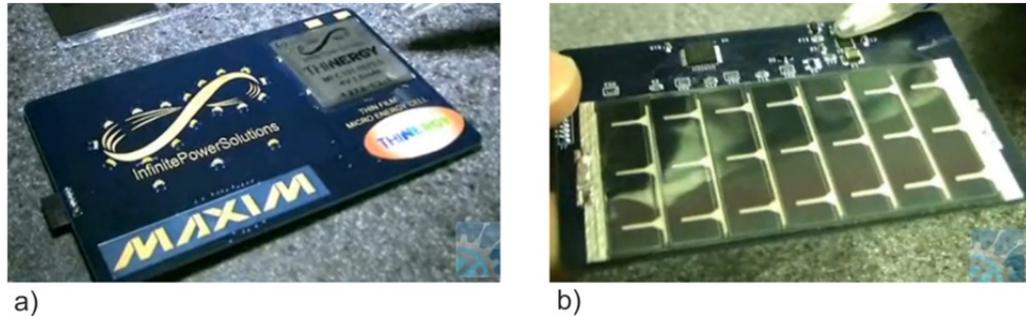


Figura 2.2: Protótipo da Maxim: a) Lado com a bateria; b) Lado com painel fotovoltaico e circuito de gestão de energia.

Com uma finalidade mais específica, a empresa Silicon Labs comercializa um kit que consiste num módulo wireless que envia os valores previamente monitorizados de temperatura, luminosidade e carga da bateria, para um computador. Um painel solar, bateria e circuito de gestão de energia permitem o funcionamento do kit de forma autónoma [8].

2.2. Origem e evolução da célula fotovoltaica

O efeito fotovoltaico consiste na transformação de energia luminosa em tensão elétrica [9]. Este fenómeno foi observado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel Figura 2.3 em 1839 [10], ao realizar uma experiência utilizando elétrodos de platina revestidos com cloreto de prata, numa solução condutora de ácido nítrico. Ao expor um dos elétrodos à luz solar, verificou um aumento do potencial elétrico entre os dois elétrodos.



Figura 2.3: Alexandre-Edmond Becquerel, o descobridor do efeito fotovoltaico.

Na década de 1870 ocorreram duas descobertas de relevo: Em 1873 Willoughby Smith descobriu a fotocondutividade do selênio quando efetuava testes em cabos de submarinos:

“Being desirous of obtaining a more suitable high resistance for use at the Shore Station in connection with my system of testing and signalling during the submersion of long submarine cables, I was induced to experiment with bars of selenium - a known metal of very high resistance. I obtained several bars, varying in length from 5 cm to 10 cm, and of a diameter from 1.0 mm to 1.5 mm. Each bar was hermetically sealed in a glass tube, and a platinum wire projected from each end for the purpose of connection. (...) While investigating the cause of such great differences in the resistance of the bars, it was found that the resistance altered materially according to the intensity of light to which they were subjected” [11].

A segunda grande descoberta ocorreu em 1876 quando William Grylls Adams e Richard Evans Day descobriram que o selênio produzia eletricidade perante a incidência de luz [12].

A primeira célula fotovoltaica foi criada em 1883 por Charles Fritts, um inventor norte-americano, ao aplicar uma camada extremamente fina de ouro num material semicondutor, o selênio, resultando numa célula fotovoltaica cujo rendimento se situava abaixo de 1% [13].

Embora tenha sido Russell Ohl que em 1946 submeteu a patente da primeira célula solar de silício [14], a realização da primeira célula fotovoltaica de utilização prática constituída por silício foi atribuída ao químico Calvin Fuller, auxiliado pelo engenheiro Daryl Chapin e pelo físico Gerald Pearson, que

trabalhavam nos laboratórios da empresa “Bell Laboratories” em 1954 [15]. Esta célula apresentava rendimentos na ordem dos 6%.

Em 1955 a célula fotovoltaica de silício produzida pela empresa Bell (Figura 2.4) [16], teve a sua primeira aplicação prática numa rede telefónica em Américus, Georgia (EUA) [17].



Figura 2.4: Primeira bateria solar Bell

Devido aos custos de produção elevados e à baixa rentabilidade dos painéis solares, a sua aplicação prática não teve sucesso, com exceção para a indústria aeroespacial, que viu nos painéis solares uma fonte de energia para alimentar satélites [18] [19]. O uso de silício monocristalino implicava custos de produção elevados, além do processo de fabrico gerar muito desperdício durante o corte do silício em finas bolachas (*wafers*). Apenas na década de 70, devido à crise energética, a pesquisa e desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos voltaram a receber atenção por parte das indústrias [20]. O fabrico das células fotovoltaicas passou a incluir silício policristalino ou amorfo, menos exigentes no custo de produção, e descobriram-se novos métodos de produção de silício diretamente em filme fino, diminuindo o desperdício de material. A deposição dos contactos eléctricos por serigrafia e deposição por evaporação de materiais em vácuo permitiu baixar ainda mais o custo de produção [21].

Fundada em 1973 por Joseph Lindmeyer e Peter Varadi, a Solarex (atual BP Solar) foi uma das primeiras empresas a disponibilizar painéis fotovoltaicos para o público em geral, surgindo aplicados em boias de navegação e sistemas de telecomunicações [22].

Atualmente são vários os tipos de células fotovoltaicas existentes no mercado, sendo que a sua designação advém do principal material que o constitui. A tabela 1 enumera os principais tipos de células [23] [24] [25], assim como as suas principais vantagens e desvantagens:

Tabela 2.2: Materiais constituintes das células fotovoltaicas.

Principais materiais constituintes das células fotovoltaicas		
Material	Vantagens	Desvantagens
Silício cristalino (c-Si)	Rendimento elevado	Custos de produção elevados
Silício Amorfo (a-Si)	Custos de produção reduzidos	Baixo rendimento; Sofre degradação
Silício Policristalino	Custos de produção inferiores ao silício cristalino	Rendimento inferior ao silício cristalino
Telureto de Cádmio (CdTe) e Sulfeto de Cádmio (CdS)	Rendimento teórico elevado; Baixo custo de fabrico	Atualmente com baixo rendimento; Materiais poluentes
Arsieneto de Gálio (GaAs)	Elevado rendimento	Custos de produção elevados
CIGS – Cobre Índio Gálio Selénio – [Cu(In,Ga)Se ₂]	Elevada tolerância à radiação; Elevado rendimento	Uso de materiais raros (índio). Custos de produção elevados

Embora atualmente a tecnologia predominante seja de substrato rígido, os painéis fotovoltaicos de filme fino flexível apresentam-se como sendo uma tendência generalizada [26] [27] [28] [29] [30]. As vantagens deste tipo de painel são:

- Elevada flexibilidade.
- Elevada resistência.
- Baixo peso.
- Facilidade de integração em diversos tipos de superfícies.
- Baixo custo.

Os principais materiais de baixo custo utilizados no fabrico deste tipo de células são o Silício Amorfo (a-Si), Telureto de Cádmio (CdTe) e Cobre Índio Gálio Selénio (CIGS) [27]. A Figura 2.5 mostra um painel fotovoltaico flexível de elevado rendimento constituído por CIGS [31].



Figura 2.5: Painel fotovoltaico CIGS com rendimento de 18,7%

O material semicondutor pode ser impresso num substrato metálico [28] ou de polímero [29] altamente flexíveis. O rendimento energético para os módulos CIGS em substrato de polímero já registou valores relativamente elevados, 18,7% [31] e 19,9% [32], estando muito próximos do rendimento de 25% apresentado pelos módulos de silício [33], embora ainda muito longe do rendimento teórico máximo de 87% [34]. Na Tabela 2.3 estão presentes as datas mais marcantes na história da energia fotovoltaica [35].

Tabela 2.3: Datas relevantes na história da energia fotovoltaica.

Datas relevantes na história de célula fotovoltaica	
Ano	Evento
1839	Edmund Becquerel, físico experimental francês, descobre o efeito fotovoltaico num eletrólito
1873	Willoughby Smith descobre o efeito fotovoltaico num material semicondutor, o Selénio.
1876	Adams e Day detetam igualmente o fenómeno no Selénio e constroem a primeira célula fotovoltaica com rendimento estimado de 1%
1883	Charles Fritts, um inventor americano, descreve as primeiras células solares construídas a partir de camadas “wafers” de Selénio
1887	Heinrich Hertz descobre a influência da radiação ultravioleta na descarga elétrica entre dois elétrodos de metal
1904	Hallwachs descobre que algumas combinações de metais são sensíveis à luz.
1914	Nesta altura já se conhecia a existência de uma barreira de potencial em dispositivos fotovoltaicos
1916	Millikan fornece a prova experimental do efeito fotoelétrico.
1918	O cientista polaco Czochralski desenvolve um processo de crescimento de cristais de Silício (Si) a partir de um único cristal
1923	Albert Einstein recebeu o prémio Nobel pelos trabalhos do efeito fotoelétrico.
1940-50	Desenvolve-se o método Czochralski para obtenção de Si de elevado grau de pureza, sob a forma de lingote mono cristalino, para fins industriais

1951	O desenvolvimento de uma junção n-p permitiu a produção de células a partir de um único cristal
1954	Realização prática da primeira célula solar de Si mono cristalino (Pearson, Fuller, Chapin). Descoberta do efeito fotovoltaico no Arsenieto de Gálio (GaAs) por Welker, e em cristais de Sulfureto de Cádmio (CdS) por Reynolds e Leies
1956	Primeiras aplicações terrestres da conversão fotovoltaica (luzes de flash, boias de navegação, telecomunicações)
1958	Primeiras aplicações espaciais satélite VANGUARD-1, que continuaram com o satélite EXPLORER-6 e na nave espacial NIMBUS
1959	Realização das primeiras células de Si multi-cristalino
1963	No Japão é instalado num farol um sistema fotovoltaico com 242 Wp (a maior do mundo nessa altura)
1964	Com um sistema de 470 Wp, o observatório ORBITING (1966) com 1 kWp e o satélite OVI-13 (1968), lançado com dois painéis de CdS
1972	Com tecnologia de células CdS, foi instalado pela França, na cidade de Niger, um sistema que alimentava uma televisão difundindo a Telescola
1976	Fabrico das 1 ^{as} células de Si amorfo (Carlson e Wronski)
1981-83	São instalados sistemas de demonstração, vocacionados para aplicações de eletrificação de edifícios, produção de água potável, etc.
1982	A produção mundial fotovoltaica ultrapassa os 9,3 MW e segue a tendência de crescimento exponencial

2.3. História da bateria de lítio

A bateria de lítio começou a ser estudada em 1913 por Gilbert Newton Lewis ao usar pela primeira vez elétrodos compostos por lítio [36]. Em 1958, devido à crescente procura de pilhas de alta densidade, W. S. Harris criou o primeiro sistema de pilhas de lítio ao estudar a solubilidade e condutibilidade de sais inorgânicos, fazendo uso de um ânodo de lítio e um cátodo composto por carbono [37]. Em 1962, estudos revelavam que para se obter um potencial elevado de 3 V, o cátodo teria de ser constituído por um forte agente oxidante, como o MnO_2 (dióxido de manganês). Anos mais tarde, na década de 70, a empresa Sanyo lançou para o mercado a primeira pilha de lítio primária (não recarregável) representativa [38], composta por Li-MnO_2 [39].

A bateria de lítio secundária (recarregável) começou a ser fabricada pela Exxon Company em 1970, e apresentava um cátodo composto por dissulfato de lítio e titânio (LiTiS_2). Em 1980, a empresa Moli Energy comercializou baterias de lítio com cátodos de LiMoS_2 com densidade gravimétrica de 61 Wh/kg. Rapidamente ambas deixaram de ser comercializadas devido ao reduzido número de ciclos de

carga que facultavam. Alguns anos mais tarde foi a vez da empresa Taridan usar um cátodo de LiMnO_2 . Esta bateria apresentava uma densidade gravimétrica superior, na ordem dos 230 Wh/kg, mas rapidamente deixou de ser produzida devido a questões de segurança [37].

Em 1991 a empresa Sony introduziu no mercado a primeira bateria de iões de lítio (Li-Ion) [40]. Esta bateria de óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2) apresentava uma tensão em aberto de 4,2 V e uma tensão de funcionamento de 3,6 V [41]. A bateria de Li-Ion difere da bateria de lítio convencional na medida em que o ânodo passa a ser constituído por um composto carbónico em detrimento do lítio metálico. Um ião de lítio (Li^+) é um átomo dotado de carga elétrica positiva, resultado da perda de um eletrão.

A bateria de iões de lítio apresenta numerosas vantagens relativamente a outras baterias recarregáveis [42]:

- A tensão de uma só célula é de 4,1 V logo, 3 vezes superior à das baterias de níquel-cádmio (NiCd) e de níquel metal hidreto (NiMH), e 2 vezes superior à das baterias de ácido de chumbo.
- Não possuem efeito memória.
- Número elevado de ciclos de carga (superior a 1000 ciclos).
- Operação numa gama alargada de temperatura.
- Taxa de auto-descarga lenta (2%–10% por mês).
- Densidade de energia gravimétrica de 150Wh/Kg, duas vezes superior à das NiMH.
- Capacidade volumétrica de 400 Wh/L, quatro vezes superior à das NiCd.

Embora apresente características vantajosas, a bateria de iões de lítio apresenta também algumas desvantagens:

- Requer circuitos de proteção para a tensão e corrente.
- Estão sujeitas ao efeito de envelhecimento, mesmo não estando em utilização.
- Fabrico dispendioso.

A bateria de polímeros de iões de lítio (Li-Po) surgiu no mercado em 1998 através da empresa Sony [43]. Estas novas baterias apresentam-se como sendo uma evolução das baterias de iões de lítio na medida em que deixam de usar um eletrólito líquido, composto por sais de lítio dissolvidos num

solvente molecular de baixo peso, para passar a usar um eletrólito de polímeros em gel [44]. A utilização deste novo eletrólito, que não conduz corrente elétrica mas permite a passagem de íons de lítio, possibilita a realização de baterias com algumas vantagens em relação às baterias de Li-Ion. Estas vantagens, assim como as suas desvantagens, estão resumidas na Tabela 2.4 [45].

Tabela 2.4: Vantagens e desvantagens da bateria de Li-Po comparativamente às Li-Ion.

Bateria de Li-Po	
Vantagens	Desvantagens
Perfil reduzido: É possível a realização de baterias com décimos de milímetro	Densidade energética número de ciclos inferior em relação às baterias de Li-Ion
Flexibilidade: Fabricantes não estão limitados a um tipo de formato	Custos de fabrico superiores
Baixo peso: O eletrólito de gel não requer o uso de uma estrutura metálica	Não existe um tamanho normalizado
Maior segurança: Maior resistência a sobrecargas; Risco reduzido de fugas de eletrólito	Relação custo-energia mais elevado que a pilha Li-Ion

A resistência física é uma das grandes vantagens das baterias de Li-Po, podendo mesmo sofrer perfurações em plena carga, sem apresentar riscos de fogo ou explosão [46].

Atualmente são várias as empresas a comercializar baterias recarregáveis de polímeros de lítio, como é o caso da Powerstream [47] e a Solicore [48]. Estas baterias apresentam elevada resistência, flexibilidade, e espessura reduzida, na ordem de décimos de milímetro.

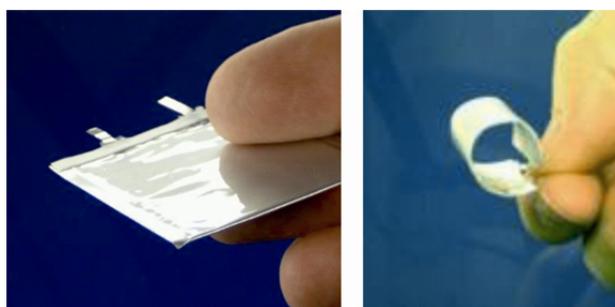


Figura 2.6: Baterias de Li-Po Powerstream com 0,6 mm de espessura.

A redução das dimensões e a necessidade de fontes de energia dos dispositivos eletrônicos levaram ao desenvolvimento de baterias de lítio em estado sólido na tecnologia de filme fino [49] e em 1982 as primeiras baterias de uso prático foram anunciadas pela empresa japonesa Hitachi [50]. Estas baterias são construídas com técnicas de deposição, e conseguem espessuras extremamente finas, na ordem dos 15 μm [51]. A Figura 2.7 mostra o corte transversal de uma bateria de filme fino em estado sólido.

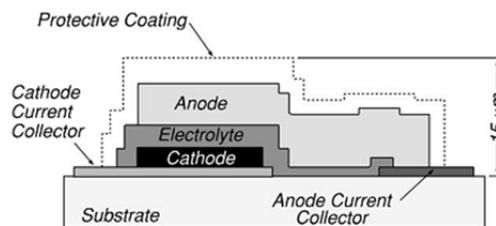


Figura 2.7: Corte transversal de uma bateria de filme fino em estado sólido.

Apresentando elevada miniaturização, estas baterias são fáceis de integrar em componentes eletrônicos tais como circuitos integrados, sensores, etc. [52]. Desenvolvimentos recentes permitem o fabrico de pilhas com elevada densidade de corrente, na ordem dos mA/cm^2 , e elevada estabilidade a longo prazo, permitindo realizar milhares de ciclos de carga [53].

No mercado podem ser encontradas baterias de filme fino em estado sólido das empresas Cymbet [54] e Infinite Power Solutions [55].

A Tabela 2.5 resume os principais tipos de baterias de lítio de filme fino [56]:

Tabela 2.5: Principais tipos de materiais constituintes da bateria de lítio de filme fino.

Anode	Electrolyte	Cathode	Voltage (V)	Current ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Capacity
Li	$\text{Li}_{3,6}\text{Si}_{0,6}\text{P}_{0,4}\text{O}_4$	TiS_2	2.5	16	45–150 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	$\text{Li}_{3,6}\text{Si}_{0,6}\text{P}_{0,4}\text{O}_4$	TiS_2	2.5	16–30	–
Li	$\text{Li}_{3,6}\text{Si}_{0,6}\text{P}_{0,4}\text{O}_4$	$\text{WO}_3\text{-V}_2\text{O}_5$	1.8–2.2	16	60–92 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	LiBO_2	In_2Se_3	1.2	0.1	–
Li	$\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$	TiS_xO_y	2.6	1–60	40–15 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	$\text{Li}_2\text{S-SiS}_2\text{-P}_2\text{S}_5$	$\text{V}_2\text{O}_5\text{-TeO}_2$	2.8–3.1	0.5–2	–
LiV_2O_5	LiPON	V_2O_5	3.5–3.6	10	6 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
V_2O_5	LiPON	LiMn_2O_4	3.5–1	>2	18 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li/LiI	$\text{LiI-Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5\text{-P}_2\text{O}_5$	TiS_2	1.8–2.8	300	70 mAh/cm^3
Li	LiBP, LiPON	LiMn_2O_4	3.5–4.5	70	100 mAh/g
Li	$\text{Li}_{6,1}\text{V}_{0,61}\text{Si}_{0,39}\text{O}_{5,36}$	$\text{MoO}_{2,89}$	2.8	20	60 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	$\text{Li}_{6,1}\text{V}_{0,61}\text{Si}_{0,39}\text{O}_{5,36}$	LiMn_2O_4	3.5–5	10	33.3 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	LiPON	LiMn_2O_4	4.5–2.5	2–40	11–81 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Cu	LiPON	LiCoO_2	4.2–3.5	1–5	130 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	LiPON	LiCoO_2	4.2–2.0	50–400	35 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	LiPON	$\text{Li}_x(\text{Mn}_y\text{Ni}_{1-y})_{2-x}\text{O}_2$	4–3.5	1–10	100 mAh/g
Li	LiPON	LiMn_2O_4	4–5.3	10	10–30 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
Li	LiPON	$\text{Li-V}_2\text{O}_5$	1.5–3	2–40	10–20 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$
SiSnON	LiPON	LiCoO_2	2.7–4.2	~5000	340–450 mAh/g
Li	LiPON	LiMn_2O_4	4.3–3.7	~800	45 $\mu\text{Ah}/(\text{cm}^2\text{-}\mu\text{m})$
SnO	$\text{Li}_{6,1}\text{V}_{0,61}\text{Si}_{0,39}\text{O}_{5,36}$	LiCoO_2	2.7–1.5	10–200	4–10 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$

Atualmente a tecnologia de nano-materiais tem mostrado um elevado potencial para o fabrico de baterias de lítio. As reduzidas dimensões dos componentes constituintes da pilha permitem uma intercalação dos iões mais rápida, o que leva a um aumento da potência fornecida [57].

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Teoria dos painéis fotovoltaicos

3.1.1. *Funcionamento do painel fotovoltaico*

A célula fotovoltaica mais comum é constituída por duas camadas de material semicondutor: Uma primeira camada, mais superficial e de espessura inferior, e uma camada secundária situada logo a seguir, de espessura superior. Ambas as camadas são constituídas por silício [29], um material que se encontra em abundância, apresentando-se não tóxico, com potencial de alta eficiência, cuja pesquisa e fabrico encontram-se em estado avançado devido ao seu uso na indústria dos microprocessadores [58].

O silício é um material semicondutor que possui 4 eletrões de valência [12]. Estes eletrões, por descreverem uma órbita mais afastada do núcleo, podem facilmente passar para a banda condutora quando excitados por uma fonte externa, tal como o calor ou a irradiação, dando origem a cargas positivas [59]. A energia necessária para que tal ocorra tem a designação de E_{gap} quantificada em eV (eletrovolts). Uma vez na banda condutora, os eletrões podem circular livremente até encontrarem cargas positivas (lacunas), que são os espaços vazios deixados por outros eletrões. Neste momento o silício passa a conduzir, mas a movimentação de eletrões não segue nenhuma orientação capaz de gerar corrente elétrica. Para isso é necessário criar uma junção p-n [60].

Para criar uma zona condutora do tipo n (negativa), é necessário dopar o silício com um material capaz de ceder eletrões, tal como o fósforo, que possui 5 eletrões de valência [61]. Em combinação com as moléculas de silício que apenas possuem 4, um dos eletrões do fósforo não consegue criar uma ligação forte podendo circular livremente. De forma análoga, para criar uma zona do tipo p (positiva), durante o processo de dopagem normalmente é usado boro pois, como possui apenas 3 eletrões de valência, não consegue fazer uma quarta ligação a um átomo de silício adjacente, dando origem a uma carga positiva [62].

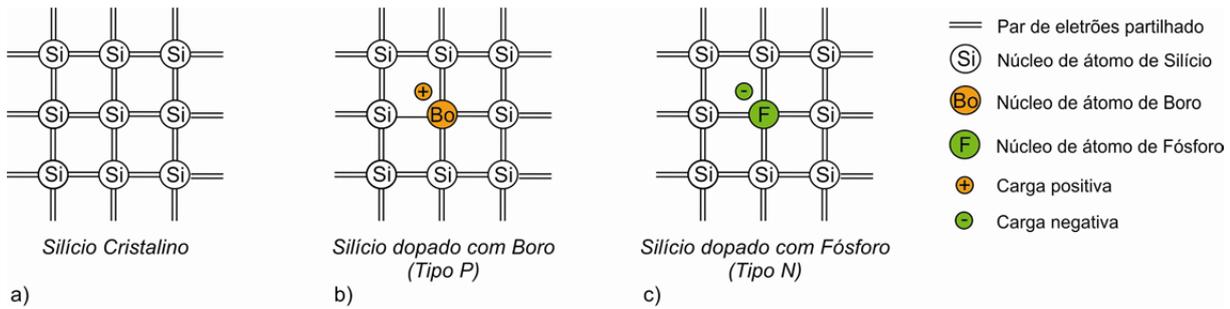


Figura 3.1: a) Composição molecular do Silício; b) Dopagem com boro; c) Dopagem com fósforo.

Quando o silício tipo n é colocado em contacto com o tipo p, as cargas opostas são atraídas na zona de junção dando origem a uma zona de depleção e subsequente campo elétrico. Quando irradiação incide sobre o silício dopado, os fótons com energia suficiente fazem excitar eletrões, fazendo-os passar para a zona de condução, resultando na criação de mais cargas positivas (lacunas) e eletrões livres [63]. Como existe um campo elétrico criado pela dopagem, os eletrões e cargas positivas junto à zona de depleção são atraídos em direções opostas, fazendo assim aumentar o campo elétrico criado inicialmente pela junção p-n. Finalmente, ao dotar o silício com dois terminais, um na zona tipo n e outro na zona tipo p, é possível fechar o circuito para alimentar uma carga [64]. A Figura 3.2 representa uma célula fotovoltaica e o seu princípio de funcionamento.

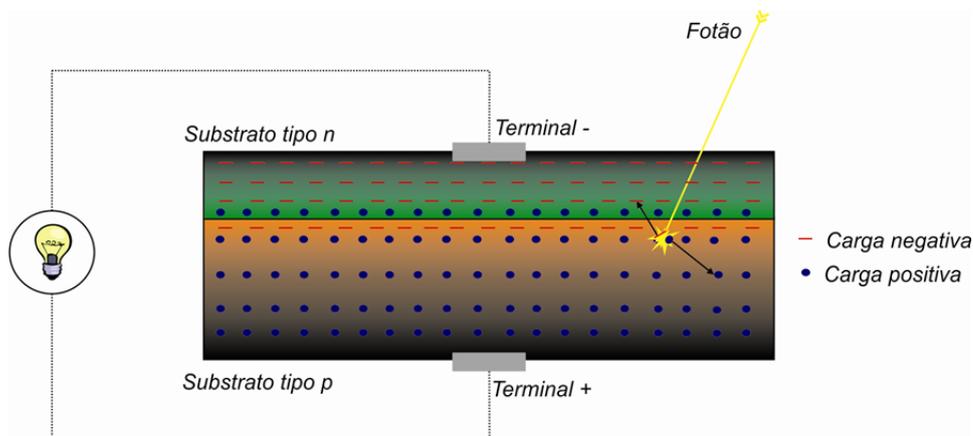


Figura 3.2: Funcionamento da célula solar.

Na Figura 3.3 representa a relação entre a energia em eV necessária para excitar um eletrão e o rendimento teórico para os principais materiais usados no fabrico de painéis fotovoltaicos [65].

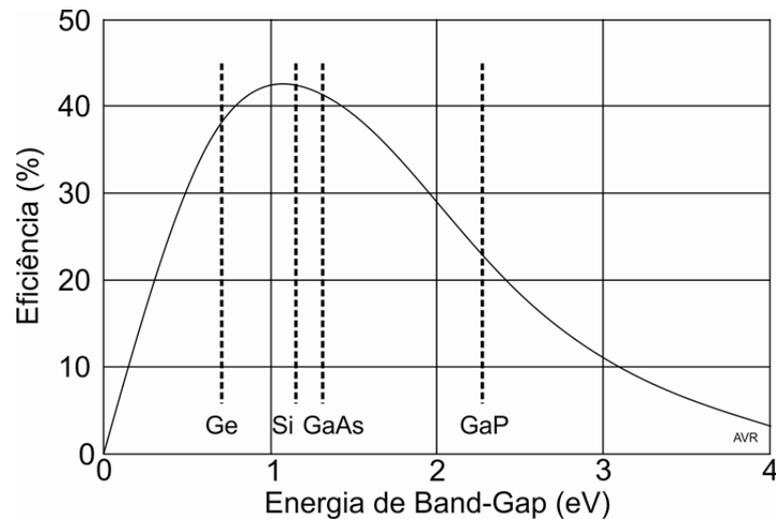


Figura 3.3: Relação entre eficiência e energia de Band-Gap.

3.1.2. Circuito equivalente da célula fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica pode ser representada, de uma forma simples, por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo [66].

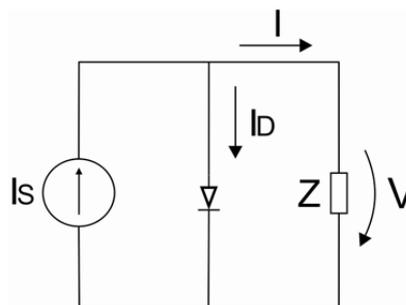


Figura 3.4: Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

Na Figura 3.4, a fonte de corrente I_s representa a corrente produzida pela incidência da irradiação solar na superfície da célula. Esta corrente apresenta-se constante para valores de irradiação constantes. O diodo percorrido pela corrente I_d representa a junção p-n, e vê aplicado aos seus terminais a tensão de saída V da célula fotovoltaica.

A corrente que percorre o diodo é dada pela Equação 3.1 [67]:

$$I_D = I_0 (e^{V/mV_T} - 1) \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:

I_0 – Corrente inversa de saturação do diodo.

V – Tensão aos terminais da célula.

m – Fator de idealidade do diodo ($m=1$: ideal; $m>1$: real).

V_T – Potencial térmico.

$$V_T = kT/q$$

T – Temperatura da célula em K ($298,15^\circ\text{K} \rightarrow 25^\circ\text{C}$) [11]

k – Constante de Boltzman ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$)

q – Carga elétrica do elétron ($q = 1,6 \times 10^{-23} \text{ C}$)

A Equação 3.2 descreve a corrente I no circuito:

$$I = I_S - I_D = I_S - I_0(e^{V/mV_T} - 1) \quad \text{Equação 3.2}$$

Devido ao seu princípio de funcionamento e às suas limitações físicas, cada tipo de célula fotovoltaica apresenta curvas características de corrente e tensão quando expostas a diferentes valores de irradiação, sendo que os máximos valores de corrente e tensão obtidos são a corrente de curto-circuito I_{sc} e tensão em aberto V_{oc} [66].

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 0 \\ I_D = 0 \end{array} \right\} = 0 \rightarrow I = I_S = I_{sc} \quad \text{Equação 3.3}$$

$$I = 0 \rightarrow V = V_{oc} = mV_T \ln\left(1 + \frac{I_S}{I_0}\right) \quad \text{Equação 3.4}$$

O valor da corrente de curto-circuito obtém-se curto-circuitando os terminais do painel solar. A tensão de circuito aberto surge aos terminais do painel solar quando, tal como a nomenclatura indica, o circuito está aberto.

Estes valores são usados para traçar o gráfico da curva característica I-V (corrente-tensão) do painel fotovoltaico, e assim determinar graficamente o seu ponto de funcionamento máximo. A Figura 3.5 mostra uma curva I-V típica de uma célula fotovoltaica.

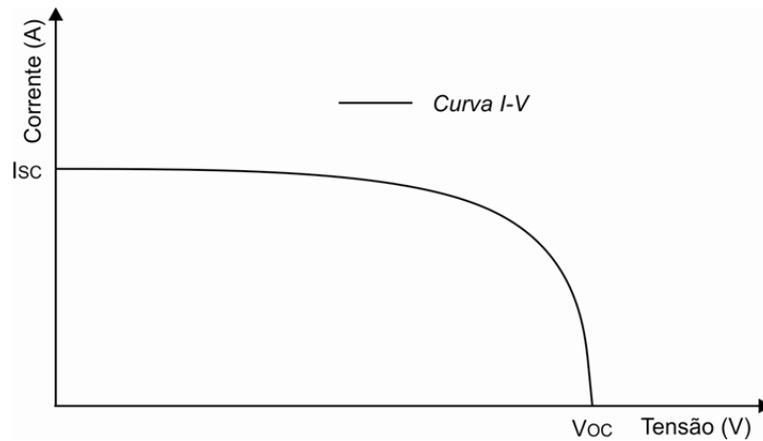


Figura 3.5: Curva I-V típica de uma célula fotovoltaica.

A potência máxima do painel, expressa em Wp (Watt pico), surge quando a multiplicação da corrente pela tensão ao longo da curva característica I-V resulta no valor mais elevado. O ponto de máxima potência tem a designação de MPP (máximo power point), e ocorre à tensão de funcionamento V_{MPP} tal como demonstra a Figura 3.6.

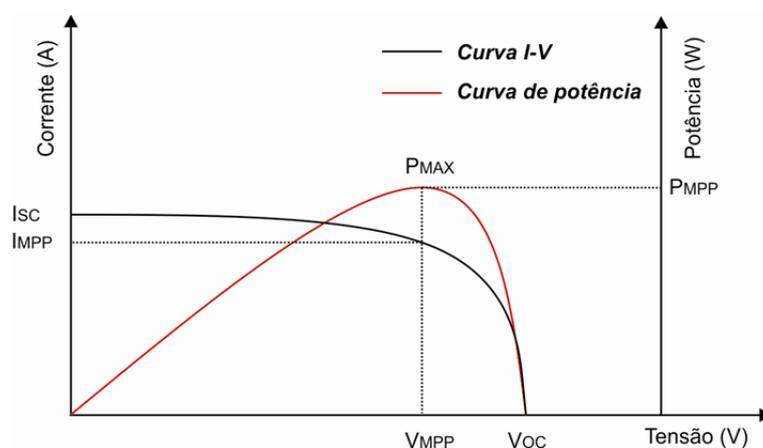


Figura 3.6: Ponto de potência máximo de uma célula fotovoltaica.

Outros parâmetros importantes a conhecer são o rendimento (η) e o fator de forma (FF - Fill Factor).

3.1.3. **Rendimento da célula fotovoltaica**

O rendimento de uma célula fotovoltaica é obtido através do quociente entre a potência de saída e a potência de entrada, segundo a Equação 3.5:

$$\eta(\%) = \frac{P_o}{P_i} \times 100$$

Equação 3.5

Onde:

P_o → Potência de saída do painel fotovoltaico.

P_i → Potência de entrada do painel fotovoltaico (Potência da irradiação solar a multiplicar pela área do painel fotovoltaico).

Num exemplo em que a irradiação solar tem a potência de 50 mW/cm², o painel possui uma área de 50 cm² e fornece 100 mW, o seu rendimento é de:

$$\eta = \frac{0,1}{0,05 \times 50} \times 100 = 4\% \quad \text{Equação 3.6}$$

3.1.4. Fator de forma

O fator de forma (FF) estabelece a relação entre a potência de pico e a potência máxima teórica (Equação 3.7), sendo esta o resultado da multiplicação da tensão em aberto V_{oc} pela corrente de curto-circuito I_{sc} :

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{ca} \times I_{sc}} \quad \text{Equação 3.7}$$

O valor de FF da célula fotovoltaica situa-se normalmente entre 0,7 – 0,85, e relaciona-se com o seu rendimento através da Equação 3.8 [68]:

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_i} \quad \text{Equação 3.8}$$

A Figura 3.7 mostra o efeito resultante para diferentes valores de FF.

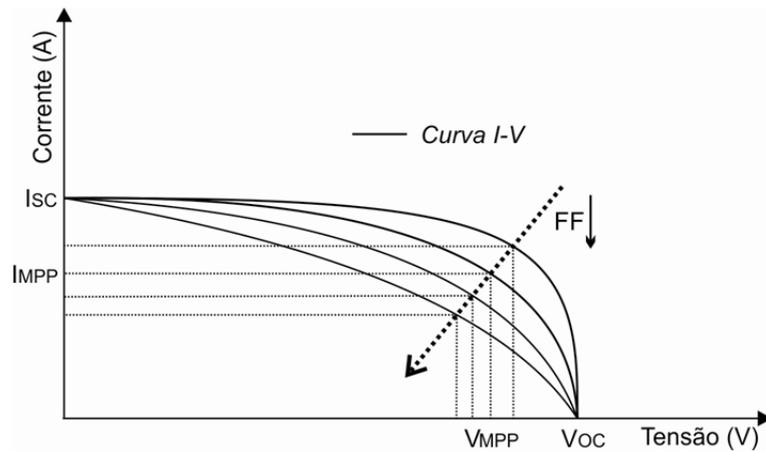


Figura 3.7: Efeito da diminuição do Fator de Forma.

3.1.5. Efeito da temperatura e irradiação solar na curva I-V

A temperatura de funcionamento e a intensidade da irradiação solar são fatores condicionantes do funcionamento de uma célula fotovoltaica. Com o aumento da temperatura, a tensão diminui linearmente, ao passo que a corrente não sofre alterações de relevo, tal como se pode visualizar na Figura 3.8.

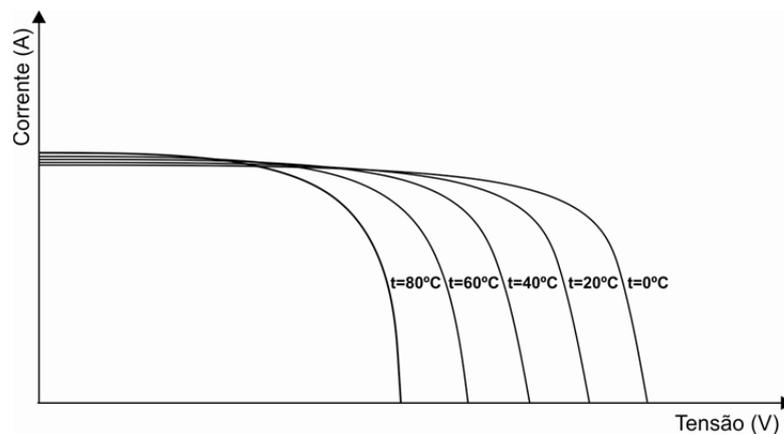


Figura 3.8: Efeito da temperatura no funcionamento da célula fotovoltaica.

A Figura 3.9 mostra o efeito da variação da intensidade da irradiação solar incidente sobre o painel fotovoltaico. O valor médio de irradiação solar ao nível do mar quando o sol assume uma posição vertical equivale a 1000 W/m^2 [65] [69].

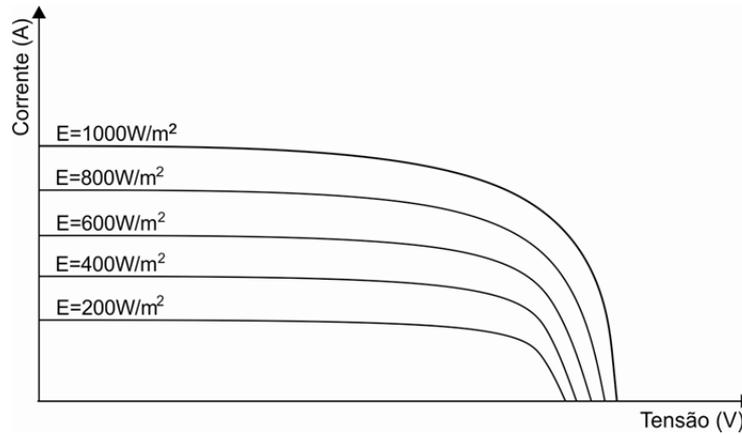


Figura 3.9: Efeito da irradiação solar na curva I-V da célula fotovoltaica.

Com a diminuição da intensidade da irradiação, a corrente do painel diminui de forma acentuada, ao passo que o valor de tensão sofre um decréscimo menos acentuado.

3.1.6. Adição de células fotovoltaicas em série

Uma célula fotovoltaica produz uma diferença de potencial baixo, na ordem dos décimos de volt [70]. Para se obter uma tensão superior, é necessária a colocação em série de várias células, sendo a tensão resultante o somatório das tensões individuais. Caso a tensão esteja dentro dos valores pretendidos mas a corrente fornecida seja reduzida, as células podem ser colocadas em paralelo [71]. A Figura 3.10 mostra o resultado da colocação de células fotovoltaicas em série.

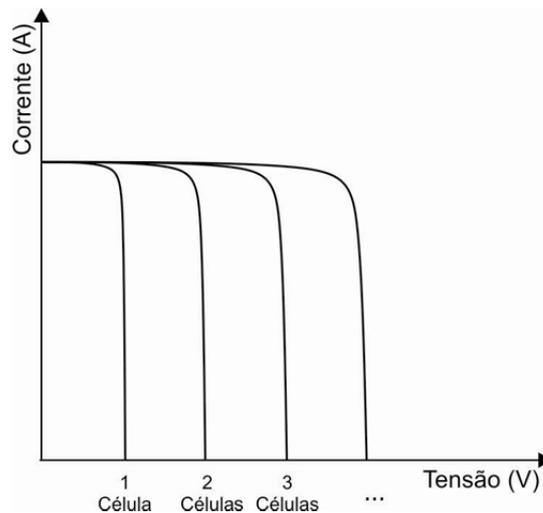


Figura 3.10: Ligação em série de células fotovoltaicas.

3.2. Teoria da Bateria de Lítio

3.2.1. Princípio de funcionamento da bateria de lítio

Devido às suas propriedades intrínsecas, o lítio é um material atrativo para o fabrico de baterias: apresenta reduzida massa atômica (6,94), potencial de redução elevado (-3,01 V, relativamente ao eletrodo de H₂ padrão), baixa densidade (0,54 g/cm³) e capacidade específica elevada (3,86 Ah/g) [72]. A Figura 3.11 compara a densidade energética entre vários tipos de baterias.

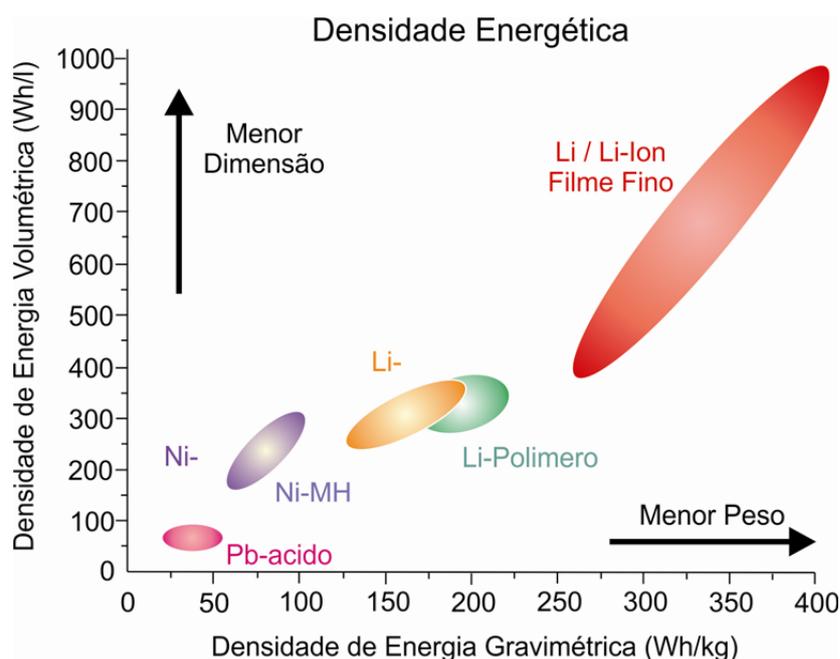
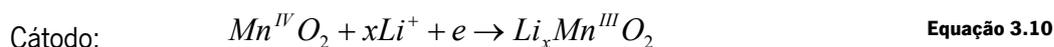


Figura 3.11: Densidade energética de vários tipos de baterias.

Na produção de corrente elétrica estão envolvidas reações químicas de redução-oxidação. No caso da bateria de lítio de dióxido de lítio e manganês (LiMnO₂), o processo de descarga envolve a oxidação do lítio metálico (ânodo - polo negativo da pilha), e a redução do manganês (cátodo - polo positivo da pilha), respeitando a seguinte reação química [73]:



A reação do lítio com soluções aquosas obriga ao uso de um eletrólito composto por soluções não-aquosas, onde os solventes usados podem ser orgânicos, como o acetonitrilo (CH_3CN) e o carbonato de propileno ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$), ou inorgânicos, como o cloreto de tionila (SOCl_2) [74].

As baterias podem agrupar-se em dois grandes grupos, consoante a possibilidade de serem ou não recarregadas [75]:

- Baterias primárias - não recarregáveis, pois durante o seu funcionamento ocorrem reações químicas que comprometem a estabilidade da célula;
- Baterias secundárias – recarregáveis aplicando uma corrente externa que reverte o processo eletroquímico ocorrido durante a descarga;

A designação de bateria secundária é aplicada quando esta é capaz de suportar pelo menos 300 ciclos completos de carga, mantendo 80% da sua capacidade [76].

A Figura 3.12 mostra o funcionamento da bateria de lítio secundária durante o ciclo de carga e descarga [77].

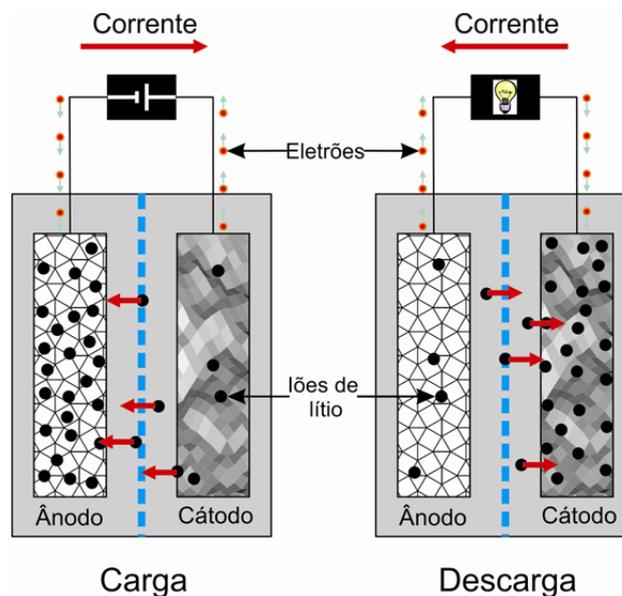


Figura 3.12: Carga e descarga da bateria de lítio.

Durante o ciclo de descarga, os íons de lítio presentes no ânodo migram para o cátodo dando origem a uma corrente elétrica que percorre a carga. Durante o ciclo de carga o processo reverte-se, isto é, a

fonte externa aplicada aos terminais da bateria obriga a passagem dos íões de lítio do cátodo para o ânodo [56].

3.3. Técnicas de carga de Baterias

A carga de uma bateria deve ocorrer de forma segura, rápida e eficiente. Para salvaguardar a segurança e longevidade de uma bateria, o processo de carga deve obedecer às especificações do fabricante, tais como corrente e tensão máximas de carga. Um processo de carga não adequado, além de reduzir a eficiência e o número de ciclos, pode degradar a bateria de forma irreversível, podendo mesmo ocorrer o risco de explosão [78].

São vários os métodos de carga existentes sendo que a adoção de determinado método mais adequado está condicionado pelo tipo de bateria a utilizar. Entre os métodos existentes destacam-se os seguintes:

- Método da Corrente Constante.
- Método da Tensão Constante.
- Método da Corrente Constante -Tensão Constante.
- Método de Impulsos de Corrente.
- Método de Carga Refletiva

3.3.1. Método da Corrente Constante

Este método consiste na aplicação de um valor de corrente constante aos terminais da bateria, na ordem dos $C/5$, em que C é a capacidade da bateria em mAh [79][5]. O fim do ciclo de carga deverá ocorrer quando um valor pré-estabelecido de tensão for atingido. No caso das baterias de lítio, quando a tensão aos seus terminais atingir 4,2 V o processo de carga deverá terminar, de forma a prevenir uma sobrecarga.

Nas baterias de lítio não é possível o uso da técnica de carga lenta (*trickle charging*), onde um valor reduzido de corrente é continuamente aplicado, mesmo após a carga completa, para compensar o efeito de auto-descarga [80].

Este método não é o mais indicado para a carga de baterias de lítio. Além de implicar a integração de circuitos indicadores de carga completa mais complexos, um valor reduzido de corrente de aumenta o tempo carga, ao passo que um valor elevado pode causar danos na bateria.

3.3.2. Método da Tensão Constante

Este método, tal como o nome indica, consiste na aplicação de uma tensão constante aos terminais da bateria. Na fase inicial de carga, e caso a bateria se encontre muito descarregada, a corrente toma valores elevados, resultado da considerável diferença de potencial entre a tensão de carga e a tensão da bateria [81]. À medida que a tensão da bateria aumenta, a corrente de carga diminui. O fim do ciclo de carga pode ser determinado para um valor mínimo de corrente de carga estipulado. A Figura 3.13 mostra a evolução da tensão e da corrente de carga para o método da tensão constante [82].

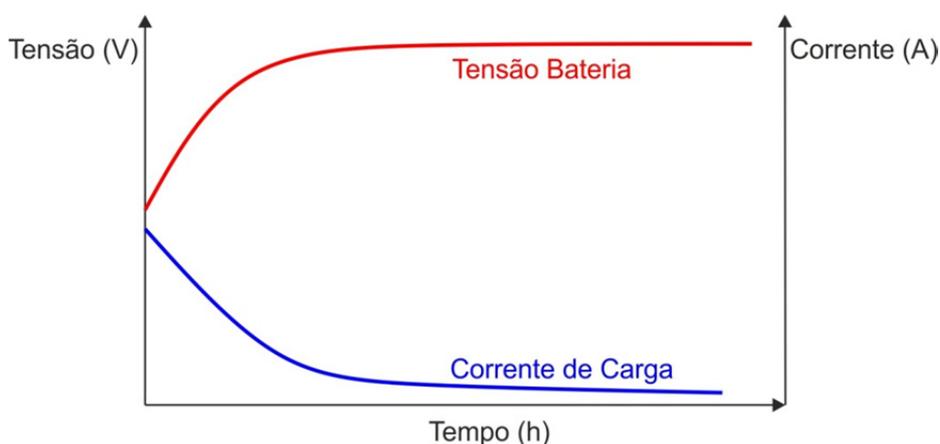


Figura 3.13: Método da tensão constante

Embora este método seja rápido, também não se adequa às baterias de lítio pois, na fase inicial de carga, a corrente pode tomar valores muito elevados, dando origem ao aumento da temperatura interna da bateria, resultando num desgaste prematuro [83].

3.3.3. Método da Corrente Constante – Tensão Constante

Este método apresenta-se como um híbrido entre o método da corrente constante e o método da tensão constante [84].

O ciclo de carga ocorre em duas fases: Na primeira fase é aplicada uma corrente constante, fazendo com que a tensão da bateria aumente até atingir 4,2 V no caso das baterias de lítio. A partir deste

ponto é aplicado o método da tensão constante. O ciclo de carga termina quando a corrente de carga tomar um valor mínimo estipulado. A Figura 3.14 mostra a evolução da tensão e da corrente de carga para o método de corrente constante – tensão constante [85].

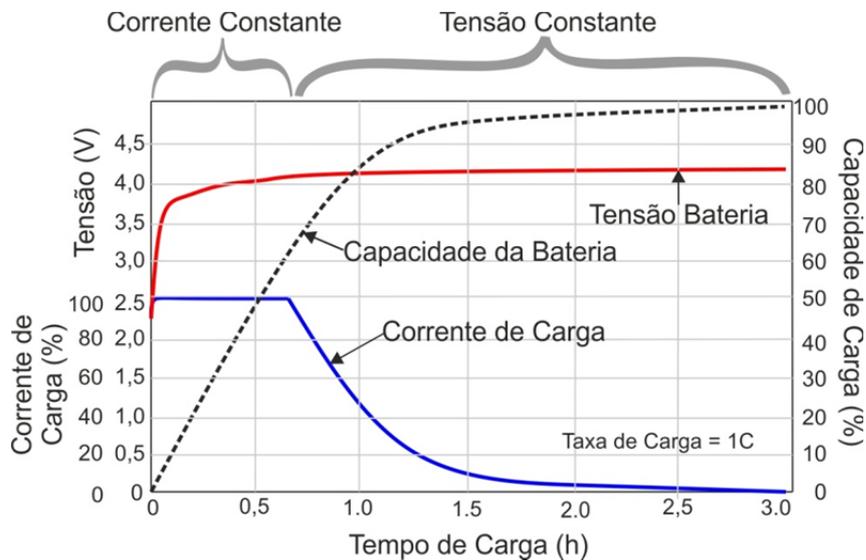


Figura 3.14: Método da Corrente Constante – Tensão Constante.

Este método é dos mais adequados às baterias de lítio pois resulta em tempos de carga reduzidos, previne sobrecargas e carrega a bateria quase a 100% [80].

3.3.4. Método de Impulsos de Corrente

O método de impulsos de corrente, tal como o nome indica, consiste na aplicação de impulsos de corrente, seguidos por períodos reduzidos de descanso, onde a corrente de carga é nula [86]. A rapidez do processo de carga está condicionada pela taxa de difusão dos iões de lítio nos elétrodos [87]. Se a corrente de carga tomar valores elevados, a taxa lenta de difusão dos iões de lítio resulta numa rápida subida de tensão, que rapidamente atinge valor limite superior. A partir deste ponto, mesmo aplicando o método da tensão constante, a corrente de carga baixa prematuramente para valores que ditam o fim do processo de carga.

No caso da bateria lítio, a finalidade deste método é permitir que os iões de lítio se difundam por toda área disponível nos elétrodos, aumentando assim o estado de carga final da bateria.

3.3.5. Método de Carga Refletiva

O método de carga refletiva consiste na aplicação do método de impulsos de corrente, mas com a inclusão de um curto pulso de descarga durante o período de descanso. Este método surge com o objetivo de acelerar o processo de estabilização das reações químicas prolongando o número de ciclos da bateria [87] [88].

3.4. Proteção de Baterias

Uma bateria pode sofrer danos irreversíveis caso seja carregada acima de uma determinada capacidade, dando origem a uma sobretensão, ou descarregada abaixo de uma determinada capacidade, dando origem a uma subtensão. No caso da bateria de lítio, as condições de carga e descarga devem garantir que a corrente não exceda um valor máximo estipulado, e que a tensão se mantenha dentro dos limites de funcionamento. A excedência dos limites de corrente e/ou tensão levam ao aquecimento excessivo da bateria, podendo originar a formação de gases e consequente aumento da pressão interna, com risco de explosão [89].

- Valores excessivos de corrente durante a carga e descarga.
- Curto-circuitos.
- Sobretensão (excesso de carga).
- Subtensão (durante a descarga).
- Temperatura ambiente elevada.
- Aquecimento interno excessivo.
- Pressão interna.

Normalmente a proteção da bateria fica a cargo de um circuito de gestão de energia ligado à saída da bateria. A Figura 3.15 mostra uma pilha de Li-Po com circuito de proteção integrado [90].

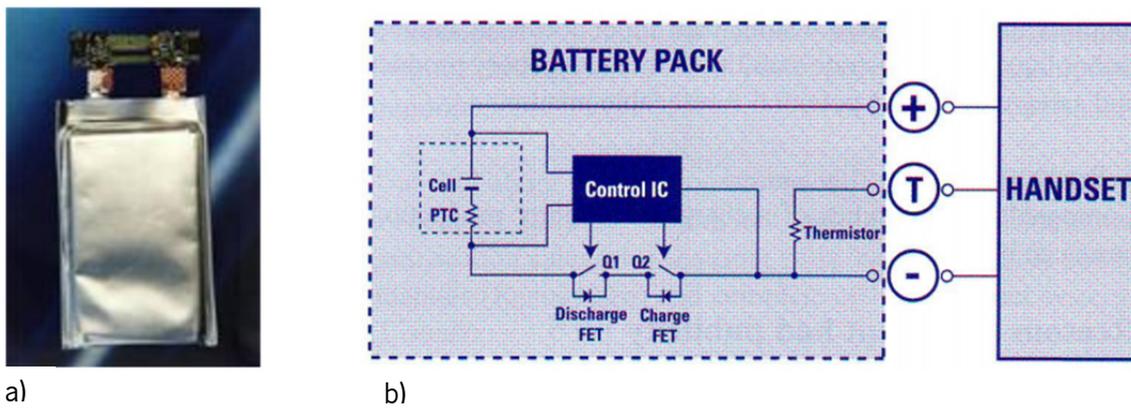


Figura 3.15: a) Bateria de LiPo com circuito de proteção; b) Esquema do circuito de proteção.

3.5. Conversores DC-DC

3.5.1. Teoria do conversor DC-DC

São vários os fatores que influenciam a curva I-V de um painel fotovoltaico. A temperatura, intensidade da irradiação solar, orientação do painel fotovoltaico em relação ao sol e tipo de painel, são alguns dos parâmetros que condicionam os valores de corrente e tensão para os quais a potência fornecida é máxima. A Figura 3.16 mostra a curva I-V para painéis fotovoltaicos com a mesma potência de pico, mas constituídos por materiais diferentes [91].

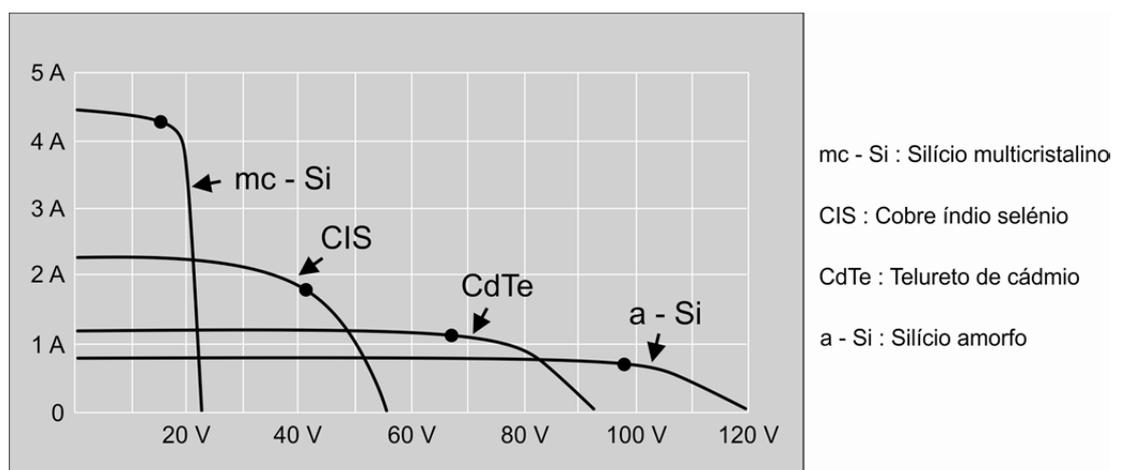


Figura 3.16: Curvas I-V para 4 tipos de painéis fotovoltaicos de 75 Wp

Um painel fotovoltaico fornece energia de uma forma não linear, apresentando um ponto de funcionamento restrito no qual a potência fornecida é máxima [92]. A Figura 3.17 exemplifica a

transferência de energia entre um painel fotovoltaico e uma carga resistiva, em três situações de funcionamento distintas:

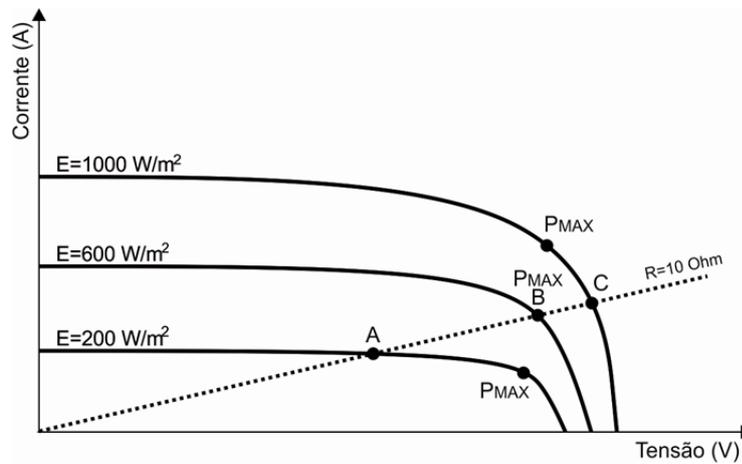


Figura 3.17: Fornecimento de energia de um painel fotovoltaico a uma carga resistiva.

Sobrepondo a reta I-V de uma carga resistiva com as curvas I-V do painel fotovoltaico para condições distintas de irradiação solar, facilmente se constata que o ponto de interceção muito raramente acontece no ponto de máxima potência. Analisando a Figura 3.17, apenas o ponto B se situa no ponto de potência máxima que o painel pode fornecer, o que acontece, neste caso, para um valor de irradiação solar de 600 W/m^2 . Se os valores de irradiação sofrerem uma alteração, o painel deixa de funcionar no ponto ótimo, o que é verificado pelo afastamento dos pontos A e C das respetivas zonas de potência máxima.

Para manter o painel fotovoltaico na zona de MPP, e assim aumentar o seu rendimento, pode ser colocado um conversor DC-DC entre o painel e a carga, tal como mostra a Figura 3.18.

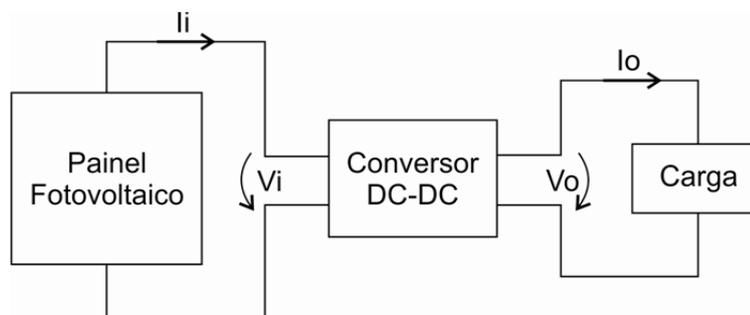


Figura 3.18: Ligação de um conversor DC-DC entre o painel e a carga.

Ajustando a tensão aplicada na carga, é possível variar a potência fornecida. Como no conversor a potência de entrada é igual à potência de saída (assumido que não há perdas), a potência fornecida pelo painel também varia, o que faz deslocar o seu ponto de funcionamento.

Um conversor DC-DC é um circuito elétrico que tem a função de colocar na sua saída valores médios de tensão diferentes dos presentes na sua entrada. Estes conversores podem ser lineares ou comutados. Os conversores lineares apenas fornecem tensões de amplitude inferior à tensão de entrada, e apresentam um rendimento muito reduzido, pois parte da potência é dissipada sob a forma de calor. Como vantagem, apresentam uma construção simples, requerendo poucos componentes, e de custo reduzido. Um conversor linear pode ser construído, de uma forma simplista, fazendo uso de um simples divisor resistivo [93], tal como mostra a Figura 3.19.

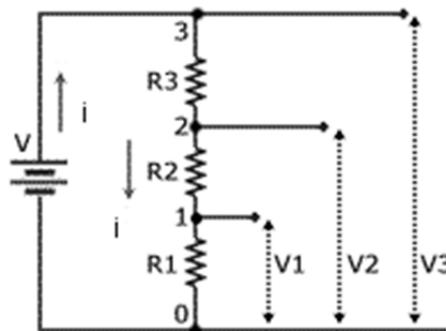


Figura 3.19: Conversor DC-DC linear.

Um conversor DC-DC comutado atua recorrendo ao uso de armazenadores de energia, tal como bobines (armazenamento de energia sob a forma de campo magnético), e condensadores (armazenamento de energia sob a forma de campo elétrico). Estes componentes armazenam momentaneamente a energia colocada na entrada do conversor, para depois a fornecer com valores médios de tensão com amplitude ajustada.

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as vantagens e inconvenientes deste tipo de conversor:

Tabela 3.1: Vantagens e inconvenientes dos conversores DC-DC comutados.

Conversores DC-DC comutados	
Vantagens	Inconvenientes
Rendimento elevado	Formas de corrente e tensão retangulares provocam perdas nos semicondutores durante a comutação
Componentes de dimensões reduzidas	Ruído eletromagnético
Isolamento do sinal de entrada do de saída (consoante a topologia)	Maior complexidade

O valor médio da tensão colocada na saída do conversor é ajustado atuando sobre um componente semiconductor, como por exemplo um MOSFET [94], que comuta a uma frequência fixa. Este controlo é feito por PWM (Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Impulso) [95], que é um sinal que define durante um período, o tempo em que o componente conduz (modo ligado). O tempo em que o componente está em condução a dividir pelo período é chamado Duty Cycle (Equação 3.12).

$$\text{Duty Cycle} \quad \delta = \frac{t_{on}}{T} \quad \text{Equação 3.12}$$

Um conversor DC-DC pode apresentar dois modos de funcionamento [96]:

- Modo CCM (Continuous Conduction Mode).
- Modo DCM (Discontinuous Conduction Mode).

No modo CCM, a corrente na bobine não se anula, ao passo que no modo DCM esta corrente atinge o valor zero, isto é, no decorrer de um período existe uma zona “morta” na qual a bobine deixa de fornecer energia. Os fatores que dão origem a este segundo estado podem ser o Duty Cycle (se for reduzido), baixa frequência de comutação, mau dimensionamento dos valores dos componentes ou corrente de funcionamento muito reduzida.

Independentemente da topologia do conversor a adotar, é possível calcular os valores dos componentes de forma a condicionar o modo de funcionamento, pois para maximizar o rendimento é preferível o funcionamento no modo CCM [97]. Neste sentido é o valor da indutância que apresenta uma influência superior.

Para atenuar a oscilação da tensão de saída é colocado um condensador na saída do conversor. O dimensionamento do condensador de saída depende do valor máximo de oscilação da tensão - “*ripple*” - pretendido.

O teorema da máxima transferência energética estabelece que uma fonte fornece a potência máxima quando o valor da sua impedância é igualado ao valor da impedância da fonte [98] [99]. A impedância vista pelo painel fotovoltaico consiste no conjunto conversor mais carga, logo, é possível igualar ambas as impedâncias, a do painel e a do conjunto conversor mais carga, atuando no conversor. A Figura 3.20 mostra os efeitos da variação da impedância vista pelo painel fotovoltaico.

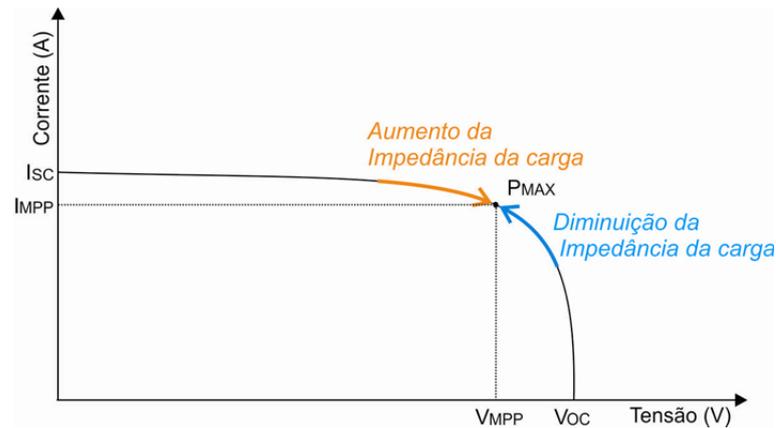


Figura 3.20: Efeito da variação da impedância da carga.

Caso o painel esteja a fornecer energia numa zona abaixo do ponto ótimo e a tensão seja inferior ao valor de V_{MPP1} zona do gráfico a laranja, o aumento da impedância da carga faz deslocar o ponto de funcionamento no sentido do aumento da potência fornecida. Se o aumento do valor da impedância da carga for excessivo, é ultrapassado o ponto de potência máxima, o que faz com que o painel forneça uma tensão acima do valor de V_{MPP1} zona do gráfico representado a azul.

As equações que regem o funcionamento das principais topologias de conversor são:

$$\delta = t_{on}/T \quad \text{Equação 3.13}$$

$$T = 1/f \quad \text{Equação 3.14}$$

$$M_v = V_{out}/V_{in} \quad \text{Equação 3.15}$$

Onde:

δ → Duty Cycle

M_v → Relação de transformação da tensão

f → Frequência

T → Período

t_{on} → Tempo durante o qual o comutador está em condução

L_{crt} → Valor mínimo da indutância que define a transição entre os modos DCM e CCM

C_{min} → Valor do condensador que condiciona o *ripple* na tensão de saída

$R_c \rightarrow$ Resistência da carga

A topologia do conversor DC-DC a adotar depende das características do painel e da carga. Caso a tensão de saída do painel seja inferior à requerida pela carga, o conversor a usar será do tipo “boost”, elevador de tensão. Caso a tensão de saída do painel seja superior, deverá ser usado um conversor do tipo “buck”, redutor de tensão. Existe ainda um terceiro tipo de conversor que permite elevar ou baixar a tensão, e tem a designação de buck-boost. O funcionamento destas topologias pode ser visualizado na Figura 3.21.

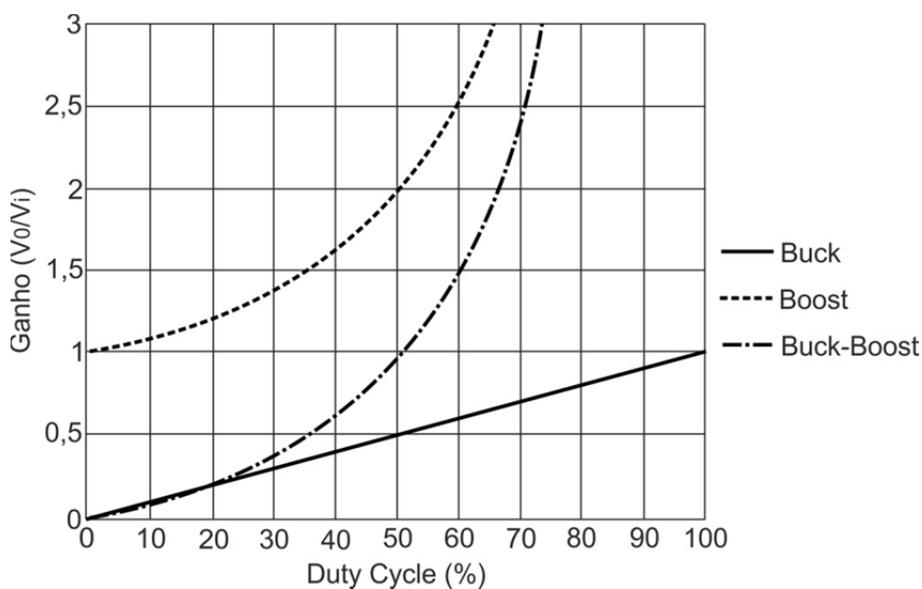


Figura 3.21: Comportamento das 3 principais topologias de conversor DC-DC

3.5.2. Conversor Step-Down (Buck)

Este tipo de conversor é usado quando se pretende aplicar uma tensão na carga que é sempre inferior à tensão fornecida pelo painel fotovoltaico. Um circuito exemplo é apresentado na Figura 3.22.

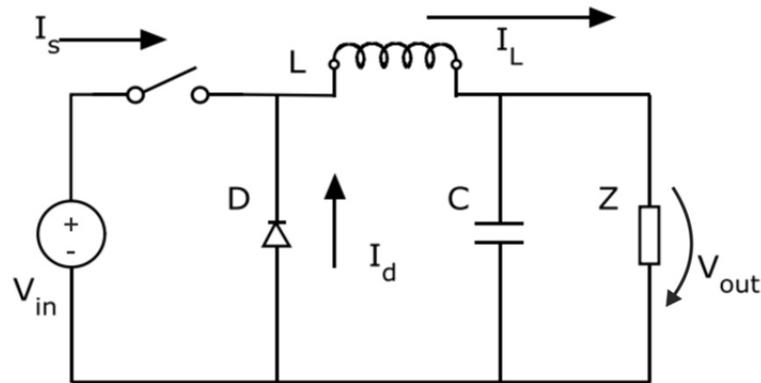


Figura 3.22: Circuito DC-DC Step-Down (Buck).

Quando o interruptor, que pode ser um MOSFET, se apresenta na posição “fechado”, a tensão de entrada é aplicada aos terminais de entrada do conversor, surgindo assim uma corrente I_L que percorre a indutância L , e que se divide pelo condensador e pela carga. A tensão que surge no condensador é a tensão de saída, logo, a tensão aplicada na carga. A corrente que percorre o circuito faz com que se armazene energia na bobine sob forma de campo eletromagnético, havendo assim uma queda de tensão que se subtrai à tensão de entrada – *bucking*. Nestas condições o diodo encontra-se inversamente polarizado, logo não conduz.

Quando se apresenta na posição “aberto”, a corrente que percorre a indutância faz com que esta inverta a sua polaridade e passe a alimentar a carga. A corrente flui através do diodo de *free-wheeling* que, ao estar diretamente polarizado, passa a conduzir [100].

As equações que regem o funcionamento do conversor *Step-Down* são:

$$M_v = \delta \quad \text{Equação 3.16}$$

$$V_{out} = V_{in} \times \delta \quad \text{Equação 3.17}$$

$$L_{crit} = \frac{(1-\delta)}{2f} \times R_c \quad \text{Equação 3.18}$$

$$C_{min} = \frac{(1-\delta)}{8Lf^2} \times \frac{V_{out}}{V_{ripple}} \quad \text{Equação 3.19}$$

3.5.3. Conversor Step-Up (Boost)

Este tipo de conversor é elevador de tensão, e pode ser utilizado quando a tensão a colocar na carga é sempre superior à tensão fornecida pelo painel.

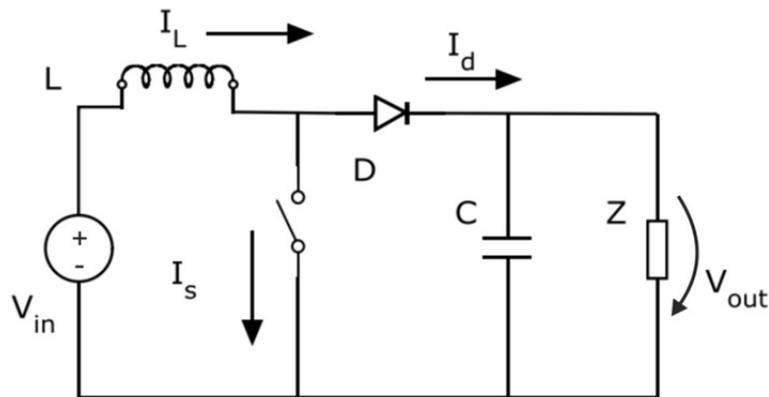


Figura 3.23: Circuito DC-DC Step-Up (Boost)

Quando o interruptor está fechado, surge uma corrente I_L que percorre a indutância L , fazendo com que esta armazene energia sob a forma de campo eletromagnético. Esta corrente não percorre o diodo pois encontra-se inversamente polarizado. Durante esta fase, a carga é alimentada pela energia previamente acumulada pelo condensador. Quando o interruptor abre, a corrente que percorre a indutância obriga à inversão da polaridade do seu campo eletromagnético, fazendo com que a tensão da indutância seja somada – *boost* – à tensão de entrada. Esta subida de tensão vai provocar uma corrente que percorre a indutância, o diodo e a carga, carregando também o condensador. Neste momento a tensão de saída é superior à tensão de entrada.

As equações que regem o seu funcionamento são:

$$M_v = \frac{1}{(1-\delta)} \quad \text{Equação 3.20}$$

$$V_o = \frac{V_i}{(1-\delta)} \quad \text{Equação 3.21}$$

$$L_{crt} = \frac{(1-\delta)^2}{2f} \times \delta \times R_c \quad \text{Equação 3.22}$$

$$C_{min} = \frac{\delta}{LR_c} \times \frac{V_o}{V_{ripple}} \quad \text{Equação 3.23}$$

3.5.4. Conversor Buck-Boost

Quando a tensão a aplicar na carga pode ser inferior ou superior à fornecida pelo painel, recorre-se a conversores do tipo Buck-Boost, e que consiste na ligação em cascata das topologias anteriormente apresentadas.

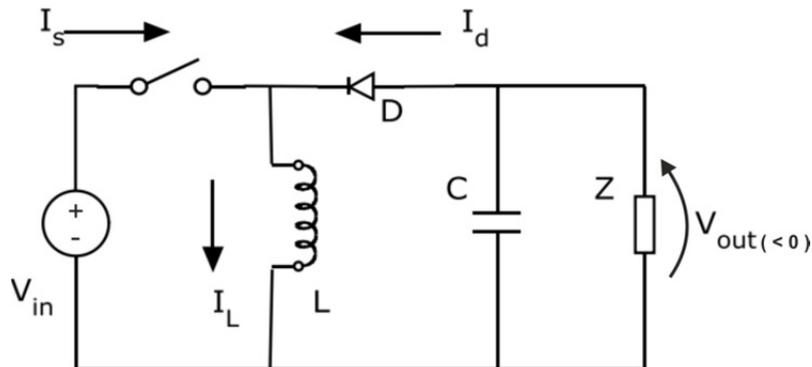


Figura 3.24: Circuito DC-DC Buck-Boost

Quando o interruptor está fechado, a tensão de entrada é aplicada na indutância surgindo assim uma corrente que a percorre, armazenando energia no campo eletromagnético criado. Como o diodo está inversamente polarizado, não conduz corrente logo, a tensão aplicada na carga é a tensão do condensador.

Quando esta aberto, a indutância deixa de ver a tensão de entrada aplicada aos seus terminais, e inverte a polaridade do seu campo eletromagnético dado que a corrente, embora a diminuir de intensidade, continua a fluir no mesmo sentido. O diodo nestas condições fica diretamente polarizado e passa ao estado de condução, fazendo com que surja uma corrente que flui pelo diodo para a carga, carregando também o condensador.

A amplitude do valor médio da tensão de saída é mais uma vez regulada pelo Duty-Cycle. Quando este se situa nos 50%, ambas as tensões de entrada e saída são iguais. Para valores do Duty-Cycle inferiores e superiores a 50%, a amplitude do valor médio da tensão de saída é inferior ou superior respetivamente. É de referir que agora a tensão de saída apresenta-se invertida em relação à tensão de entrada, logo esta topologia é também inversora.

Tal como nos casos anteriores, o condensador de saída deve ser dimensionado de forma a diminuir as oscilações – *ripple* – da tensão de saída.

As equações que regem o funcionamento do conversor *Buck-Boost* são:

$$\delta < 50\% \text{ Funcionamento no modo Buck} \quad \text{Equação 3.24}$$

$$\delta > 50\% \text{ Funcionamento no modo Boost} \quad \text{Equação 3.25}$$

$$V_o = -\frac{\delta \times V_i}{(1-\delta)} \quad \text{Equação 3.26}$$

$$M_v = -\frac{\delta}{(1-\delta)} \quad \text{Equação 3.27}$$

$$L_{crt} = \frac{(1-\delta)^2}{2f} \times \delta \times R_c \quad \text{Equação 3.28}$$

$$C_{min} = \frac{\delta}{f \times R_c} \times \frac{V_o}{V_{ripple}} \quad \text{Equação 3.29}$$

Existem outros conversores que seguem as topologias apresentadas mas possuem características diferentes, tal como o conversor CUK, que funciona como o Buck-Boost mas apresenta um ripple da tensão de saída inferior [101], ou o conversor flyback, derivado também do Buck-Boost, mas que usa um transformador em vez de uma bobine garantindo isolamento elétrico e potências de funcionamento superiores [102].

3.6. Algoritmos de seguimento de potência máxima – MPPT

3.6.1. Função do algoritmo de potência máxima

A energia fornecida por um painel fotovoltaico varia consoante as condições de irradiação solar, temperatura e orientação. Uma vez a operar na zona de funcionamento de potência máxima, basta ocorrer uma variação numa das condições para que o painel deixe de funcionar na zona de potência máxima.

Um conversor DC-DC comutado, devidamente escolhido e dimensionado, permite que um painel fotovoltaico trabalhe na sua zona de máxima potência para determinadas condições [103]. A transferência de energia neste tipo de conversores é gerida através de um sinal de PWM aplicado num semicondutor que funciona como chave, criando uma relação entre o duty-cycle e a zona de funcionamento do painel [104]. Para que um painel funcione sempre na sua zona de potência máxima, independentemente das condições meteorológicas, torna-se necessário dotar o conjunto painel-conversor de um circuito capaz de fazer um ajuste dinâmico do ponto de potência máxima, atuando

sobre a largura do pulso do sinal de PWM à medida que as condições se alteram. A implementação de um algoritmo de MPPT permite a procura dinâmica e constante do ponto de máxima transferência energética [105].

Técnicas de MPPT foram aplicadas pela primeira vez na década de 70 em centros de pesquisa de empresas como a Nasa [106] e a Honeywell Inc. [107]. Das técnicas de MPPT atualmente mais usadas destacam-se o método da Tensão Constante (CV – Constante Voltage), Tensão em Aberto (OV – Open Voltage), Corrente de Curto-circuito (SC – Short Current), Perturba e Observa (P&O – Perturbe and Observe) e Condutância Incremental (IC – Incremental Conductance) [108].

3.6.2. Método da Tensão Constante

O método da Tensão Constante (CV) apresenta-se como uma das implementações mais simples. Através da análise da curva I-V do painel fotovoltaico é retirado o valor da tensão de funcionamento V_{ref} para o qual a potência fornecida é máxima perante determinadas condições meteorológicas. Este valor de referência faz com que o conversor DC-DC mantenha a tensão de saída do painel igual à tensão de referência, independentemente das condições de funcionamento [108].

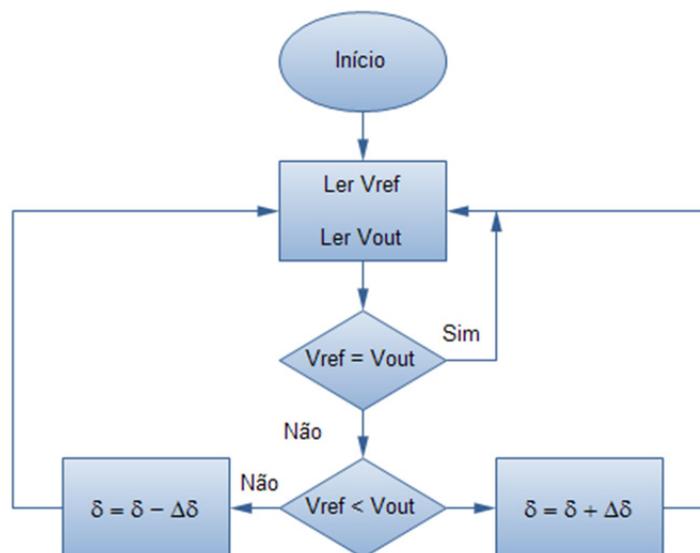


Figura 3.25: Fluxograma do Método da Tensão Constante.

Além da sua simplicidade, este método revela ser eficaz para condições de baixa irradiação solar. A desvantagem reside na impossibilidade de fazer um ajuste dinâmico consoante as condições de funcionamento.

3.6.3. Método da Tensão em Aberto (OV)

O método da Tensão em Aberto baseia-se na linearidade que existe na relação entre a tensão em aberto V_{oc} e a tensão de funcionamento no ponto de potência máxima V_{MPP} [109]. Dependendo do tipo de material que constitui o painel solar, a tensão V_{MPP} toma um valor entre 73% – 80% da tensão V_{oc} [110].

Para a implementação deste método, é necessária a aquisição prévia dos valores de V_{MPP} e V_{oc} para várias intensidades de irradiação solar, de forma a ser calculado o valor da constante K tal que:

$$V_{MPP} = K \times V_{oc} \qquad \text{Equação 3.30}$$

Após a determinação da constante K, é necessária a medição periódica, em pleno funcionamento, do valor V_{oc} . Para isso o painel é desligado do conversor, e o valor de tensão em aberto é registado. O valor de referência para o conversor será o resultado da multiplicação da constante K pelo valor V_{oc} [111]. O algoritmo do método da Tensão em Aberto é apresentado na Figura 3.26.

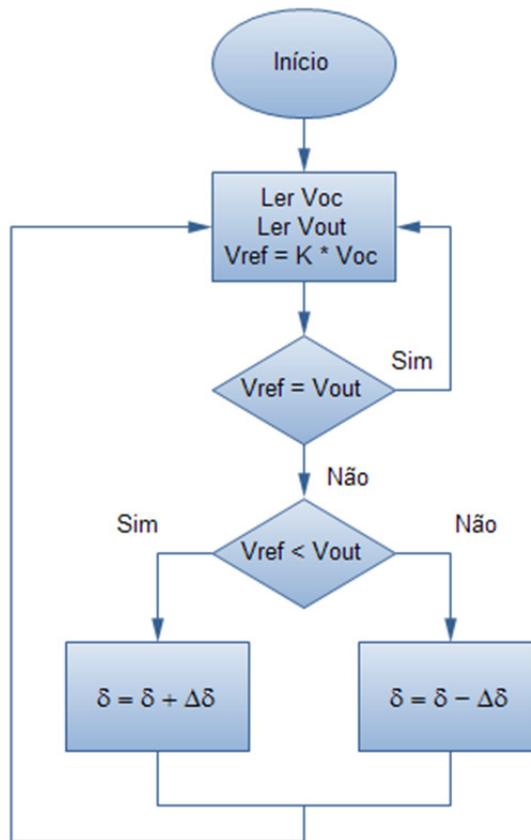


Figura 3.26: Fluxograma do Método da Tensão em Aberto.

Embora este método seja simples e apresente elevada rapidez, é necessária a introdução de um componente à saída do painel que abre o circuito para possibilitar a aquisição do valor de V_{oc} , logo, durante a amostragem não há transferência de energia para a saída o que faz baixar o rendimento [112].

Uma forma de evitar a abertura do circuito para efetuar a amostragem do sinal V_{oc} consiste na colocação de uma célula fotovoltaica piloto com as mesmas características junto ao painel fotovoltaico. A célula piloto é mantida sem carga, e a tensão V_{oc} utilizada é a presente nos seus terminais [113].

3.6.4. Método da Corrente de Curto-circuito (SC – Short Current)

Este método segue o princípio de funcionamento do método da Tensão em Aberto, mas agora aplicado à corrente [114]. A linearidade verificada entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga no ponto de potência máxima, permite estabelecer uma constante K tal que:

$$I_{MPP} = K \times I_{sc} \quad \text{Equação 3.31}$$

Uma vez determinado o valor da constante K , o valor da corrente de curto-circuito I_{sc} é obtido curto-circuitando o painel solar. Para isso é necessária a colocação de um elemento semiconductor com a função de chave, em paralelo com o painel solar. O algoritmo do método da Corrente de Curto-Circuito é apresentado na Figura 3.27.

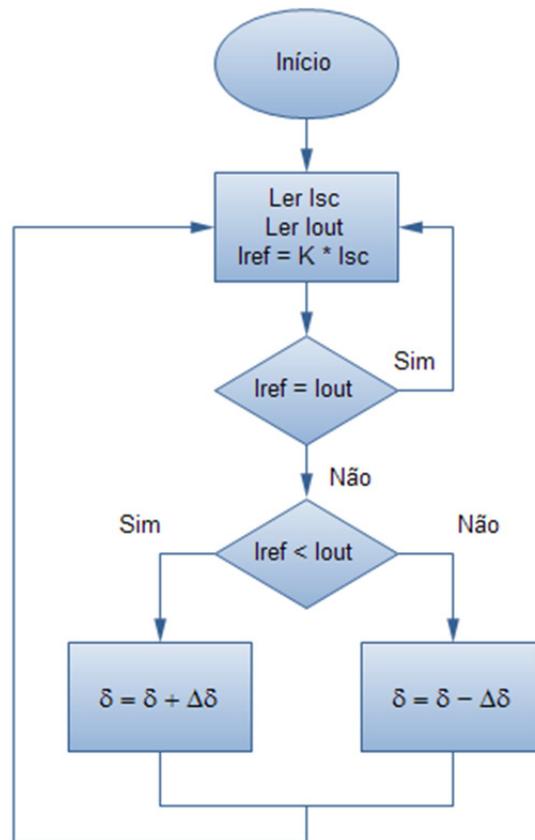


Figura 3.27: Fluxograma do Método da Corrente de Curto-circuito.

Mais uma vez, durante o período de amostragem do valor da corrente I_{sc} não é fornecida energia à carga. Para contornar este problema, pode ser usada uma célula piloto, tal como descrito no método da tensão em aberto, mas fornecendo agora o valor da corrente em curto-circuito [110].

3.6.5. Método de Perturba e Observa (P&O – Perturbe and Observe)

O método Perturba e Observa é um dos métodos mais comuns e simples de implementar. O seu princípio de funcionamento consiste na introdução de perturbações no circuito sob a forma de variação (aumento ou diminuição) da tensão, ou da corrente fornecida [115]. Sempre que uma perturbação

ocorre, são efetuadas as medições da corrente e da tensão para se calcular o novo valor da potência, que é comparado com o valor da potência prévia à perturbação. Caso a perturbação resulte num aumento da potência ($dP/dV > 0$), o circuito ajusta o ponto MPP nesse sentido. Todavia, se a potência diminuir, o conversor ajusta o novo ponto de MPP no sentido oposto. Por fim, dá-se novo ciclo de perturbação [116]. O algoritmo do método de Perturba e Observa é apresentado na Figura 3.28.

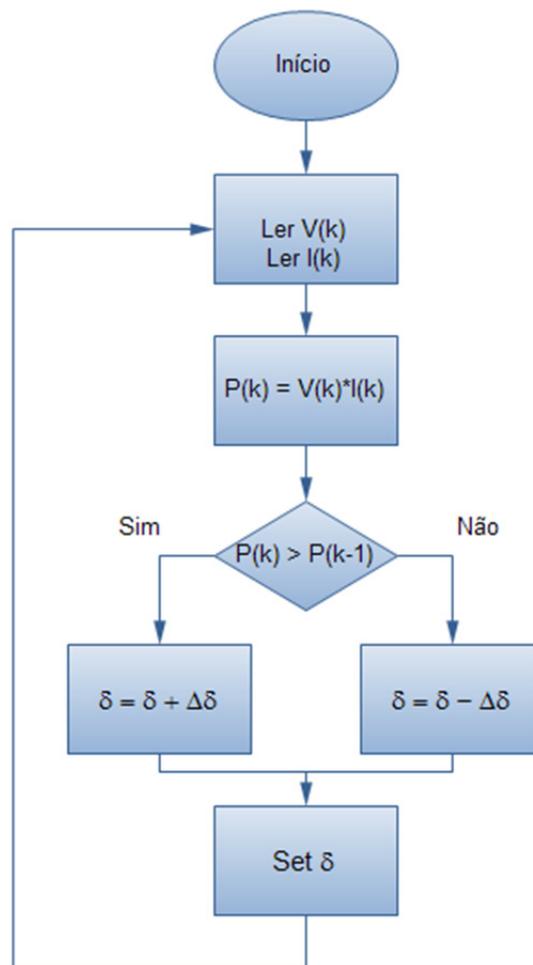


Figura 3.28: Fluxograma do Método de Perturba e Observa.

Um dos problemas inerentes a este método reside na constante perturbação do sistema. Uma vez achado o valor de MPP, a potência de saída vai oscilar em torno de um valor máximo, resultando na perda de rendimento. Este efeito é mais proeminente quando as condições climáticas variam lentamente. Contudo, outro problema pode ocorrer, desta vez provocado por alterações rápidas das condições climáticas [117].

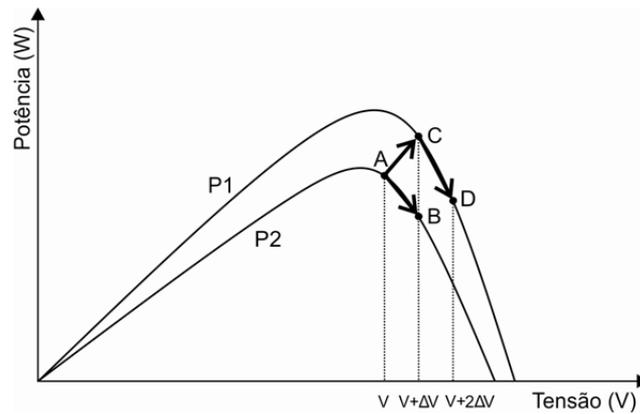


Figura 3.29: Procura do Método Perturba e Observa.

Analisando a Figura 3.29, e partindo do ponto A, se as condições climáticas se mantiverem, o algoritmo altera a zona de funcionamento para o ponto B. Como neste ponto a potência fornecida é inferior, a procura do algoritmo inverte o sentido. No entanto, se curva de potência sofrer uma alteração de P1 para P2 no intervalo de um ciclo de amostragem, devido a um aumento da irradiação solar, o ponto de operação muda de A para C. Como existe um aumento da potência, o algoritmo continua no mesmo sentido da perturbação, o que provoca um afastamento do ponto de MPP na nova curva de potência. Ocorrendo ainda no mesmo sentido, a perturbação seguinte encontra o ponto D, que se encontra ainda mais afastado do ponto de MPP [118] [119].

Existem vários tipos de algoritmos Perturba e Observa [120] [121]. Os mais usados são:

- Algoritmo Clássico – A amplitude da perturbação mantém um valor constante, por exemplo 2% da tensão do painel;
- Algoritmo Otimizado – É calculada a média resultante de várias amostras da potência de saída do painel para calcular de forma dinâmica a amplitude da perturbação;
- Algoritmo de 3 pontos – O sentido da perturbação é decidido após a medição da potência em 3 pontos de funcionamento: O ponto atual A, o ponto B, encontrado após uma perturbação, e o ponto C, encontrado após dupla perturbação no sentido oposto ao ponto B.

3.6.6. Método da Condutância Incremental

O método da Condutância Incremental baseia o seu princípio de funcionamento na premissa de que a derivada da potência em ordem à tensão é igual a zero no ponto de MPP [122].

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial(V \cdot I)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} = 0 \quad \text{No ponto de MPP} \quad \text{Equação 3.32}$$

Rearranjando a equação resulta:

$$-\frac{I}{V} = \frac{\partial I}{\partial V} \quad \text{Equação 3.33}$$

À semelhança do método Perturba e Observa, são amostrados os valores de tensão e corrente atual. O sistema irá sofrer uma perturbação no sentido ditado pelas três seguintes equações:

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -\frac{I}{V}; \left(\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \right) \quad \text{O ponto de MPP mantém-se.} \quad \text{Equação 3.34}$$

$$\frac{\partial I}{\partial V} > -\frac{I}{V}; \left(\frac{\partial P}{\partial V} > 0 \right) \quad \text{O ponto de MPP aumenta.} \quad \text{Equação 3.35}$$

$$\frac{\partial I}{\partial V} < -\frac{I}{V}; \left(\frac{\partial P}{\partial V} < 0 \right) \quad \text{O ponto de MPP diminui.} \quad \text{Equação 3.36}$$

A Figura 3.30 apresenta o algoritmo do método da Condutância Incremental.

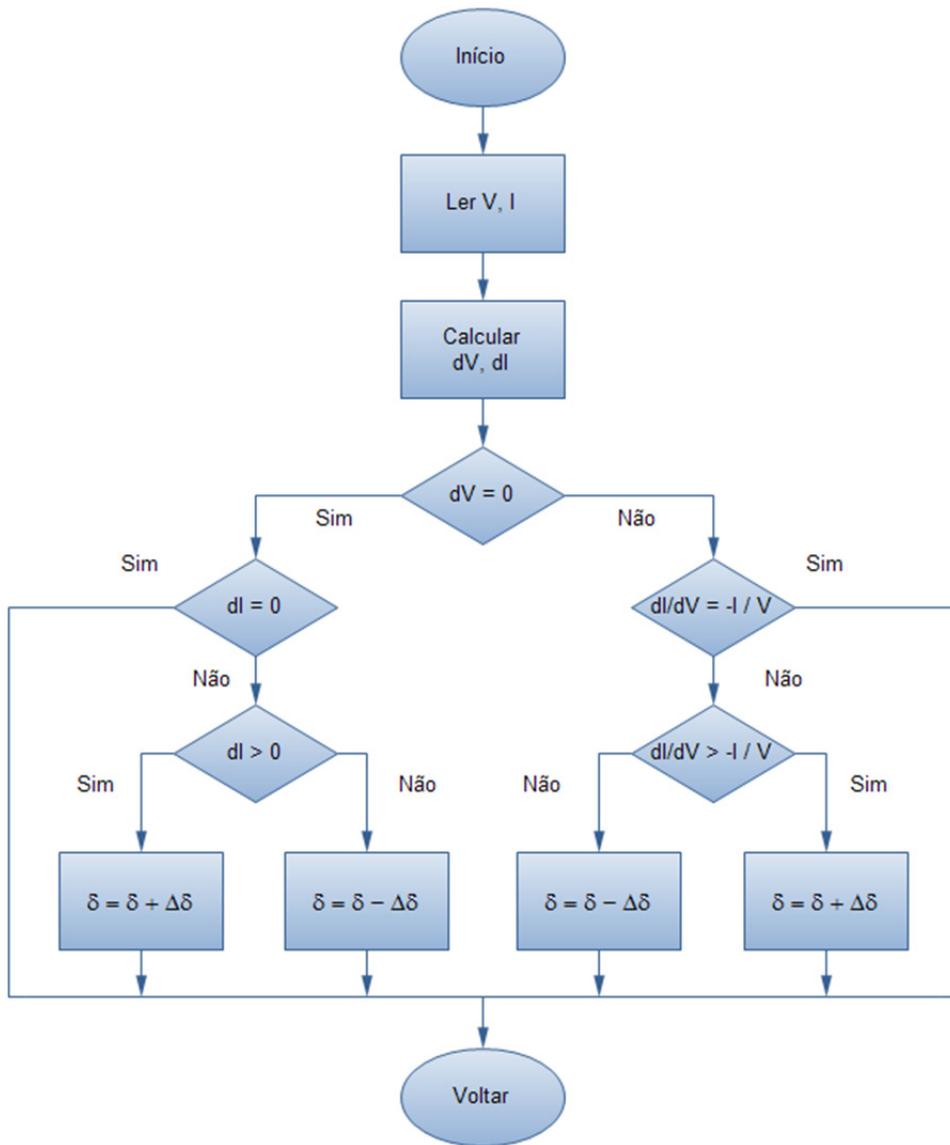


Figura 3.30: Algoritmo do Método da Condutância Incremental.

Este método, embora apresente um erro em regime permanente reduzido e uma boa resposta às rápidas alterações das condições climáticas [123], surge por vezes complementado com o método da Tensão Constante com o objetivo de aumentar o rendimento para valores inferiores da irradiação solar [124]. A Tabela 3.2 enumera os métodos referidos e resume as principais características de cada um.

Tabela 3.2: Comparação entre técnicas de MPPT

Comparação entre técnicas de MPPT							
Técnica de MPPT	Dependente do painel fotovoltaico	Procura dinâmica	MPPT real	Velocidade de convergência	Complexidade na implementação	Eficiência durante a aquisição de sinais	Sinais medidos
Tensão constante	Sim	Não	Não	Alta	Baixa	Alta	–
Tensão em aberto	Sim	Sim	Não	Média	Baixa	Baixa	Tensão
Corrente de curto-circuito	Sim	Sim	Não	Média	Média	Baixa	Corrente
Perturba e observa	Não	Sim	Sim	Variável	Média	Alta	Tensão, corrente
Condutância incremental	Não	Sim	Sim	Variável	Média	Alta	Tensão, corrente

3.7. Substratos

3.7.1. Polidimetilsiloxano (PDMS)

O PDMS é uma borracha de silicone comercial que, devido às suas características, apresenta um leque alargado de aplicações em diversas áreas, tais como na eletrônica [125], na construção de sensores mecânicos [126], e na medicina, na construção de próteses [127].

A sua estrutura química (Figura 3.31) apresenta uma cadeia linear de átomos de silício e oxigênio (siloxanas), alternados com radicais metila (CH_3) ligados a átomos de silício, conferindo-lhe propriedades únicas [128].

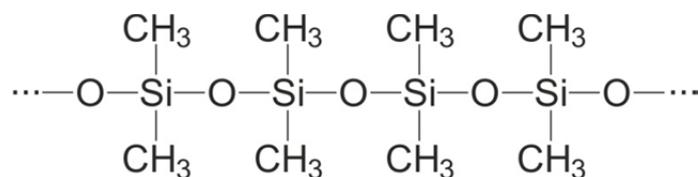


Figura 3.31: Estrutura química do PDMS.

Devido à sua composição química, o PDMS comporta-se como um material termo-rígido de elevada elasticidade, alta resistência ao calor e à chama, fisiologicamente inerte, boa propriedade dielétrica, resistência ao envelhecimento, resistência à degradação por exposição à radiação ultravioleta e superfície naturalmente hidrofóbica [128]. A sua flexibilidade e elasticidade permanecem constantes

numa larga faixa de temperaturas (-45 a 200 °C) [129]. Além das qualidades citadas, o PDMS apresenta também um baixo custo de fabrico [130].

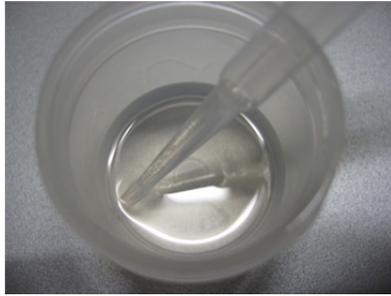


Figura 3.32: Amostra de PDMS no estado líquido.

O Módulo de Young para o PDMS, relação entre a força aplicada e a elasticidade do material, situa-se entre 12,5 kPa e 4 MPa dependendo da proporção de agente cura para agente base utilizados, e da temperatura da cura [131] [132]. A Figura 3.33 mostra o módulo de Young típico para uma amostra de PDMS [133].

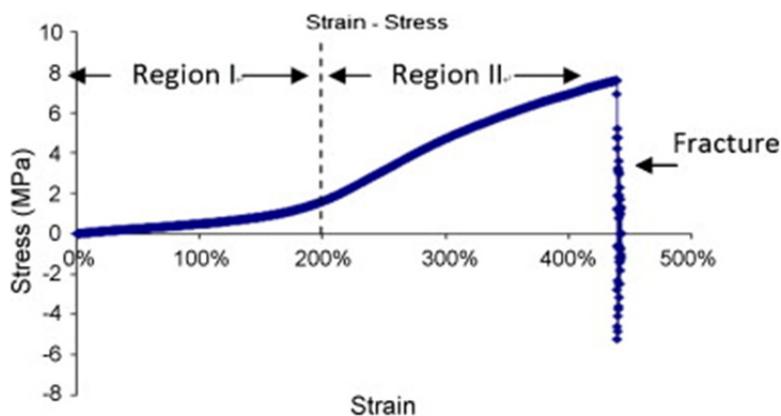


Figura 3.33: Módulo de Young típico para uma amostra de PDMS.

O PDMS pode ser adquirido num kit que consiste em duas partes: um pré-polímero, apelidado de Agente Base, e um agente endurecedor, apelidado de Agente Cura, apresentando-se ambas as partes no estado líquido. A mistura dos dois agentes deve obedecer à proporção de 1/10, isto é, uma parte de Agente Cura para 10 partes de Agente Base. Após a mistura, o composto pode receber um tratamento térmico para reduzir ao tempo de solidificação. Este tratamento térmico pode consistir, por exemplo, numa exposição a 80 °C durante 2 h [133] podendo demorar 48 h quando à temperatura ambiente [134].

No decorrer desta dissertação o PDMS mereceu particular interesse no fabrico de um substrato de interligação entre o painel solar e o circuito de PCB. O estado líquido inicial permite a realização de um molde adaptado ao perfil dos componentes eletrónicos, que ficam assim protegidos contra humidades e efeitos abrasivos passíveis de ocorrer entre o painel e o circuito impresso devido à flexibilidade do conjunto.

O PDMS utilizado foi adquirido à empresa Down Corning com a referência Sylgard 184 [134].

3.7.2. PCB flexível

As placas de circuito impresso mais comuns, sejam de resina fenólica, resina epóxi reforçada com tecido de fibra de vidro, PTFE (politetrafluoroetileno) ou mesmo cerâmicas, apresentam elevada rigidez, impossibilitando o seu uso no fabrico de circuitos flexíveis.

A empresa Dupont comercializa placas de circuito impresso flexíveis, compostas por três camadas: Uma primeira camada de poliimida, uma segunda camada de adesivo acrílico e uma terceira camada de cobre [135].

A primeira camada serve de substrato, e é constituída por poliimida, um polímero flexível resistente a altas temperaturas por longos períodos de tempo. A sua espessura pode variar de 25 μm a 127 μm . Devido à sua estabilidade térmica elevada, a sua utilização está bastante difundida na indústria aeroespacial e eletrónica, principalmente no fabrico de placas de circuito impresso flexíveis [136].

A segunda camada, constituída por adesivo acrílico numa espessura que pode variar entre 13 μm a 51 μm , tem a função de adesão entre a primeira e a terceira camada. A última camada é constituída por cobre, e pode ser encontrado nas quantidades de 153 g/m^2 a 610 g/m^2 .

A empresa Dupont apelida o seu composto de poliimida de Kapton, e a placa de circuito impresso composta pelas três camadas de Pyralux (Figura 3.34). A espessura total varia consoante a quantidade de material usado em cada camada.

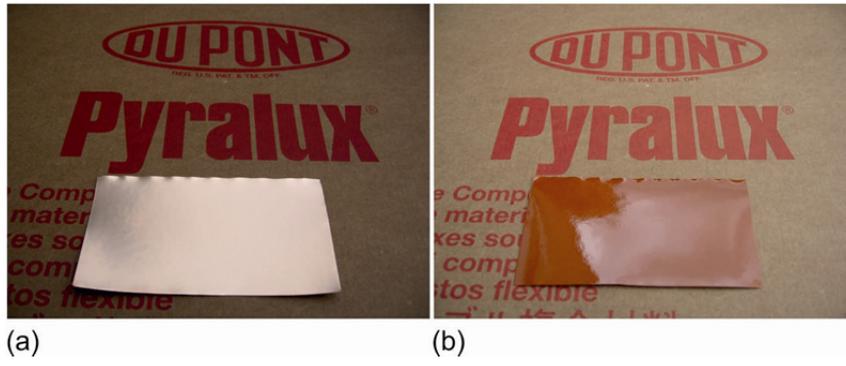


Figura 3.34: PCB Flexível. a) lado com cobre, b) lado com poliimida.

4. PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

4.1. Componentes

A construção de um protótipo funcional, capaz de cumprir os objetivos propostos, relegou particular atenção na escolha dos principais componentes. Os valores reduzidos de potência envolvida e o pré-requisito da mínima espessura possível do protótipo ditaram a escolha de circuitos integrados de elevado rendimento na tecnologia SMD, ao passo que a flexibilidade final ditou a escolha de um painel fotovoltaico e placa de PCB flexíveis.

Os principais componentes constituintes do protótipo são:

- Bateria de Li-Po flexível de espessura reduzida.
- Painel fotovoltaico flexível.
- Conversor DC-DC
- IC de proteção da bateria.
- PCB flexível.
- Substrato de ligação

O diagrama de blocos do circuito realizado pode ser visualizado na Figura 3.35.

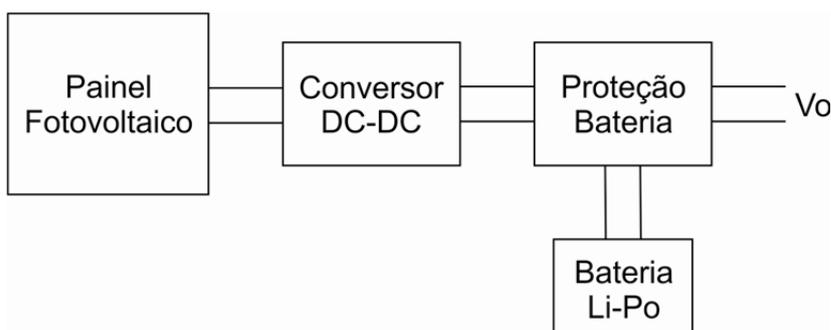


Figura 3.35: Diagrama de blocos do circuito realizado.

4.1.1. Bateria

A bateria utilizada na construção do protótipo foi adquirida ao fabricante PowerStream no modelo PGEB0054338. Com a dimensão de 43 mm X 38 mm e espessura de apenas 0,6 mm, esta bateria

apresenta uma capacidade de 45 mAh e uma tensão de funcionamento de 3,7 V. O fabricante recomenda uma tensão mínima e máxima de corte de 2,8 V e 4,2 V respetivamente.

A Figura 3.36 revela o comportamento estável deste tipo de baterias, mesmo para valores elevados de corrente na ordem dos 10 C.

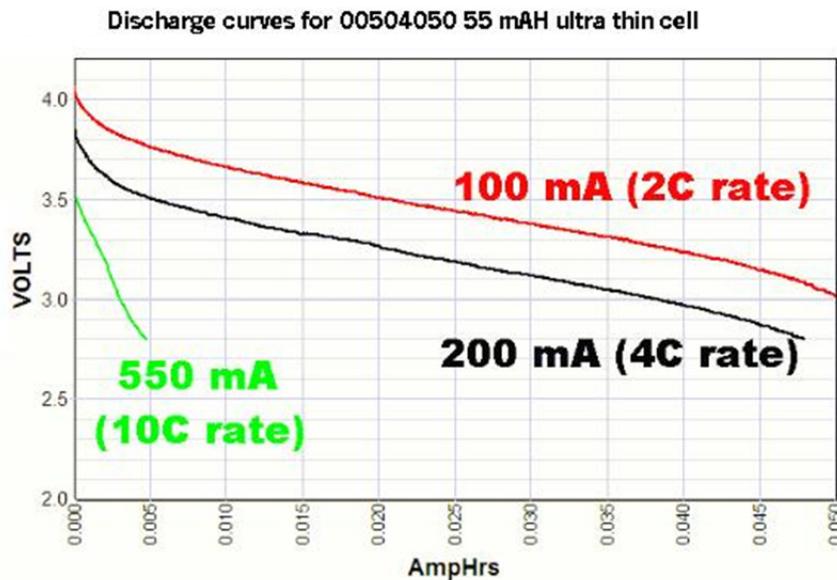


Figura 3.36: Curvas de descarga para uma bateria de 55 mAh do fabricante Powerstream.

Apresentando uma taxa de auto-descarga de apenas 3% por mês e elevada flexibilidade, esta bateria reúne assim todos os requisitos necessários para a sua integração no protótipo.

4.1.2. Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado foi adquirido à empresa Powerfilm Solar no modelo MP3-37. Este painel, constituído por silício amorfo, apresenta 114 mm de comprimento por 37 mm de largura, resultando numa área total de 42,18 cm². A potência máxima é de 0,15 W, resultado da incidência da máxima irradiação solar, para a tensão de funcionamento de 3 V, fornecendo uma corrente de 50 mA. A Tabela 3.3 resume as principais características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.3: Características do painel fotovoltaico MP3-37 da Powerfilm Solar.

Painel fotovoltaico MP3-37				
Corrente	Tensão de funcionamento	Potência máxima	Dimensões	Peso
50 mA	3 V	0.15 W	114 mm x 37 mm	1.2 g

Pela análise da curva I-V da Figura 3.37, também fornecida pelo fabricante, é possível retirar o valor máximo da corrente de curto-circuito e tensão em aberto, que tomam os valores de 70 mA e 4,3 V respetivamente. Confrontando os dados da Tabela 3.3 com a curva I-V da Figura 3.37 é revelada alguma incoerência quanto ao ponto de funcionamento que faculta a máxima potência. Segundo a tabela, o MPP surge a uma tensão de 3 V dando origem a uma corrente de 50 mA, enquanto o gráfico revela que para uma tensão de funcionamento de 3 V surge uma corrente de 60 mA.

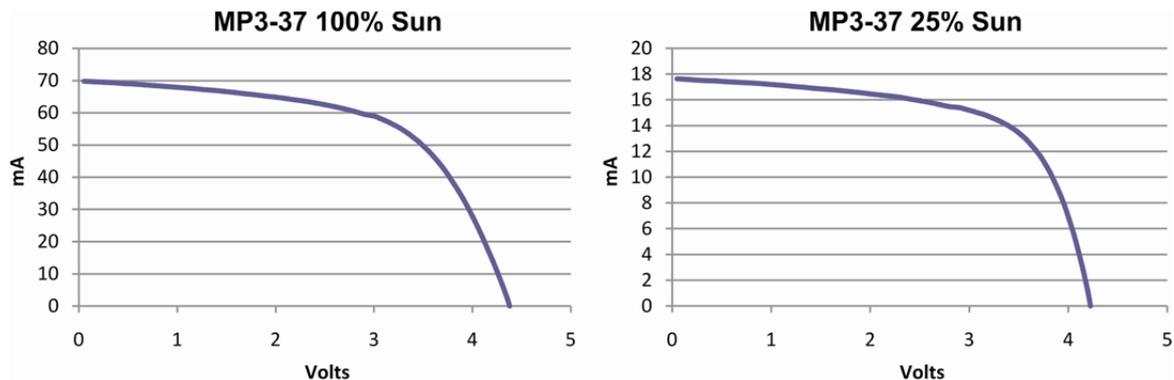


Figura 3.37: Curvas I-V do painel fotovoltaico MP3-37 da Powerfilm Solar para 100% e 25% da irradiação solar.

Com um peso reduzido de 1,2 g e apresentando elevada flexibilidade, este painel fotovoltaico reúne todas as características necessárias à construção do protótipo.

4.1.3. Conversor DC-DC

A empresa Linear Technology disponibiliza o conversor DC-DC Step Up de referência LTC3105 específico para aplicações de baixa potência. Este circuito integrado arranca com tensões reduzidas, na ordem dos 250 mV, e incorpora um controlo do MPP passível de ajuste pelo utilizador, tornando compatível o uso de fontes de energia com impedância elevada, tais como painéis solares. A tensão de saída pode ser ajustada entre 1,5 V e 5,25 V para uma corrente máxima de 400 mA. O rendimento deste circuito integrado é elevado, podendo ultrapassar os 90%, e possui uma corrente quiescente de apenas 10 uA. Este conversor oferece ainda uma proteção térmica integrada e existe na tecnologia SMD, apresentando uma espessura de apenas 0,75 mm.

4.1.4. IC de proteção da bateria

A necessidade de proteção da bateria de lítio obriga ao uso de um circuito com a função de gerir a carga e descarga da bateria. O circuito integrado de referência LTC4071 da Linear Technology faculta a proteção contra sobretensões, passíveis de ocorrer durante a carga da bateria, e subtensões, que podem ocorrer durante a descarga da bateria. A tensão máxima de proteção pode ser pré-selecionada entre 4,0 V, 4,1 V ou 4,2 V, enquanto a tensão mínima pode ser ajustada para 2,7 V ou 3,2 V. Os valores reduzidos de corrente quiescente e de corrente de funcionamento, inferiores a 0,1 nA e 550 nA respetivamente, fazem com que o rendimento seja elevado. Este circuito integrado permite ainda correntes de carga que podem variar de 550 nA a 50 mA, e a sua integração no circuito é muito simples, sendo necessário apenas o dimensionamento de uma resistência. A Figura 3.38 mostra os componentes centrais do circuito a montar.

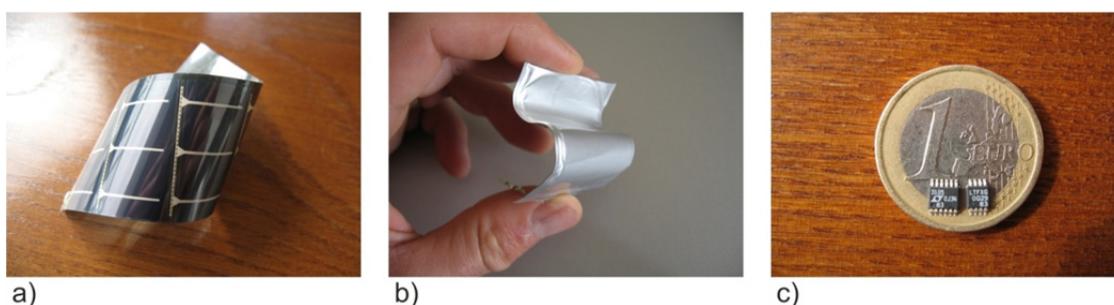


Figura 3.38: Principais componentes do circuito: a) Painel fotovoltaico, b) bateria de lítio flexível, c) IC's de controlo e proteção.

4.2. Estudo do Painel Fotovoltaico

O primeiro passo consistiu no estudo do painel fotovoltaico e do seu comportamento perante diferentes condições de funcionamento. Os principais fatores que se tiveram em conta foram a temperatura de funcionamento e a intensidade da irradiação solar, sendo que uma alteração de um destes parâmetros implica uma alteração da zona ideal de funcionamento.

Para determinar a influência da temperatura do painel fotovoltaico na obtenção de energia elétrica, foram efetuados dois testes a temperatura de funcionamento distintas, e retirada a curva I-V característica.

O painel fotovoltaico e as células sensoriais dos equipamentos de medida foram colocados num cartão, ficando assim no mesmo plano e com a mesma orientação. O valor de irradiação solar para ambas as situações situou-se nos 640 W/m² (valor registado por volta das 11 h), estando o painel perfeitamente

orientado em direção ao sol. Esta orientação foi realizada fazendo primeiro o ajuste do azimute (ângulo relativo ao norte no sentido horário), seguido do ajuste da elevação (ângulo relativo ao horizonte), definindo assim ambos os ângulos que providenciaram o máximo valor de irradiação. A temperatura do painel foi obtida através de um termopar acoplado à parte traseira do painel, e visualizada num multímetro.

Para a realização do teste a uma temperatura mais elevada, o painel fotovoltaico foi exposto à luz solar até se registrar uma temperatura constante, obtida a 54 °C. O segundo teste foi realizado nas mesmas condições de irradiação e orientação, mas recorrendo a ventilação forçada, fazendo a temperatura do painel estabilizar a 27 °C. Os resultados estão descritos no gráfico resultante, que se pode visualizar na Figura 3.39.

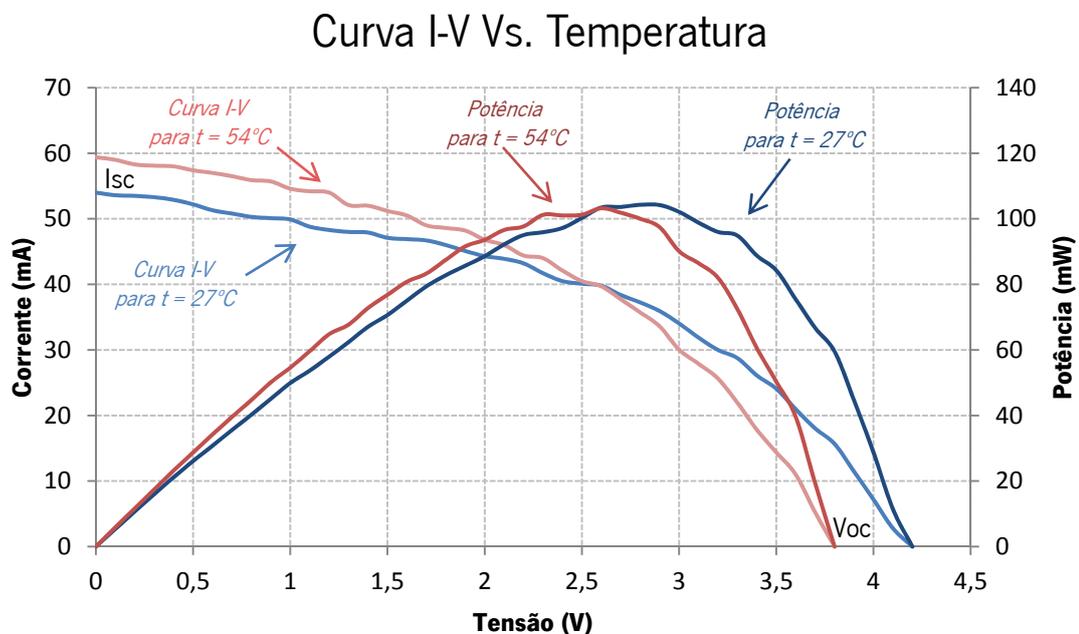


Figura 3.39: Efeito da temperatura na curva I-V do painel fotovoltaico.

Pela análise do gráfico resultante pode-se constatar que à medida que a temperatura de funcionamento aumenta, a potência elétrica fornecida pelo painel não sofre uma variação significativa, diminuindo apenas marginalmente, ao passo que o ponto ótimo de funcionamento vê o seu valor variar de forma mais acentuada. Com o aumento da temperatura, o valor de tensão de funcionamento para o qual o painel fornece o valor máximo de potência elétrica, desce de um valor que ronda os 2,8 V para sensivelmente 2,6 V.

Alterações surgem também nos valores de tensão em aberto V_{oc} , que diminui com o aumento da temperatura, e corrente de curto-circuito I_{sc} , que aumenta com a subida da temperatura.

É também de constatar que, para ambas as situações, o ponto ótimo de funcionamento para o qual a potência extraída do painel é máxima surge sensivelmente a 68% da tensão em aberto V_{oc} , tal como mostram as Equação 3.37, Equação 3.38 e Equação 3.39, onde K define a relação percentual entre a tensão de funcionamento (V_{MPP}) e a tensão em aberto (V_{oc}).

$$P_{\max} \rightarrow K = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \times 100 \quad \text{Equação 3.37}$$

$$\text{Para } t = 27^{\circ}\text{C} \quad K = \frac{2,8}{4,15} \times 100 \approx 68\% \quad \text{Equação 3.38}$$

$$\text{Para } t = 54^{\circ}\text{C} \quad K = \frac{2,6}{3,8} \times 100 \approx 68\% \quad \text{Equação 3.39}$$

Embora seja possível encontrar o valor exato de tensão de funcionamento para o qual o painel fornece a potência máxima, é de salientar que em ambas as situações existe um intervalo de valores de V_{MPP} relativamente alargado onde a potência não diminui significativamente. Para 27°C esse intervalo situa-se entre $2,5\text{ V} \leq V_{MPP} \leq 3\text{ V}$ e para 54°C situa-se entre $2,3\text{ V} \leq V_{MPP} \leq 2,8\text{ V}$.

Sabendo as potências de entrada e de saída, o rendimento real do painel fotovoltaico adquirido pode ser calculado pela Equação 3.40:

$$\eta(\%) = \frac{P_o}{P_i} \times 100 = \frac{104,3 \times 10^{-3}}{640 \times 42,18 \times 10^{-4}} \times 100 = 3,86\% \quad \text{Equação 3.40}$$

Em que:

$P_o = 104,3 \times 10^{-3}\text{ W}$ (Potência de saída do painel)

$P_i = 640\text{ W} / \text{m}^2 \times 42,18 \times 10^{-4}\text{ m}^2$ (Multiplicação da potência da irradiação solar por m^2 pela área do painel)

Outro fator que influencia o ponto ótimo de funcionamento é o valor da irradiação solar incidente, pelo que foi efetuado um registo do comportamento do painel fotovoltaico perante valores de irradiação distintos. Os resultados são demonstrados na Figura 3.40.

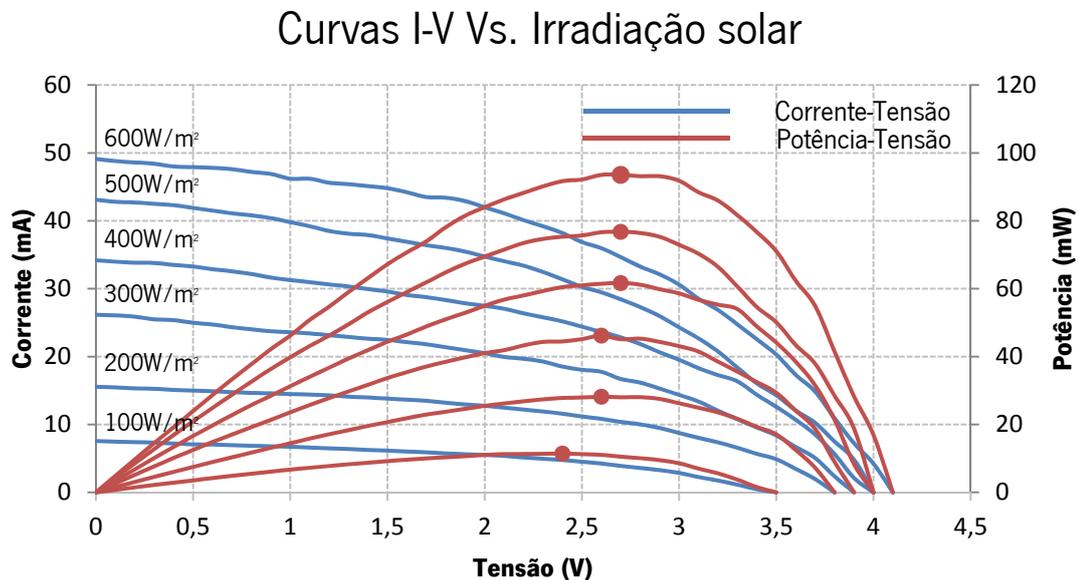


Figura 3.40: Curvas I-V e de potência do painel fotovoltaico para várias intensidades de irradiação solar.

A diminuição do valor da irradiação solar provoca uma diminuição acentuada da corrente fornecida pelo painel, e uma redução menos significativa da tensão. O ponto funcionamento de máxima potência baixa ligeiramente de 2,7 V para 2,4 V.

4.2.1. Escolha do valor de V_{MPP}

O circuito realizado permite o ajuste do ponto de potência máxima, isto é, permite o ajuste da tensão de funcionamento V_{MPP} do painel fotovoltaico no sentido da máxima potência elétrica fornecida perante as condições de iluminação, orientação e temperatura atuais.

O estudo efetuado ao painel fotovoltaico revela que a máxima potência surge para uma tensão de funcionamento que varia entre 2,4 V e 2,7 V dependendo das condições meteorológicas. O teste seguinte foi realizado com o intuito de conhecer o efeito do circuito de gestão de energia, ligado à saída do painel fotovoltaico, sobre o valor de V_{MPP} ótimo.

Para a escolha do ponto ótimo de funcionamento foi fixada uma tensão de funcionamento V_{MPP} e foram determinadas as curvas de potência resultantes da exposição do painel fotovoltaico a diferentes valores de irradiação solar. O mesmo procedimento foi efetuado para todos os valores de V_{MPP} compreendidos

entre 1,7 V e 3,3 V com incrementos de 0,1 V. Os resultados mais significativos podem ser visualizados no gráfico da Figura 3.41 e Figura 3.42.

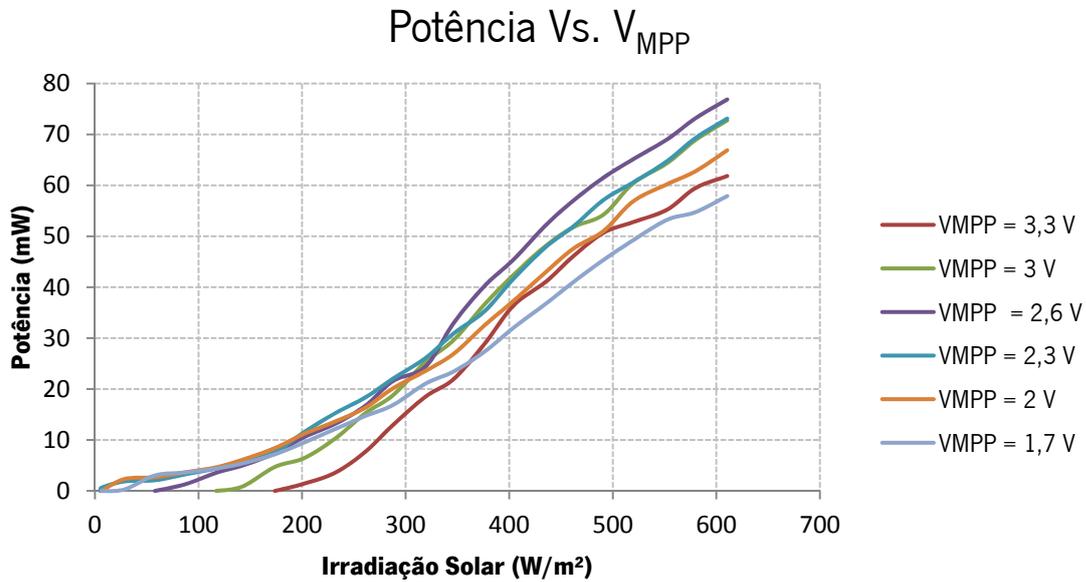


Figura 3.41: Potência Vs. V_{MPP} .

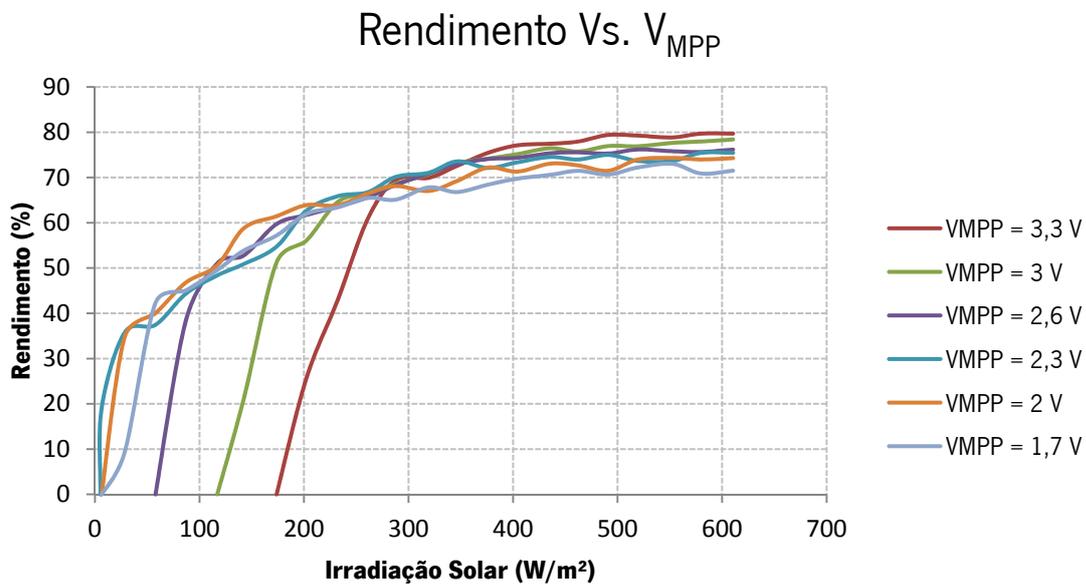


Figura 3.42: Rendimento Vs. V_{MPP} .

Pela análise dos gráficos resultantes pode-se concluir que, embora o circuito forneça a máxima potência de pico para uma tensão de funcionamento em torno de 2,6 V, valor coincidente com o valor de MPP do painel fotovoltaico, o ponto de funcionamento em torno de 2,3 V apresenta uma performance global mais satisfatória: Com um fornecimento de energia marginalmente inferior para

valores de irradiação elevados, o ajuste do valor de funcionamento para 2,3 V faculta um rendimento superior para a restante gama de valores de irradiação solar, além de permitir o funcionamento do circuito até níveis de irradiação consideravelmente inferiores.

A Figura 3.43 e Figura 3.44 apresentam o comportamento do circuito para os valores próximos de 2,3 V.

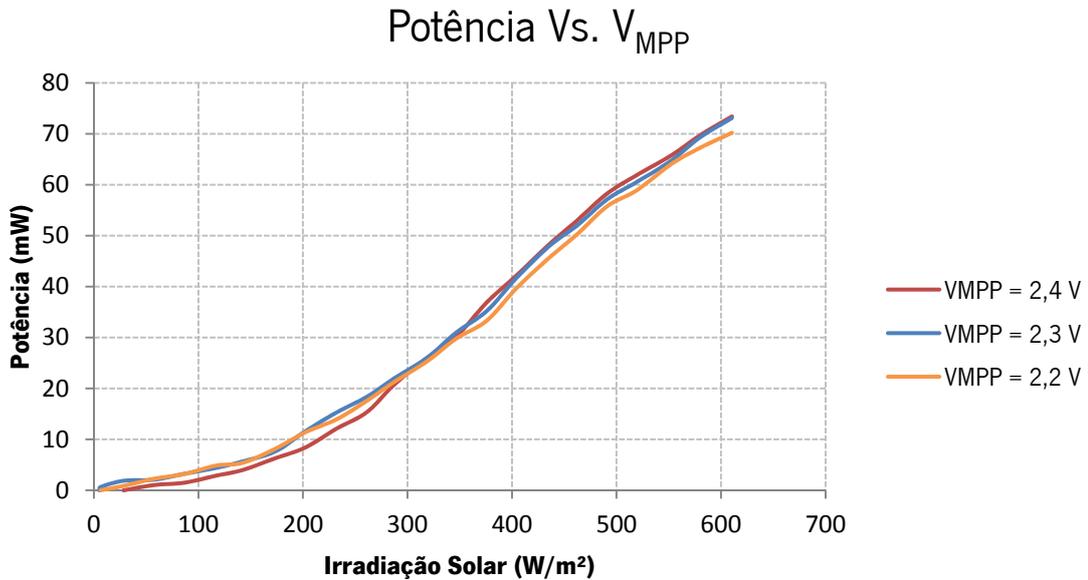


Figura 3.43: Valores de V_{MPP} que proporcionam potência superior com baixa irradiação solar.

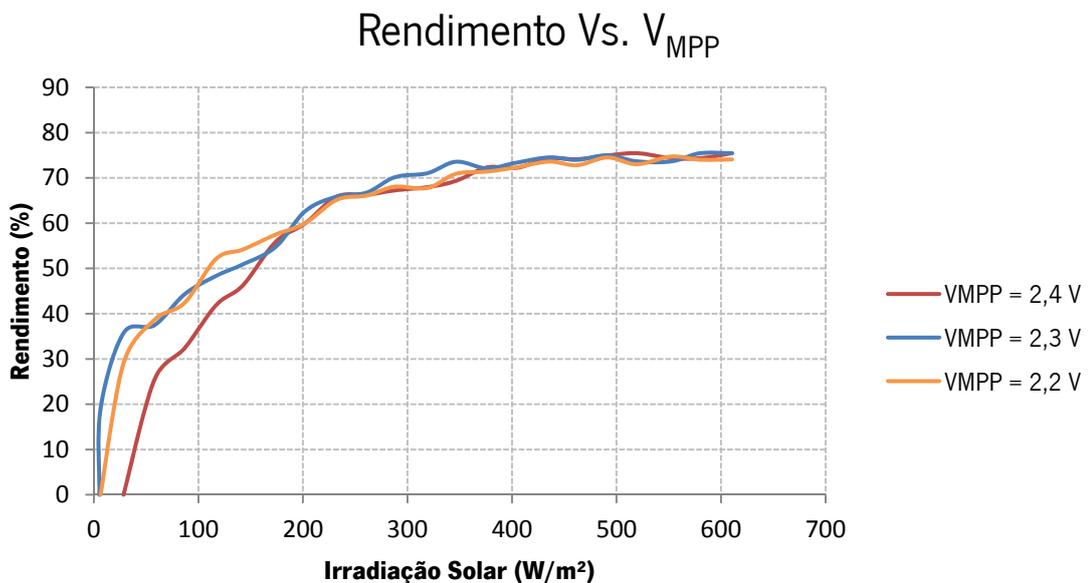


Figura 3.44: Valores de MPP que proporcionam rendimento superior com baixa irradiação solar.

Perante os resultados, mais uma vez se comprovou que para $V_{MPP}=2,3$ V o circuito fornece uma potência superior para níveis de irradiação médios/baixos, permitindo a carga da bateria até valores de irradiação inferiores.

Confrontando os resultados obtidos com o gráfico de Eficiência Vs. Tensão de entrada do conversor DC-DC (Figura 3.45), mais uma vez se justifica a escolha do valor ótimo de funcionamento, pois o conversor revela-se mais eficiente para uma tensão de entrada a rondar os 2,3 V.

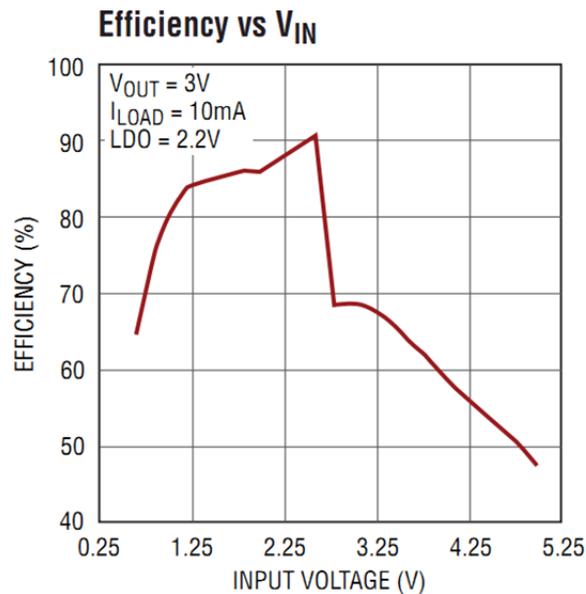


Figura 3.45: Eficiência do conversor DC-DC Vs. Tensão de entrada.

4.3. Circuito do conversor DC-DC

As fichas técnicas dos circuitos integrados utilizados recomendam um circuito otimizado para a sua montagem, sendo necessário o cálculo do valor de alguns componentes para que o circuito funcione de acordo com as especificações requeridas. A Figura 3.46 mostra o circuito recomendado para a montagem do circuito integrado LTC3105 da Linear Technology:

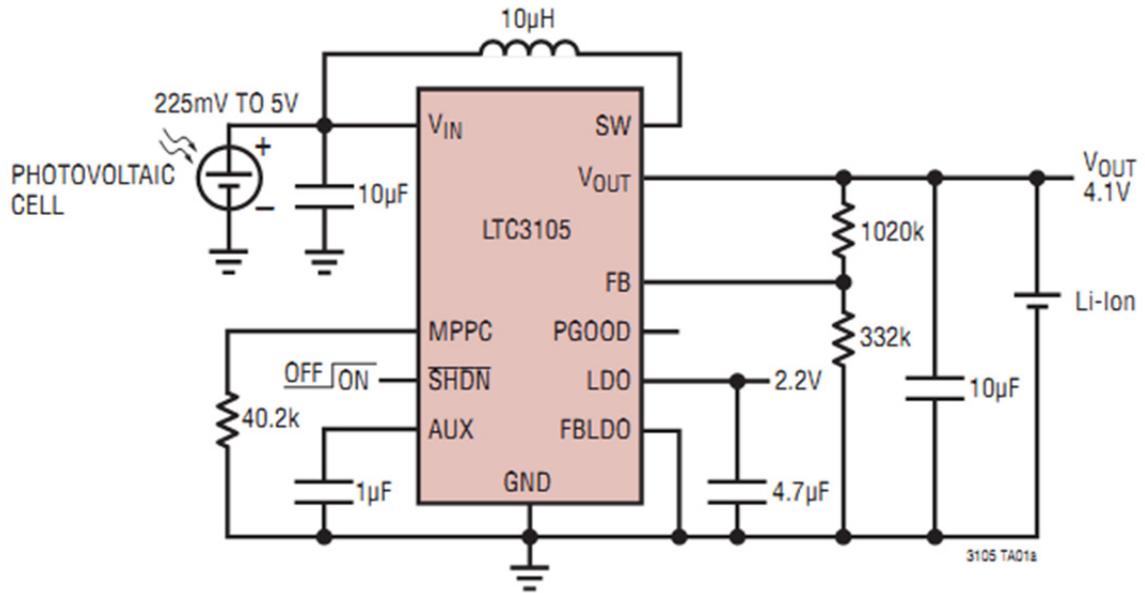


Figura 3.46: Circuito recomendado para o circuito integrado LTC3105.

Este conversor DC-DC permite o ajuste da tensão de saída e do ponto de máxima potência. O ajuste da tensão de saída é realizado através do divisor de tensão aplicado entre a saída V_{out} e a entrada FB (feedback) do conversor, cujos valores das resistências são obtidos segundo a Equação 3.41:

$$V_{out} = 1.004V \times \left(\frac{R1}{R2} + 1 \right) \quad \text{Equação 3.41}$$

A bateria apresenta a máxima capacidade quando se encontra carregada a 4,2 V, logo, será este o valor mínimo de tensão que o conversor DC-DC deverá fornecer. A entrada FB apresenta uma impedância elevada por estar ligada internamente a um amplificador operacional. Esta característica permite o uso de um divisor resistivo constituído por resistências de valor elevado, reduzindo assim a corrente necessária para o circuito de feedback. Arbitrando um valor resistivo relativamente elevado de 1 M Ω para R1, garantindo à partida que a corrente retirada da saída não excede 4 μ A, o valor de R2 será:

$$4,2V = 1,004V \times \left(\frac{1M\Omega}{R2} + 1 \right) \rightarrow R2 \approx 314,1k\Omega \quad \text{Equação 3.42}$$

O ajuste do valor da tensão de funcionamento (V_{MPP}) que permite a máxima potência é efetuado através do valor da resistência (R_{MPPC}), colocada entre o pino MPPC e a massa, cujo valor é definido pela Equação 3.43.

$$V_{MPP} = 10\mu A \times R_{MPPC} \quad \text{Equação 3.43}$$

Para $V_{MPP} = 2,3V$ vem:

$$2,3V = 10\mu A \times R_{MPPC} \rightarrow R_{MPPC} = 230k\Omega \quad \text{Equação 3.44}$$

4.4. Circuito de proteção da bateria

O circuito de proteção contra sobre e subtensões faz uso do circuito integrado LTC4071 da Linear Technology. A Figura 3.47 apresenta a configuração recomendada.

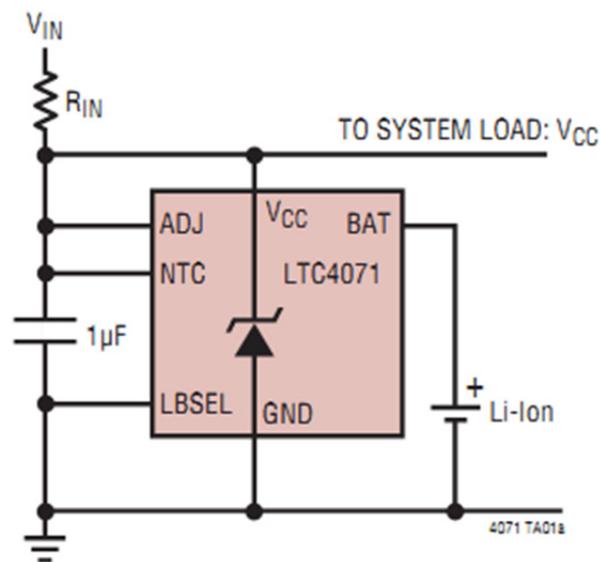


Figura 3.47: Circuito recomendado para o circuito integrado LTC4071.

A entrada ADJ define o valor máximo da tensão para o qual a bateria deixa de receber carga, sendo possível escolher entre 3 valores: 4,0 V, 4,1 V ou 4,2 V consoante o pino ADJ seja ligado à massa, deixado em aberto ou ligado à alimentação de entrada respetivamente. Como se pretende a carga da bateria até 4,2 V o pino ADJ foi ligado à alimentação de entrada.

A entrada LBSEL define o valor de proteção contra subtensões, permitindo a escolha entre 2,7 V e 3,2 V consoante o pino seja ligado à alimentação de entrada ou à massa respetivamente. A escolha de 2,7 V como limite de proteção inferior em detrimento de 3,2 V permite retirar mais energia da bateria, aumentando assim a autonomia em prejuízo da longevidade. A escolha do valor de 2,7 V foi selecionada fazendo a ligação do pino LBSEL à alimentação de entrada.

O circuito integrado LTC4071 permite desviar para a massa até 50 mA de corrente de carga a partir do momento em que a tensão da bateria atinge 4,2 V. Caso a corrente de carga ultrapasse esse valor, torna-se necessário colocar uma resistência de entrada R_{IN} para limitar a corrente de entrada a um máximo de 50 mA. O valor da resistência de carga é definido segundo a Equação 3.45, em que V_{IN} é a tensão de entrada do circuito de proteção, V_{BAT} é a tensão atual presente aos terminais da bateria e I_{CARGA} é a corrente de carga da bateria.

$$I_{CARGA} = \frac{(V_{IN} - V_{BAT})}{R_{IN}} \quad \text{Equação 3.45}$$

A corrente de carga é máxima quando a bateria se encontra descarregada, isto é, quando apresenta o valor de 2,7 V aos seus terminais. Dado que foi escolhido o valor 4,2 V como saída do conversor DC-DC, e sendo este o valor aplicado à entrada do circuito de proteção, R_{IN} toma o valor de:

$$50mA = \frac{(4,2 - 2,7)}{R_{IN}} \rightarrow R_{IN} = 30\Omega \quad \text{Equação 3.46}$$

Como painel fotovoltaico escolhido fornece uma corrente máxima de 50 mA no ponto de funcionamento de máxima potência, a resistência de 30 Ω não foi necessária.

4.5. Circuito Final

O circuito final consistiu na ligação em série do conversor DC-DC com o circuito de proteção da bateria, e pode ser visualizado na Figura 3.48.

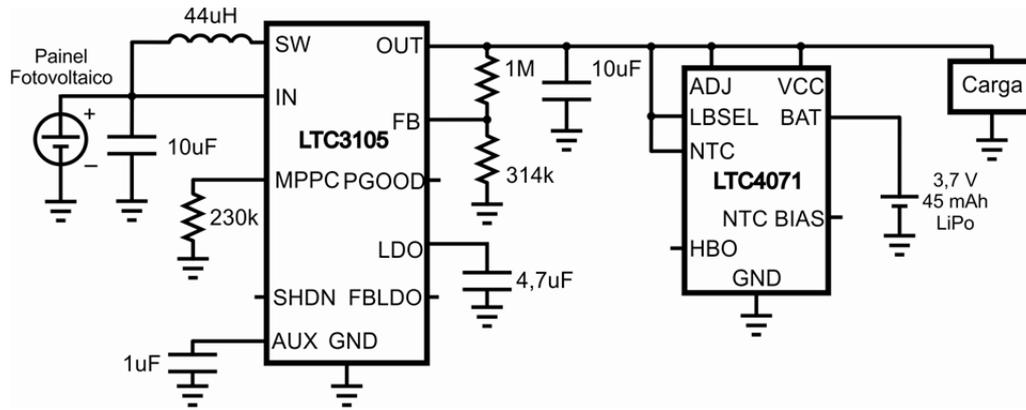


Figura 3.48: Circuito final.

4.6. Montagem e testes do circuito proposto

O circuito proposto foi montado em *breadboard* para assim testar o seu funcionamento. A montagem dos componentes SMD foi feita através de adaptadores de MSOP para DIP fabricados especialmente para o efeito. As medições de irradiação solar e luminosidade foram efetuadas recorrendo ao uso dos seguintes equipamentos de medição:

- Radiómetro Delta Ohm HD2102.1 com célula de irradiação solar LP471 (0,1 W/m² a 2000 W/m²; 400 nm a 1050 nm) cedido pelo Departamento de Física da Universidade do Minho;
- Luxímetro TES 1335 (0 a 400.000 Lx) cedido pelo Departamento de Eletrónica de Potência da Universidade do Minho.



Figura 3.49: Luxímetro (à esquerda) e radiómetro (à direita) com as células no plano do painel fotovoltaico.

A medição das correntes e tensões foram efetuadas por multímetros digitais.

4.6.1. **Influência do valor da indutância do conversor DC-DC no rendimento**

A indutância do conversor DC-DC influencia não só a potência de carga da bateria e o rendimento global, como o valor mínimo de irradiação necessário para o circuito entrar em funcionamento pela primeira vez.

Com o aumento do valor da indutância, a corrente a ser fornecida pelo painel fotovoltaico para que o circuito entre em funcionamento diminui, até determinado valor, como se pode visualizar na Figura 3.50.

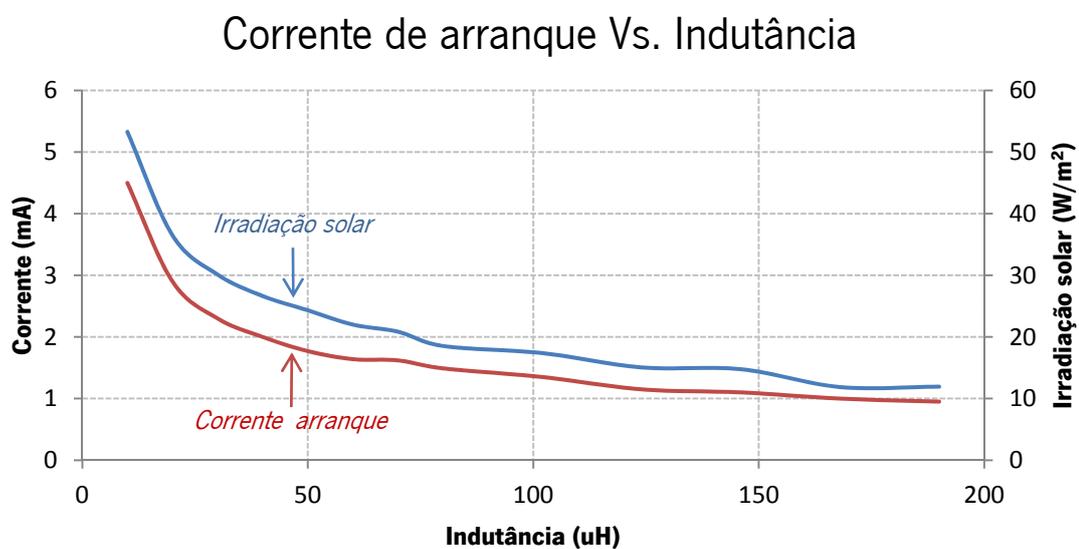


Figura 3.50: Valores mínimos de corrente de arranque e irradiação solar Vs. Valor da indutância.

Além da diminuição da intensidade luminosa necessária para o circuito de carga entrar em funcionamento, o aumento do valor da indutância proporciona também um aumento do rendimento, e consequente aumento da potência de carga da bateria, para todos os valores de irradiação solar. Mais uma vez, um valor superior de indutância permite também que o circuito carregue a bateria até valores de irradiação inferiores.

Os gráficos das

Figura 3.51 Figura 3.52 demonstram as vantagens do uso de uma indutância de valor superior.

Potência de Carga Vs. Irradiação solar para indutâncias de 13 uH e 47 uH

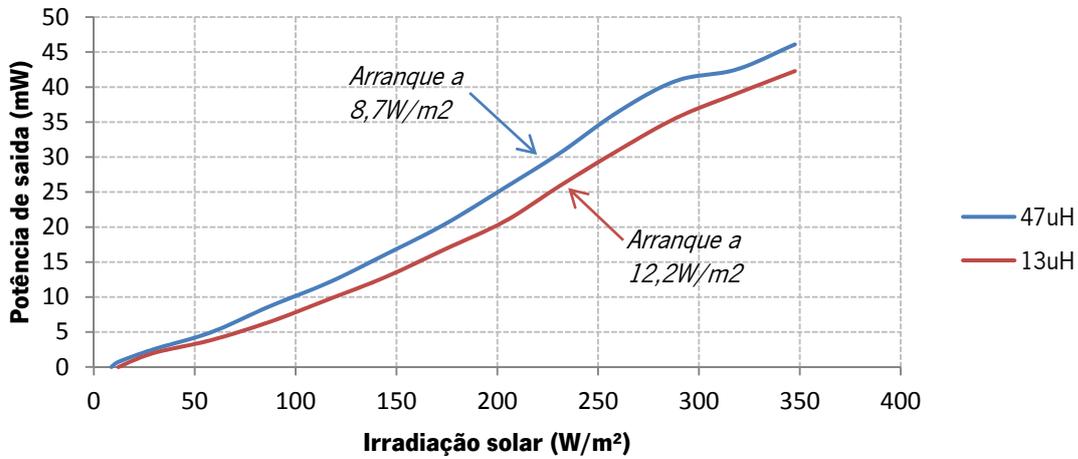


Figura 3.51: Potência de carga Vs. Irradiação solar para indutâncias de 13 uH e 47 uH.

Rendimento Vs. Irradiação solar para indutâncias de 13 uH e 47 uH

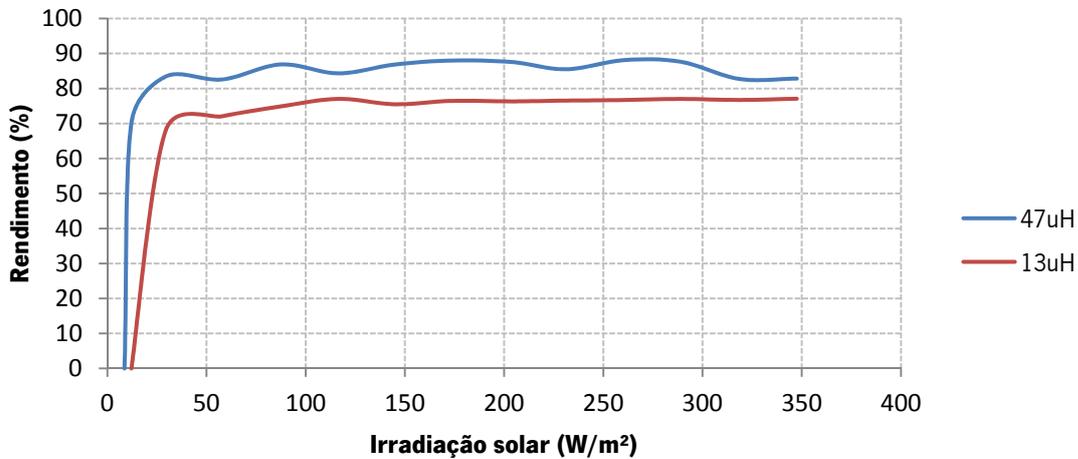


Figura 3.52: Rendimento Vs. Irradiação solar para indutâncias de 13 uH e 47 uH.

O uso de uma indutância de valor superior permitiu o arranque do circuito para níveis de irradiação solar inferiores, e proporcionou o aumento do rendimento para todos os valores de irradiação.

4.6.2. Escolha da indutância para o conversor DC-DC

Tendo em vista a construção de um protótipo com a menor espessura possível, tornou-se fulcral a escolha de componentes SMD com espessura reduzida. Neste aspeto, é a indutância recomendada pelo fabricante do conversor DC-DC que apresenta o maior entrave – Coilcraft MSS5131_103MX –, apresentado uma altura de 3,1 mm, largamente superior à dos restantes componentes. Como não existiam limitações no espaço disponível no PCB, foram também testadas indutâncias de perfil reduzido em séries de dois e três componentes, com o intuito de encontrar a combinação que facultasse o maior rendimento possível.

Com a escolha de uma nova indutância pretendeu-se assim não só diminuir a espessura do protótipo, mas também aumentar o rendimento global. Na Tabela 3.4 são apresentadas as indutâncias testadas.

Tabela 3.4: Indutâncias SMD testadas.

Indutâncias SMD testadas							
Fabricante	Referência	Valor (uH)	Rdc Max (ohm)	Irms Max (A)	Altura (mm)	Largura (mm)	Unidades Utilizadas
Coilcraft	MSS5131	10	0,062	1	3,1	5,1	1
Coilcraft	LPS4414	47	0,935	0,58	1,4	4,3	1, 2
Coilcraft	LPS4414	22	0,59	0,53	1,4	4,3	1, 2
Coilcraft	LPS4012	22	0,6	0,52	1,1	3,1	2, 3
Coilcraft	LPS5015	10	0,3	0,8	1,5	4,8	4
Bourns	SRU5011	47	0,8	0,32	1,1	5,2	1
Bourns	SRR3011	47	1,8	0,27	1,15	4,3	1, 2
Bourns	SRR3011	33	0,86	0,33	1,15	4,3	1, 2
Bourns	SRU5011	22	0,38	0,5	1,1	5,2	1
Bourns	SRR3011	22	0,68	0,38	1,15	4,3	2, 3
Wuerth E.	7440680220	22	0,395	0,7	1,1	8	2, 3

A Figura 3.53 mostra o rendimento do circuito para as indutâncias testadas, permitindo eliminar as que proporcionaram um rendimento inferior:

Rendimento Vs. Irradiação Solar

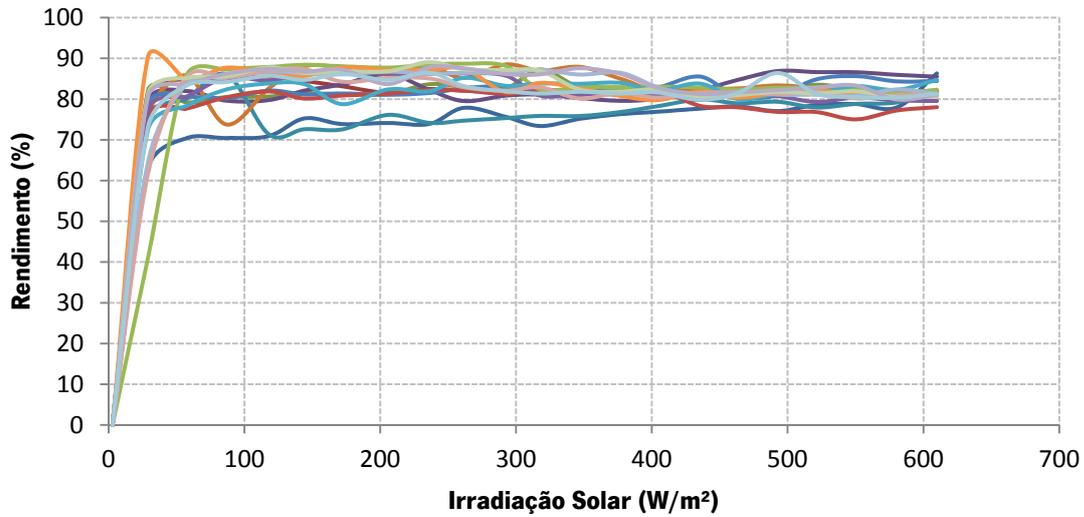


Figura 3.53: Influência da indutância utilizada no rendimento do circuito.

Entre todas as indutâncias testadas, as que mostraram melhores resultados foram as que se podem visualizar no gráfico das Figura 3.54 e Figura 3.55:

Rendimento Vs. Irradiação Solar

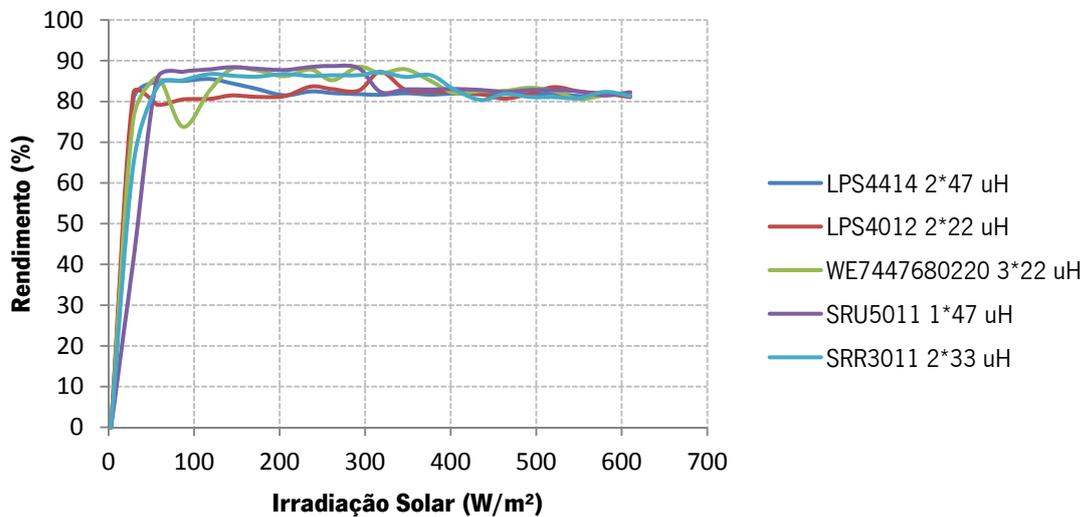


Figura 3.54: Combinação de indutâncias que proporcionam melhor rendimento para valores de irradiação inferiores.

Potência Vs. Irradiação Solar

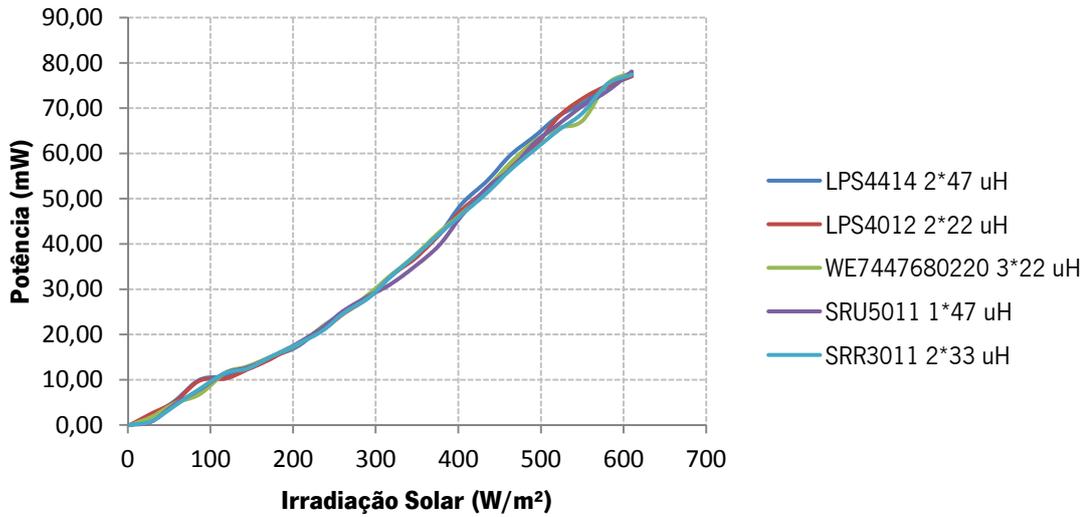


Figura 3.55: Combinação de indutâncias que proporcionam maior potência de carga para valores de irradiação inferiores.

Para verificar o funcionamento do circuito em condições reais, este foi monitorizado ao longo de um dia de sol. O gráfico da Figura 3.56 apresenta a potência de saída consoante a indutância usada.

Potência Vs. Indutância

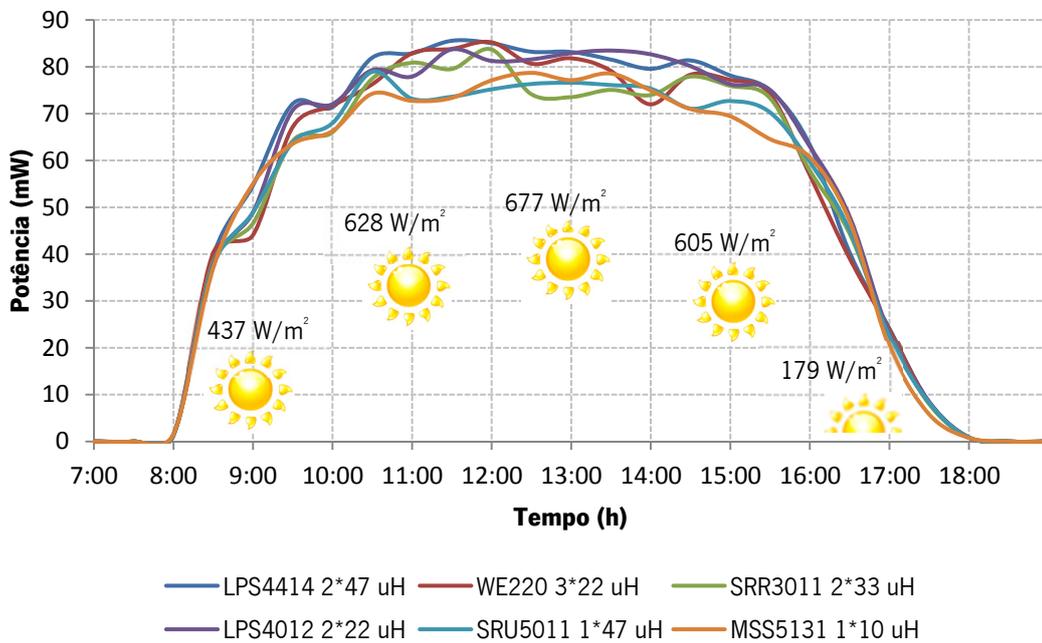


Figura 3.56: Potência fornecida durante um dia Vs. Indutâncias.

Quando o painel fotovoltaico deixa de fornecer energia e a bateria está completamente descarregada, o circuito fica inativo, sendo necessária uma corrente mínima de arranque fornecida pelo painel

fotovoltaico. A Figura 3.57 mostra para os valores de irradiação solar que permitem o arranque do circuito, consoante a indutância usada:

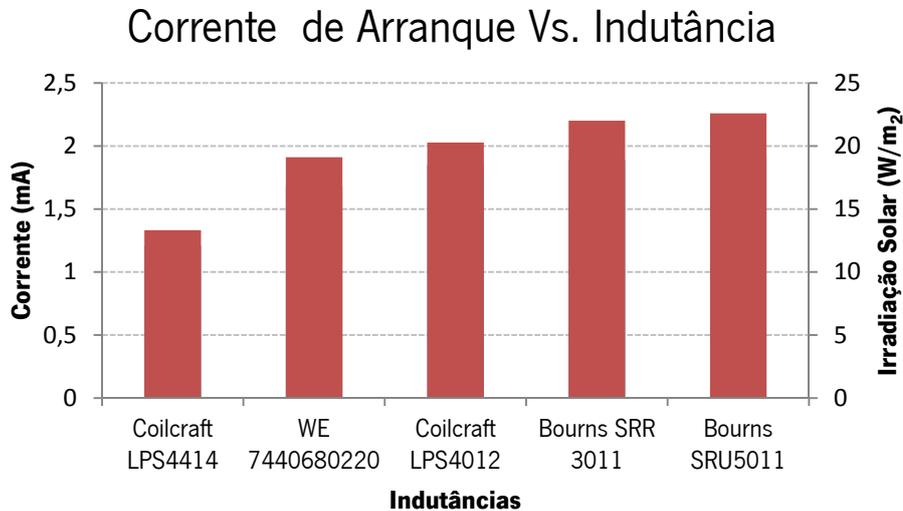


Figura 3.57: Corrente de arranque Vs. Indutância

Uma vez em funcionamento, o módulo final constituído pela bateria, painel fotovoltaico e circuitos de gestão de energia, apenas deixa de fornecer energia quando a bateria fica completamente descarregada e a irradiação solar passa a ser inferior a 5,7 W/m², para todas as combinações de indutâncias.

A indutância escolhida foi aquela que, além de facultar uma potência superior e arranque do circuito para níveis de irradiação solar mais baixos, apresentou também um perfil reduzido.

Com uma altura de 1,1 mm, o bom rendimento global e o baixo perfil da série de duas indutâncias modelo LPS4012 de 22 uH do fabricante Coilcraft ditou a sua escolha em detrimento da série de duas indutâncias referência LPS4414 de 47 uH do mesmo fabricante que, embora tenha apresentado um rendimento marginalmente superior, apresentava também uma espessura mais elevada (1,4 mm).

5. CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO POWER-FILM

5.1. Construção do Power-Film

A placa de PCB foi realizada recorrendo ao método de fotolitografia pois a elevada flexibilidade do PCB torna incompatível o uso de métodos que recorrem a fresas em rotação para a criação das pistas de cobre. Apresentando uma precisão suficiente e relativa simplicidade, a fotolitografia mostrou-se um método adequado.

O primeiro passo consistiu no desenho do circuito recorrendo a uma ferramenta de CAD, neste caso o Eagle (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*), resultando no esquemático da Figura 3.58, a partir do qual foi gerada a máscara necessária ao processo de fotolitografia.

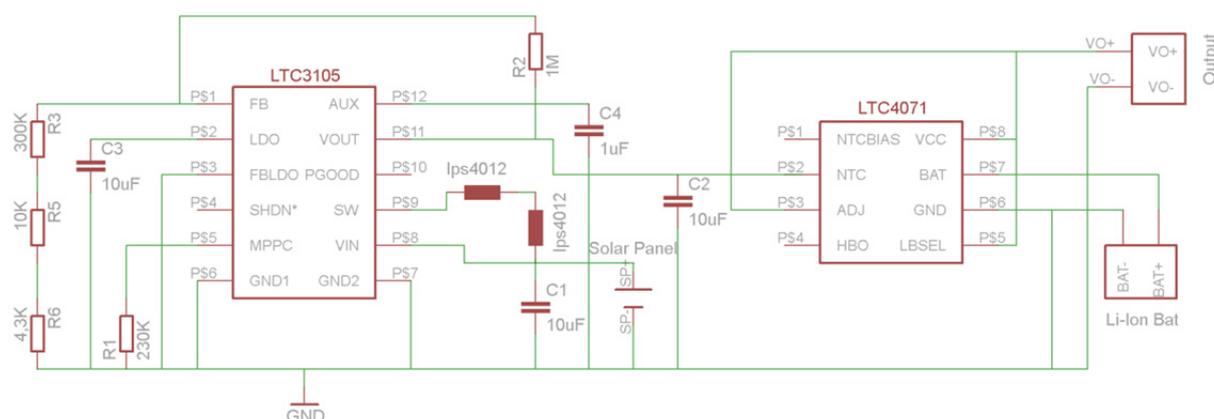


Figura 3.58: Esquemático do circuito desenhado no software de CAD Eagle.

O processo de criação de uma placa de PCB pelo processo de fotolitografia consiste na aplicação dos seguintes passos [137]:

1. Desenho da máscara com o circuito com recurso a um software gráfico.
2. Sensibilização do PCB com *photoresist* (neste caso foi usado o positivo 20).
3. Cura do *photoresist* em estufa a 70 °C durante 15 min.
4. Exposição do PCB com a máscara a luz ultravioleta entre 60 – 120 s.
5. Revelação do circuito numa solução de hidróxido de sódio numa concentração de 10 g/l durante 60 s.
6. Remoção do cobre exposto introduzindo a placa de PCB numa solução de perclorato de ferro na concentração de 400 g/l.
7. Remoção do restante *photoresist* com acetona.

A Figura 3.59 mostra as principais fases do processo de construção.

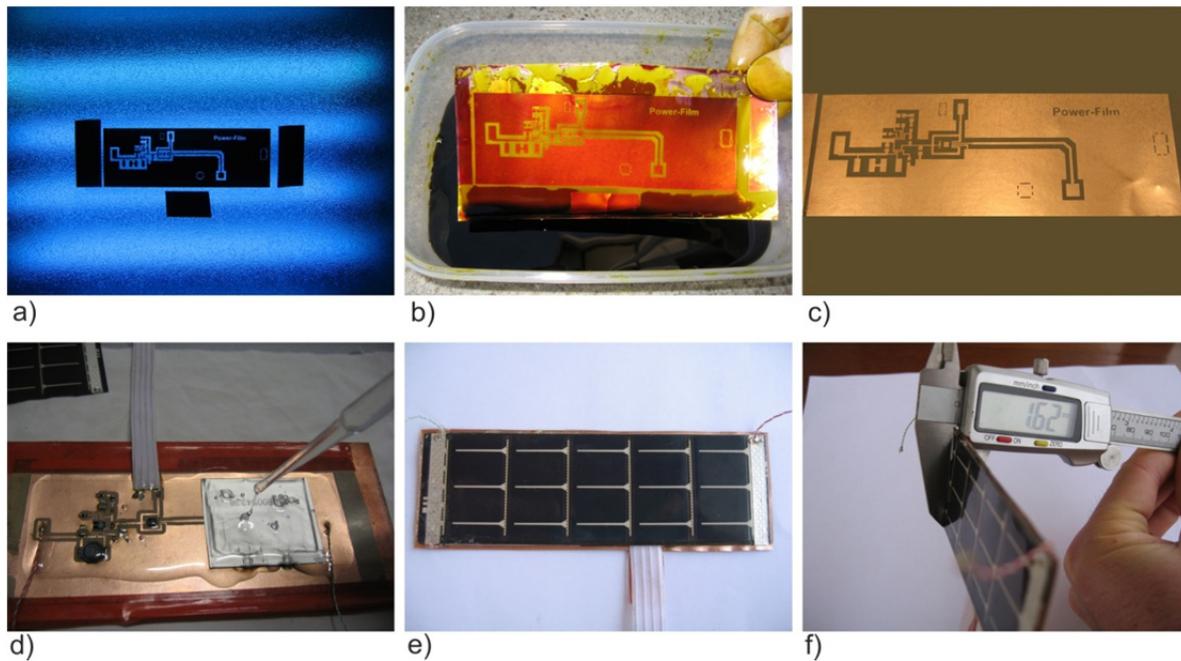


Figura 3.59: Construção do protótipo. a) Exposição a UV's; b) Revelação da placa PCB; c) PCB pronto para solda; d) Aplicação de PDMS; e) Protótipo final; f) Espessura máxima

Após a colocação dos componentes SMD na placa de PCB, foi aplicado PDMS em todo o circuito, e acoplado o painel fotovoltaico. O módulo final foi colocado em estufa a 40 °C durante 2 h para permitir a cura do PDMS. O protótipo final apresentou uma espessura reduzida, apresentando apenas 1,62 mm como valor máximo, situado na zona da bateria. Nas restantes zonas a espessura variou entre 1,42 e 1,62 mm.

5.2. Caracterização do Power-Film

5.2.1. Potência e Rendimento do Power-Film

A Figura 3.60 mostra os valores de potência e rendimento do Power-Film ao longo de um dia de sol. O teste lugar no fim do mês de janeiro, período anual em que os níveis máximos de irradiação solar são inferiores. No local do teste a alva teve lugar às 08:11 h e o ocaso surgiu pelas 17:20 h.

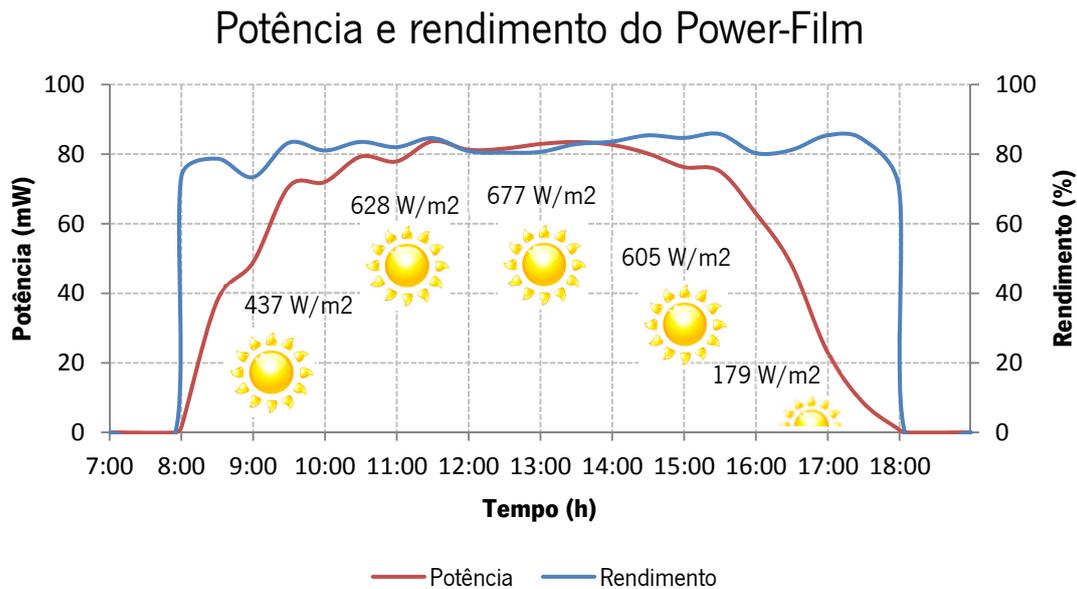


Figura 3.60: Comportamento do Power-Film ao longo de um dia de sol.

O circuito de carga mais simples que se pode construir consiste na ligação direta do painel fotovoltaico à bateria. Nesta abordagem, a bateria começa a ser carregada apenas quando surge uma tensão aos terminais do painel superior à tensão presente aos terminais da bateria, sendo que existe um valor mínimo da irradiação solar incidente sobre o painel para que tal aconteça.

Além dos valores de rendimento e potência de carga deste circuito serem reduzidos, devido ao ponto de funcionamento do painel ser imposto pela tensão atual da bateria, quando a tensão do painel é inferior à tensão da bateria, o painel passa a ser visto como uma carga, dissipando energia sob a forma de energia térmica.

Para evitar a ocorrência desta situação, e sacrificando ainda mais o rendimento, um diodo pode ser colocado entre o painel e a bateria, de forma a ficar inversamente polarizado impedindo a passagem de corrente caso a tensão do painel apresente valores inferiores à tensão da bateria. A Figura 3.61 mostra a comparação direta do comportamento do Power-Film com dois circuitos: Um consistindo na

ligação do painel diretamente à bateria, e outro consistindo na ligação do painel à bateria através de um díodo.

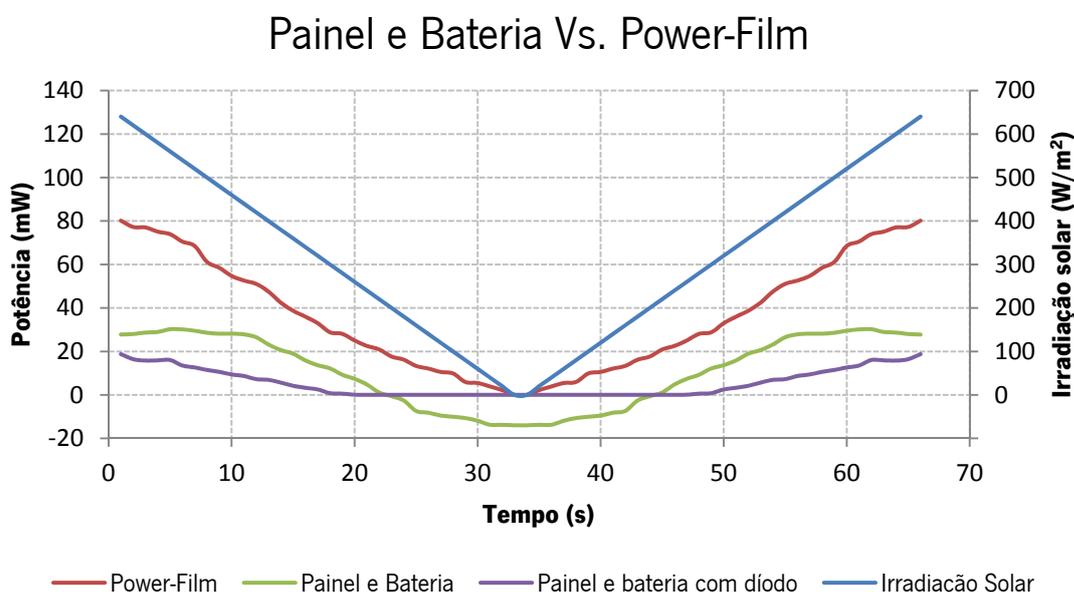


Figura 3.61: Comparação entre o Power-Film e o painel com bateria sem controle.

Nos três circuitos a bateria apresentava uma tensão inicial de 3,8 V. O circuito consistindo apenas no painel e bateria deixou de carregar a bateria para valores de irradiação solar inferiores a 200 W/m², ponto a partir do qual o painel passou a ser visto como uma carga, descarregando a bateria. A adição de um díodo ao circuito preveniu a descarga da bateria através do painel solar, contudo, mesmo utilizando um díodo com apenas 0,2 V de queda de tensão, a potência de carga para os mesmos valores de irradiação desceu consideravelmente. Para valores de irradiação inferiores a 300 W/m² o díodo ficou inversamente polarizado evitando a descarga da bateria pelo painel fotovoltaico.

Para as mesmas condições, o Power-Film forneceu uma potência de carga consideravelmente superior para todos os valores de intensidade de irradiação solar, deixando de ocorrer apenas para valores inferiores a 5,8 W/m², valor que surgiu já durante o crepúsculo vespertino.

5.2.2. *Comportamento do Power-Film a alimentar uma carga*

Para efetuar o registo comportamental do Power-Film perante a solicitação de diversos valores energéticos, foi acoplada uma carga na sua saída, que consistiu numa resistência variável. O procedimento teve início com um valor resistivo elevado, diminuindo gradualmente. Durante o

procedimento as correntes e tensões do circuito foram monitorizadas, resultando no gráfico apresentado na Figura 3.62.

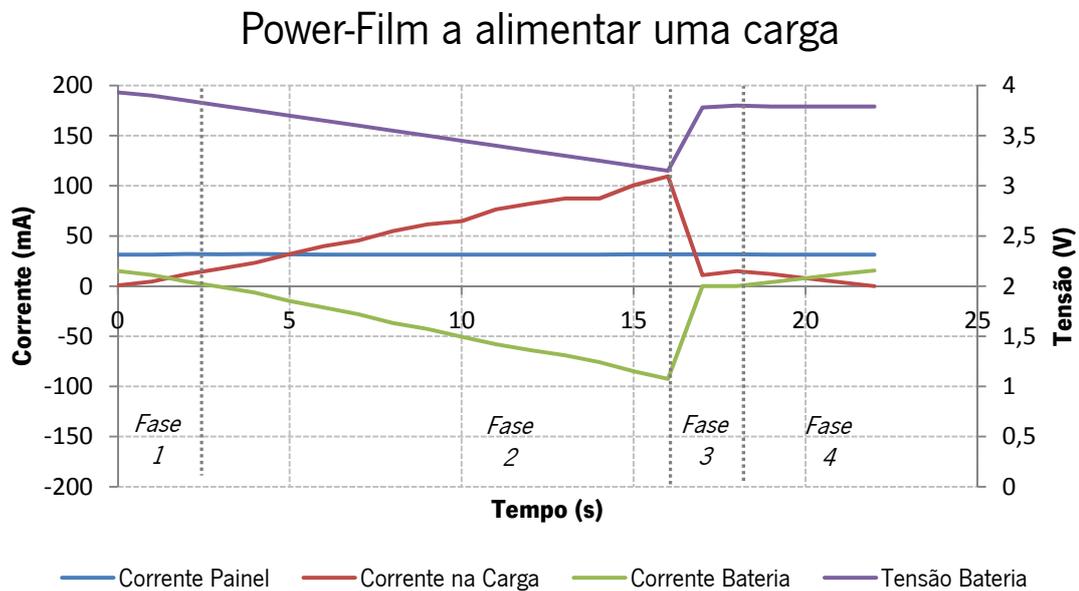


Figura 3.62: Power-Film a alimentar uma carga variável.

Durante todo o procedimento a intensidade de irradiação solar manteve-se em 518 W/m^2 , e o ponto de V_{MPP} do painel fotovoltaico ajustado para 2,3 V. Os valores monitorizados foram a corrente fornecida pelo painel fotovoltaico, corrente fornecida à carga acoplada na saída, corrente de carga da bateria e a tensão da bateria.

O gráfico da Figura 3.62 apresenta 4 fases de funcionamento, que vão da fase 1 à fase 4.

A fase 1 tem início quando o acoplamento da carga na saída do Power-Film. Devido ao seu elevado valor resistivo inicial, a carga dissipa pouca potência, permitindo que quase toda a energia fornecida pelo painel fotovoltaico seja redirecionada para carregar a bateria. À medida que o valor resistivo da carga diminui, a potência solicitada pela mesma aumenta, fazendo com que a corrente de carga da bateria seja redirecionada para a saída. No final da fase 1, toda a corrente fornecida pelo painel é solicitada pela saída, e a bateria deixa de ser carregada.

A fase 2 tem início quando a corrente fornecida pelo painel não é suficiente para alimentar a carga. A partir deste momento, a bateria do Power-Film passa a alimentar a carga, juntamente com o painel fotovoltaico, satisfazendo assim as necessidades energéticas da saída. À medida que a potência solicitada aumenta, a tensão da bateria diminui gradualmente, até atingir o valor limite inferior, levando à atuação do circuito de proteção da bateria.

A fase 3 tem início com a proteção da bateria contra sub-tensões. A partir deste momento, a carga não recebe toda a potência solicitada, mas apenas a fornecida pelo painel fotovoltaico. O final da fase 3 surge quando a potência solicitada à saída volta a diminuir, com o aumento da resistência da carga, até ser igualada pela potência fornecida pelo painel fotovoltaico.

A fase 4 tem início quando a potência fornecida pelo painel é superior à potência solicitada pela carga na saída. A partir deste momento o excedente é novamente redirecionado para carregar a bateria.

5.2.3. Carga completa da bateria interna do Power-Film

Com o objetivo de se conhecer o tempo que o Power-Film necessita para efetuar uma carga completa da bateria interna, esta foi previamente descarregada até 2,7 V. De seguida, o Power-Film foi orientado no sentido da máxima irradiação solar, e feito o registo da tensão e corrente de carga. O teste ocorreu entre as 9:51 h e as 14:21 h do dia 4 de Fevereiro de 2012, apresentando-se o dia sem nuvens, com uma irradiação solar que variou entre os 580 W/m² e os 695 W/m². O gráfico resultante pode ser visualizado na Figura 3.63.

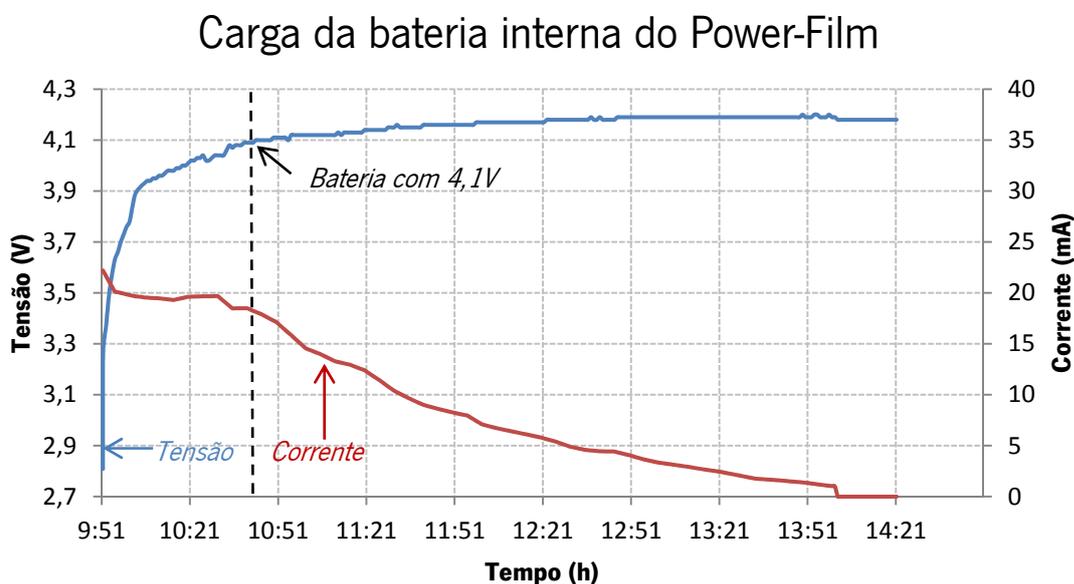


Figura 3.63: Carga da bateria interna do Power-Film.

As curvas de carga apresentadas pelo gráfico da Figura 3.63 apresentam semelhanças com o método de carga Corrente Constante-Tensão Constante: Durante a primeira hora, o circuito carregou a bateria com uma corrente relativamente constante, fazendo subir a tensão de 2,7 V para 4,1 V, estando neste

momento com cerca de 80% da capacidade final [38]. A partir deste momento, a corrente de carga diminuiu à medida que a tensão subiu de 4,1 V para 4,2 V. A obtenção de 100% da capacidade aconteceu 3 h depois, altura em que o valor de tensão atingiu 4,2 V e o circuito de proteção terminou o processo de carga.

5.2.4. *Potência versus curvatura do Power-Film*

A potência fornecida pelo Power-Film é máxima quando toda a sua superfície está orientada para o sol. A aplicação do Power-Film em superfícies com os mais variados ângulos e geometrias provoca uma diminuição da potência máxima fornecida, pelo que torna-se necessário saber qual a variação de potência fornecida consoante o ângulo adotado. A Figura 3.64 mostra a variação da potência fornecida em função do ângulo de curvatura do Power-Film.

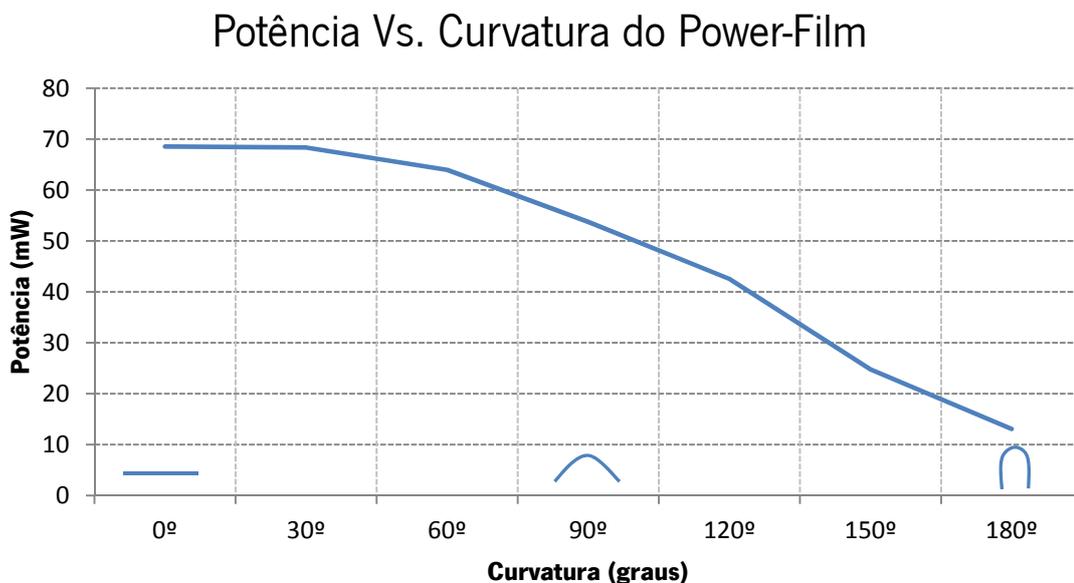


Figura 3.64: Potência Vs. Curvatura do Power-Film

A potência fornecida pelo Power-Film diminui de forma quase linear, descendo de 100% para 20% à medida que o ângulo de curvatura varia de 0° a 180°. Numa análise mais detalhada, é possível identificar duas zonas no gráfico onde a potência decai a taxas diferentes: A primeira zona situa-se entre os 0° e os 60°, onde a potência decresce de forma menos acentuada a 77 uW por cada grau de curvatura. A partir dos 60° e até aos 180° o fornecimento de potência decresce linearmente de forma mais acentuada, havendo uma diminuição de 420 uW por cada grau de curvatura.

5.2.5. *Ensaio de flexão de 3 pontos*

Com o objetivo de testar a resistência e flexibilidade do protótipo, foi realizado um ensaio de flexão de 3 pontos. O equipamento utilizado foi o dinamómetro Hounsfield H 100 KS existente no departamento de engenharia têxtil da Universidade do Minho.



Figura 3.65: Dinamómetro Hounsfield H100KS.

O ensaio de 3 pontos consiste na colocação do material alvo de estudo apoiado em dois pontos, afastados entre si de uma determinada distância. Uma força é aplicada perpendicularmente ao material num terceiro ponto central equidistante aos pontos de apoio, provocando uma flexão.

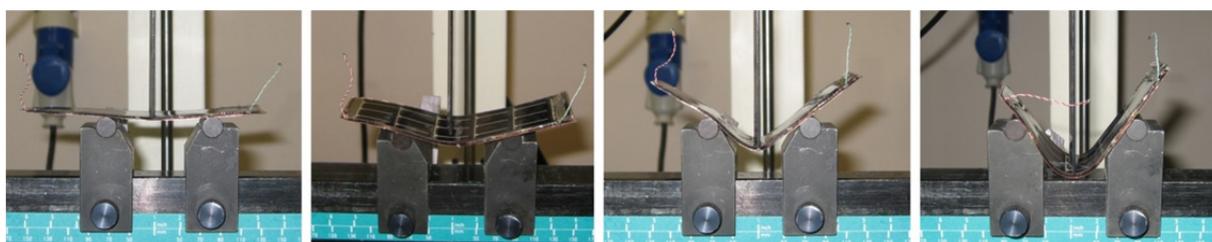


Figura 3.66: Fases do ensaio de flexão de 3 pontos.

Os pontos de apoio distaram entre si de 5 cm, e a parametrização do dinamómetro foi efetuada de forma a provocar um deslocamento máximo de 25 mm a uma velocidade de 25 mm/min. Na totalidade foram realizados 60 ensaios consecutivos. As forças e o deslocamento dos primeiros 5

ensaios resultaram no gráfico da Figura 3.67, os restantes 55 ensaios resultaram no gráfico da Figura 3.68.

Ensaio de flexão de 3 pontos

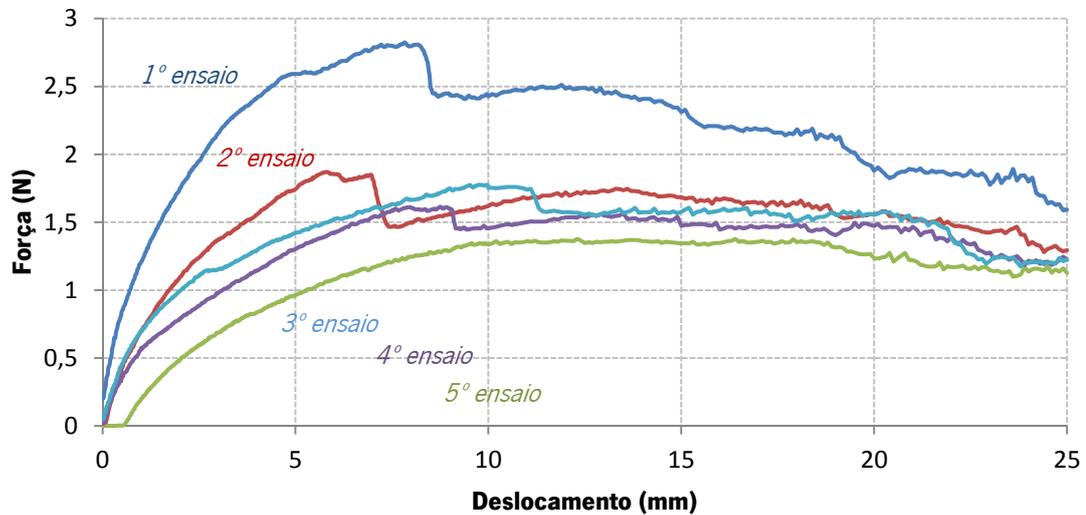


Figura 3.67: Ensaio de flexão de 3 pontos: resposta aos primeiros 5 ensaios.

Ensaio de flexão de 3 Pontos

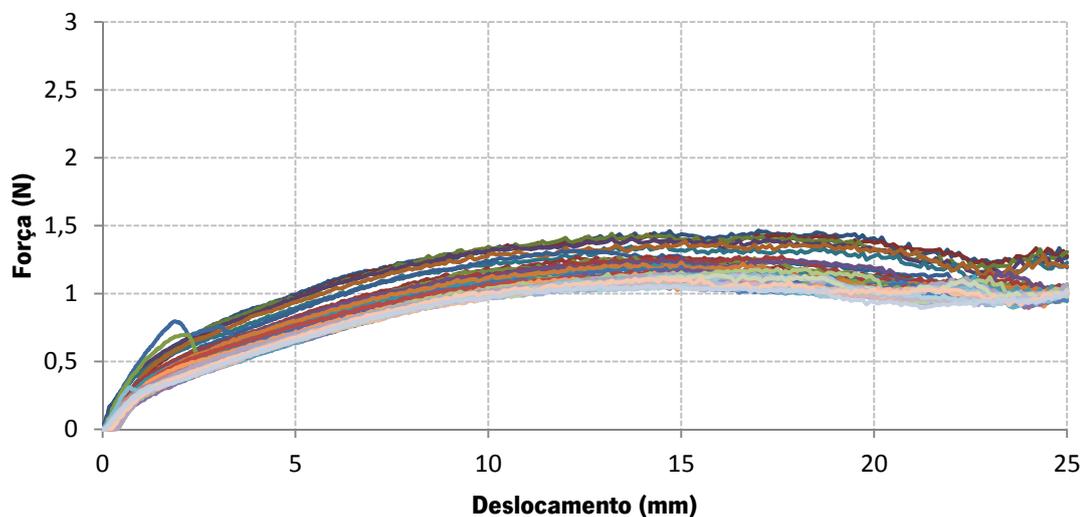


Figura 3.68: Ensaio de flexão de 3 pontos: resposta aos 55 ensaios finais.

As forças superiores resultantes dos 5 primeiros ensaios (Figura 3.67) mostraram que existe um breve período de tempo de amaciamento durante o qual o Power-Film apresenta uma rigidez superior, sendo necessário aplicar uma força perto de 3 N para provocar a flexão. Os 55 ensaios seguintes (Figura

3.68) mostraram um comportamento estável e previsível, envolvendo forças muito reduzidas na ordem de 1 N.

5.3. Análise de resultados

Uma das principais características do Power-Film reside no seu perfil reduzido, que atinge o valor máximo de apenas 1,62 mm no local mais espesso. A sua elevada flexibilidade, além de permitir a aplicação tanto em superfícies curvas como em objetos flexíveis, potencia a captura de energia a partir de várias direções. A inclusão de PDMS no substrato, além de permitir a flexibilidade do módulo, protege o circuito elétrico contra a humidade, devido às propriedades hidrofóbicas intrínsecas.

A elevada eficiência do Power-Film permite a carga da bateria interna a cerca de 80% da capacidade máxima em apenas uma hora, quando na presença de valores elevados de irradiação solar, facultando uma resposta rápida e constante à solicitação de energia na sua saída. O circuito de gestão de energia integrado prolonga e otimiza a carga da bateria interna que ocorre mesmo durante o crepúsculo, até níveis de irradiação solar reduzidos. O circuito de proteção da bateria mostrou-se eficaz contra sobre e subtensões, assegurando o correto funcionamento nas situações extremas de fornecimento e energia.

O ajuste dos valores mínimo e máximo das tensões de proteção da bateria permite optar por uma capacidade e autonomia superior, com a seleção de 2,7 V e 4,2 V como valor mínimo e máximo respetivamente, ou pela longevidade e número de ciclos de carga, optando pelo valor de 3,2 V e 4,0 V como mínimo e máximo respetivamente. Durante os testes verificou-se que a proteção contra subtensões acontece para valores um pouco superiores ao valor selecionado no respetivo circuito integrado, caso sejam solicitados valores elevados de corrente, na ordem das dezenas de mA, fazendo com que a seleção de 2,7 V como valor mínimo da tensão permita a proteção da bateria para valores inferiores a 3,2 V.

As forças diminutas necessárias para provocar a flexão do Power-Film, demonstradas pelo teste físico que consistiu na flexão a 3 pontos, fazem com que a sua aplicação não influencie a rigidez final do objeto, que mantém assim as suas características físicas virtualmente inalteradas. O comportamento físico manteve-se estável e previsível, apresentando semelhanças ao comportamento típico de compostos poliméricos.

A variação da temperatura e do valor da irradiação solar mostraram pouca influência no rendimento global do Power-Film.

6. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

6.1. Conclusão

A investigação e desenvolvimento de novas fontes de energia autónomas, baseadas em energias renováveis, permitem satisfazer as necessidades energéticas localizadas principalmente no campo dos equipamentos eletrónicos de baixo consumo, onde além da autonomia é requerida também a facilidade de integração.

O cumprimento dos objetivos propostos nesta dissertação resultaram na construção de um módulo de alimentação autónomo, com recurso a componentes de baixo custo existentes atualmente no mercado, perfeitamente capaz de responder às necessidades energéticas de equipamentos eletrónicos de baixo consumo. As características do protótipo construído dotam-no da flexibilidade de integração necessária às mais diversas aplicações, onde a elevada independência energética e autonomia são requisitos fulcrais.

O painel fotovoltaico de silício amorfo apresenta tolerâncias superiores a diferentes valores de temperatura e irradiação solar relativamente a outras tecnologias, mantendo o seu ponto de máxima potência relativamente estável em torno de um valor de tensão de operação. Esta característica permitiu a escolha de componentes com valores de operação otimizados para a tensão de funcionamento do painel, como o caso do conversor DC-DC, que apresenta o máximo rendimento para tensões de entrada em torno dos 2,3 V. O resultado final traduziu-se num circuito de gestão de energia e proteção da bateria com rendimento máximo acima dos 80%.

As características principais do protótipo desenvolvido apresentam-se resumidas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Características do Power-Film.

Power-Film	
Tensão nominal	3,7 V (2,7 V - 4,2 V)
Capacidade da bateria interna	45 mAh
Potência máxima¹	83,7 mW
Curvatura máxima	180°
Força de flexão	1,5 N
Valor mínimo de irradiação solar que permite a carga da bateria interna	5,8 W/m ²
Peso	10 g
Espessura	1,45 - 1,62 mm
Dimensões	37 X 114 mm
Tempo de carga da bateria a 80%	58 min
Tempo de carga da bateria a 100%	4 h

6.2. Trabalho futuro

O protótipo desenvolvido poderá servir de ponto de partida para a construção de módulos de alimentação autónomos flexíveis, tendo por base o recurso a energias renováveis. A implementação de conversores DC-DC, compatíveis com outro tipo de transdutores, poderá ser suficiente para a obtenção de energia a partir das mais diversas fontes de energia, como da vibração ou da termoelectricidade.

Entre as melhorias necessárias, merece particular atenção a necessidade de uma adesão superior entre o PDMS as restantes camadas, principalmente com o painel fotovoltaico, cuja adesão se revela insuficiente por apresentar uma superfície polida. Uma solução poderá passar pelo uso de uma cola que resulte num composto flexível e resistente após a cura. A implementação de um sinalizador de carga completa, que poderá ser um led de baixo consumo, poderá ser suficiente para o utilizador ter a noção do estado atual da carga da bateria interna, e um circuito de proteção contra altas temperaturas poderá facultar proteção extra à bateria, prolongando assim o seu tempo de vida útil. A inclusão de pontos de fixação, que poderão consistir em furos reforçados ou materiais aderentes, poderá facilitar a sua aplicação.

¹ Exposição a 680 W/m²

O aumento do rendimento global poderá passar pela inclusão de um painel fotovoltaico com rendimento superior, ao mesmo tempo que o uso de conversores DC-DC mais eficientes, como por exemplo o novo circuito CBC915 da Cymbet que apresenta algoritmos de MPPT integrados, ou o 17710 da Maxim, que oferece gestão de energia e proteção da bateria integrados num só componente, poderão também levar ao aumento do rendimento global, além de potenciar a miniaturização do módulo final.

O recurso a técnicas de deposição poderá levar à construção de um módulo totalmente integrado, compreendido por uma bateria de filme fino em estado sólido, conversor DC-DC com algoritmo de MPPT e proteção da bateria, utilizando o verso do painel fotovoltaico como substrato, garantindo assim o máximo rendimento e flexibilidade.

Por fim, deverão realizar-se testes físicos normalizados de várias naturezas para simular as condições reais dos locais alvo da aplicação, de forma a estabelecer um tempo de vida útil do protótipo.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Vijay Raghunathan, Aman Kansal, Jason Hsu, Jonathan Friedman, and Mani Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," in *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, NJ, EUA, 1995.
- [2] Roger G. Little and Bedford Mass, "Integrated solar cell and battery," 4,740,431, Abril 26, 1988.
- [3] G. Dennler et al., "A self-rechargeable and flexible polymer solar battery," *Solar Energy*, vol. 81, pp. 947–957, Agosto 2007.
- [4] Frederick C. Krebs, Torben D. Nielsen, Jan Fyenbo, Wadstrom S. Pedersen, and Marie S Pederson, "Manufacture, integration and demonstration of polymer solar cells in a lamp for the "Lighting Africa" initiative," *Energy & environmental science*, vol. 3, pp. 512–525, 2010.
- [5] G. Chen et al., "Millimeter-scale nearly perpetual sensor system with stacked battery and solar cells," *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*, pp. 288–289, Fevereiro 2012.
- [6] Cymbet Corporation. [Online] [Citação: 5 de Janeiro de 2012.] <http://www.cymbet.com>
- [7] Infinite Power Solutions. [Online] [Citação: 28 de Dezembro de 2011.] <http://www.infinitepowersolutions.com/products/evalkits>
- [8] Silicon Labs. [Online] [Citação: 17 de Fevereiro de 2012.] <http://www.silabs.com>
- [9] R. W. Milles and K. M. Hynes, "Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues," *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol. 51, pp. 1-42, 2005.
- [10] Paul A. Lynn, *Electricity from sunlight: An introduction to photovoltaics*: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [11] A. I. Khan, "Pre-1900 semiconductor research and semiconductor device applications," *IEEE Conference on the History of Electronics*, 2004.
- [12] T. Jenkins, "A brief history of. semiconductors," *Physics Education*, vol. 40, pp. 430-439, 2005.
- [13] Werner Siemens, "On the electro motive action of illuminated selenium, discovered by Mr. Fritts, of New York," *Philosophical Magazine Series 5*, vol. 19, pp. 453-456, Junho 1885.
- [14] Walter H. Brattain , "Light-Sensitive Electric Device," 2,537,255, Janeiro 9, 1951.

- [15] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *Journal of Applied Physics*, vol. 25, pp. 676–677, Maio 1954.
- [16] Bell Laboratories. Bell Laboratories - Physical sciences research. [Online] [Citação: 30 de Janeiro de 2012.] <http://www.bell-labs.com/org/physicalsciences/timeline/span10.html>
- [17] M. B. Prince, "Silicons Solar Energy Converters," *Journal of Applied Physics*, vol. 26, pp. 534–540, 1955.
- [18] T. M. Razykov et al., "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1580-1608, Agosto 2001.
- [19] R. L. Easton and M. J. Votaw, "Vanguard I IGY Satellite," *Review of Scientific Instruments*, vol. 30, pp. 70-75, 1959.
- [20] Yoshihiro Hamakawa, "A Technological Evolution from Bulk Crystalline Age," *Renewable Energy*, vol. 15, pp. 22-31, Setembro-Dezembro 1998.
- [21] H. W. Schock, "Thin film photovoltaics," *Applied Surface Science*, vol. 92, pp. 606-616, Fevereiro 1996.
- [22] BP Solar. [Online] [Citação: 30 de Janeiro de 2012.] <http://www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=3050409&contentId=7028373>
- [23] Bhubaneswari Parida, S. Iniyar, and Ranko Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1625-1636, Abril 2011.
- [24] Rommel Noufi and Ken Zweibel, "High-Efficiency CdTe and CIGS Thin-Film Solar Cells: Highlights and Challenges," *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, pp. 317-320, Maio 2006.
- [25] Yoshihiro Hamakawa, *Thin-Film solar sells-Next generation photovoltaics and its applications*: Springer, 2004.
- [26] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, and Wilhem Warta, "Solar cell efficiency tables (version 37)," *Progress in photovoltaics: Research and applications*, vol. 19, pp. 84-92, Janeiro 2001.
- [27] S. Viswanathan Saji, Ik-Ho Choi, and Chi-Woo Lee, "Progress in electrodeposited absorber layer for $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) solar cells," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2666-2678, Novembro 2011.
- [28] R. Wuerz et al., *Thin Solid Films*, vol. 517, pp. 2415-2418, Fevereiro 2009.

- [29] Mario Pagliaro, Rosaria Ciriminna, and Giovanni Palmisano, "Flexible Solar Cells," *ChemSusChem*, vol. 1, Novembro 2008.
- [30] Lucia Vittoria Mercaldo et al., "Thin film silicon photovoltaics: Architectural perspectives and technological issues," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1836-1844, Outubro 2009.
- [31] ScienceDaily. [Online] [Citação: 11 de Setembro de 2011.]
<http://www.sciencedaily.com/releases/2011/05/110519101355.htm>
- [32] Ingrid Repins et al., "19,9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81,2% fill factor," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, pp. 235-239, Maio 2008.
- [33] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, and S. R. Wenham, "Progress and outlook for high-efficiency," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 65, pp. 9-16, Janeiro 2001.
- [34] Nicholas J. Ekins-Daukes, "High efficiency photovoltaics: recent progress and long term goals," , Baltimore, Maryland, 2011.
- [35] Adolf Goetzberger, Christopher Hebling, and Hans-Werner Schock, "Photovoltaic materials, history, status and outlook," *Materials Science and Engineering: Reports*, vol. 40, pp. 1-46, Janeiro 2003.
- [36] N. Gilbert Lewis and G. Frederick Keyes, "The potential of the lithium electrode," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 35, pp. 340-344, Abril 1913.
- [37] Katerina E. Aifantis, Stephen A. Hackney, and Vasant R. Kumar, *High energy density lithium batteries: Materials, engineering, applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2010.
- [38] J. A. Carcon, "Performance of lithium-ion battery systems," *WESCON/94. 'Idea/Microelectronics'. Conference Record*, pp. 242-248, Setembro 1994.
- [39] Ozawa Kazunori, *Lithium Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications*.: WILEY-VCH, 2009.
- [40] Yoshio Nishi, *Journal of Power Sources*, vol. 100, pp. 101-106, Novembro 2001.
- [41] Bruno Scrosati, "Recent advances in lithium ion battery materials," *Electrochimica Acta*, vol. 45, pp. 2461-2466, Maio 2000.
- [42] Daniel Abraham, "Advances in lithium-ion battery research and technology," *Jom journal of the minerals, metals and materials society*, vol. 54, Março 2002.
- [43] M. Tatsumisago, M. Wakihara, C. Iwakura, S. Kohjiya, and I. Tanaka, *Solid state ionics for*

- batteries*. Tokyo: Springer, 2005.
- [44] Fiona Gray and Michael John Smith, *Lithium polymer batteries: principles and application*. Oxford, United Kingdom: Elsevier B.V, 2009.
- [45] "An overview of the research and development of solid polymer electrolyte batteries," *Electrochimica Acta*, vol. 45, pp. 1501-1508, Janeiro 2000.
- [46] Harding Energy. Hardin Energy Inc. [Online] [Citação: 13 de Setembro de 2011.] <http://www.hardingenergy.com/pdfs/6%20Lithium%20Polymer.pdf>
- [47] Powerstream. [Online] [Citação: 13 de Setembro de 2011.] <http://www.powerstream.com/thin-lithium-ion.htm>
- [48] Solicore. (2010) Solicore - Embed power solutions. [Online] [Citação: 13 de Setembro de 2011.] <http://www.solicore.com/flexion-batteries.asp>
- [49] J. B. Bates et al., "Thin-film rechargeable lithium batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 54, pp. 58-62, Março 1995.
- [50] "Issue and challenges facing rechargeable thin film lithium batteries," *Materials Research Bulletin*, vol. 43, pp. 1913-1942, Setembro 2008.
- [51] N. J. Dudney, "Solid-state thin-film rechargeable batteries," vol. 54, pp. 245-249, Fevereiro 2005.
- [52] John Owen, "Lithium Batteries – new materials, developments and perspectives," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 374, pp. 283-284, Agosto 1994.
- [53] Steven D. Jones and R. James Akridge, "Development and performance of a rechargeable thin-film solid-state microbattery," *Journal of Power Sources*, vol. 54, pp. 63-67, Março 1995.
- [54] Cymbet Corporation. EnerChip™ Bare Die Enable Embedded Energy. [Online] [Citação: 9 de Fevereiro de 2012.] <http://www.cymbet.com/products/embedded-energy.php>
- [55] Infinite Power Solutions. [Online] [Citação: 9 de Fevereiro de 2012.] <http://www.infinitepowersolutions.com/>
- [56] Arun Patil et al., "Issue and challenges facing rechargeable thin film lithium batteries," *Materials Research Bulletin*, vol. 43, pp. 1913-1942, Setembro 2008.
- [57] G. Peter Bruce and Bruno Scrosati, "Nanomaterials for Rechargeable Lithium Batteries," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, Abril 2008.
- [58] Michelle J. McCann, Kylie R. Catchpole, Klaus J. Weber, and Andrew W. Blakers, "A review of

- thin-film crystalline silicon for solar cell applications. Part 1: Native substrates," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 68, pp. 135–171, Maio 2001.
- [59] Adolf Goetzberger, Christopher Hebling, and Hans-Werner Schock, "Photovoltaic materials, history, status and outlook," *Materials Science and Engineering: Reports*, vol. 40, pp. 1–46, Janeiro 2003.
- [60] José Higinio Correia and João Paulo Carmo, *Introdução às microtecnologias no silício*: LIDEL-edições técnicas, 2010.
- [61] Richard C. Neville, *Solar energy conversion, The solar cell*, 2nd ed.: Elsevier, 1995.
- [62] M. A. Green, "Photovoltaics: technology overview," *Energy Policy*, vol. 28, pp. 989-998, Novembro 2000.
- [63] Tom Markvart and Luis Castaner, *Practical handbook of photovoltaics, second edition: fundamentals and applications*, 1st ed.: Elsevier Science, 2003.
- [64] Martin Green, "Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, pp. 447-455, Agosto 2005.
- [65] Aldo V. da Rosa, *Fundamentals of renewable energy processes*. UK: Elsevier academic press, 2005.
- [66] Volker Quaschnig, "Cap. 4," in *Understanding renewable energy systems*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005.
- [67] Rui M. G. Castro, *Introdução à energia fotovoltaica - Energias renováveis e produção descentralizada*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2008.
- [68] R. W. Miles, K. M. Hynes, and I Forbes, "Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues," *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol. 51, pp. 1–42, 2005.
- [69] Krishnan Rajeshwar, Robert McConnell, and Stuart Licht,,: Springer, 2008, ch. 2.
- [70] Martin A. Green, "Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potential," *Solar Energy*, vol. 74, pp. 181–192, Março 2003.
- [71] El L. Chaar, L. A. Lamont, and N. El Zein, "Review of photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2165–2175, Junho 2011.
- [72] Instituto de tecnologia para o desenvolvimento, "Tecnologias aplicadas de armazenamento de energia," Curitiba Brasil, 2008.

- [73] Jéssica Frontino Paulino, Natália Giovanini Busnardo, and Carlos Júlio Afonso, "Processamento de pilhas de Li/MnO₂ usadas," *Química Nova*, vol. 30, pp. 718-722, 2007.
- [74] David Linden, *Handbook of batteries*, 3rd ed.: McGraw-Hill, 2002.
- [75] N. C. Pesquero, J. A. Bueno, and E. Longo, "Materiais cerâmicos de inserção aplicados a baterias de íons lítio," *Cerâmica*, vol. 54, pp. 233-244, Junho 2008.
- [76] K. M. Abraham, "Directions in secondary lithium battery research and development," *Electrochimica Acta*, vol. 38, pp. 1233-1248, Junho 1993.
- [77] Kazunori Ozawa, *Lithium ion rechargeable batteries*: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [78] Sheng Shui Zhang, "The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 161, pp. 1385-1391, Outubro 2006.
- [79] R. C. Cope and Y. Podrazhansky, "The art of battery charging," *Battery Conference on Applications and Advances*, pp. 233-235, Janeiro 1999.
- [80] Liang-Rui Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-ariated Technique," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 54, pp. 398-405, 2007.
- [81] Chih-Chiang Hua and Mang-Yu Lin, "A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles," *Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on*, vol. 1, pp. 135-140, Dezembro 2000.
- [82] "Maximum power point tracking and optimal Li-Ion battery charging control for photovoltaic charging system," *Computers & mathematics with applications*, Janeiro 2012.
- [83] G. Sikha, P. Ramadass, B. S. Haran, R. E. White, and B. N. Popov, "Comparison of the capacity fade of Sony US 18650 cells charged with different protocols," *Journal of Power Sources*, vol. 122, pp. 67-76, 2003.
- [84] Min Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate, compact, and power-efficient Li-Ion battery charger circuit," *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1180-1184, Novembro 2006.
- [85] J. A. Carcone, "Performance of lithium-ion battery systems," *WESCON/94. 'Idea/Microelectronics'. Conference Record*, pp. 242-248, Setembro 1994.
- [86] Liang-Rui Chen, "Design of duty-varied voltage pulse charger for improving Li-Ion battery-charging response," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 480-487.

- [87] Jun Jun Li, Edward Murphy, Jack Winnick, and Paul A. Kohl, "The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 102, pp. 302–309, Dezembro 2001.
- [88] Liang-Rui Chen, Neng-Yi Chu, and Chau-Shing Wang, "Design of a reflex-based bidirectional converter with the energy recovery function," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 3022–3029, Agosto 2008.
- [89] B. G. Kim, F. P. Tredeau, and Z. M. Salamen, "Fast chargeability lithium polymer batteries," *IEEE Power and energy society general meeting conversion and delivery of electrical energy in the 21st century*, vol. 6, pp. 1–5, 2008.
- [90] Matthew Larkin. (2007, Janeiro) TÜV SÜD Product Service. [Online] Janeiro de 2007. [Citação: 9 de 2 de 2012.]
http://www.tuvps.co.uk/home_psuik/company/news_and_downloads/tuev_articles/just_how_safe_are_lithium-ion_batteries
- [91] Paul A. Lynn,,: John Wiley & Sons Ltd, 2010, ch. 3.
- [92] Moradi H. Mohammad and Ali Reza Reisi, "A hybrid maximum power point tracking method for photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2965–2976, Novembro 2011.
- [93] Marty Brown,,: Academic Press, 1990, ch. 4.
- [94] Robert L. Steigerwald, De W. Doncker, and H. Kheraluwala, "A comparison of high-power DC-DC soft-switched converter topologies," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 32, Setembro/Outubro 1996.
- [95] B. Bryant and M. K. Kazimierczuk, "Modeling the closed-current loop of PWM boost DC-DC converters operating in CCM with peak current-mode control," *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol. 52, Novembro 2005.
- [96] M. A. Farahat, H. B. M. Metwally, and Ahmed Abd-Elfatah Mohamed, "Optimal choice and design of different topologies of DC–DC converter used in PV systems, at different climatic conditions in Egypt," *Renewable Energy*, vol. 43, pp. 393–402, Julho 2012.
- [97] "Open-Loop control methods for interleaved DCM/CCM boundary boost PFC converters," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 23, Julho 2008.
- [98] Weixing Li, Tongwen Chen, and Wilson Xu, "On impedance matching and maximum power transfer," *Electric power systems research*, vol. 80, pp. 1082-1088, 2012.

- [99] "Research and development of maximum power transfer tracking system for solar cell unit by matching impedance," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 845–851, Abril 2010.
- [100] A. Porst, F. Auebach, H. Brunner, G. Deboy, and F. hille, "Improvement of the diode characteristics using emitter-controlled principles (EMCON-diode)," , Weimar, Alemanha, 1997, pp. 213–216.
- [101] "State-of-the-art of DC-DC converters for fuel cell vehicles," , Lille, 2010, pp. 1–6.
- [102] Keith H. Billings, *Switchmode power supply handbook*.: McGraw-Hill, 1989, ch. 2.
- [103] "Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 16, pp. 46–54, Janeiro 2001.
- [104] E. Van Dijk, J. N. Spruijt, D. M. O'Sullivan, and J. B. Klaassens, "PWM-switch modeling of DC-DC converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, pp. 659–665.
- [105] Moradi H. Mohammad and Ali Reza Reisi, "A hybrid maximum power point tracking method for photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2965–2976, 2011.
- [106] T. O. Paine, "Maximum power point tracker," US 3,566,143, 1969.
- [107] J. D. Hartman, "Power conditioning system," US 3,384,806, 1968.
- [108] Roberto Faranda and Sonia Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS transactions on power systems*, vol. 3, pp. 446–455, Junho 2008.
- [109] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar energy materials and solar cells*, vol. 90, pp. 1555-1578, Maio 2006.
- [110] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, vol. 11, pp. 47–62, 2003.
- [111] "Energy harvesting embedded wireless sensor system for building environment applications," , Aalborg, 2009, pp. 36–41.
- [112] J. H. R. Enslin, M. S. Wolf, D. B. Snyman, and W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 769–773, 1997.
- [113] Ziyad M. Salameh, Fouad Dagher, and William A. Lynch, "Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 46, pp. 279–282, 1991.
- [114] T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto, "Short-current pulse based maximum power point

- tracking method for multiple photovoltaic and converter module system," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 49, pp. 217–223, 2002.
- [115] Chihchiang Hua and Chihming Shen, "Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system," *Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pp. 17–22, Maio 1998.
- [116] O. Waszynek, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-102, pp. 3031–3037, Setembro 1983.
- [117] "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, pp. 59–64, 1995.
- [118] Trisham Eram and Patrick L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, pp. 439–449, Junho 2007.
- [119] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, "Optimization of perturbed and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 20, Julho 2005.
- [120] "Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 934–950, Julho 2007.
- [121] Joe-Air Jiang, Tsong-Liang Huang, Ying-Tung Hsiao, and Chia-Hong Chen, "Maximum power tracking for photovoltaic power," *Tamkang journal of science and engineering*, vol. 8, pp. 147–153, 2005.
- [122] Issam Houssamo, Fabrice Locment, and Manuela Sechilariu, "Maximum power tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of Two algorithms," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2381–2387, 2010.
- [123] Dong-Yun Lee, Hyeong-Ju Noh, Dong-Seok Hyun, and Ick Choy, "An improved MPPT converter using current compensation method," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, vol. 1, pp. 540–545, 2003.
- [124] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, and G. S. Kim, "A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms," *Solar Energy*, vol. 76, pp. 455–463, Abril 2004.
- [125] Dongkeon Lee et al., "3D replication using PDMS mold for microcoil," *Microelectronic Engineering*, vol. 86, pp. 920–924, Abril–Junho 2009.

- [126] A. Khosla and B. L. Gray, "Preparation, characterization and micromolding of multi-walled carbon nanotube polydimethylsiloxane conducting nanocomposite polymer," *Materials Letters*, vol. 63, pp. 1203–1206, Maio 2009.
- [127] L. C. S. Nunes, "Mechanical characterization of hyperelastic polydimethylsiloxane by simple shear test," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 1799–1804, Janeiro 2011.
- [128] Harry R. Allcock, Frederick W. Lampe, and James E. Mark,.: Lavoisier S.A.S., 2003, ch. 20.
- [129] Carlos Alberto Paula Leite, "Dinâmica e reatividade de superfície de poli(dimetilsiloxano)s," Campinas, Brasil, Tese de Doutorado 1994.
- [130] "Three-dimensional micro-channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer," *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 9, pp. 76–81, Março 2000.
- [131] Shengbo Sang and Hartmut Witte, "A novel PDMS micro membrane biosensor based on the analysis of surface stress," *Biosensors and bioelectronics*, vol. 25, pp. 2420–2424, Julho 2010.
- [132] D. Fuard, T. Tzvetkova-Chevolleau, S. Decossas, P. Tracqui, and P. Schiavone, "Optimization of poly-di-methyl-silixane (PDMS) substrates for studying cellular adhesion and moyility," *Microelectronic Engineering*, vol. 85, pp. 1289–1293, 2008.
- [133] Miao Liu, Jianren Sun, and Quanfang Chen, "Influences of heating temperature on mechanical properties of polydimethylsiloxane," *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 42–45, Abril 2009.
- [134] Dow Corning. [Online] [Citação: 3 de Fevereiro de 2012.]
<http://www.dowcorning.com/applications/search/default.aspx?R=131EN>
- [135] Polyonics. [Online] [Citação: 3 de Fevereiro de 2012.]
http://www.polyonics.com/PubDocs/FACTS_about_POLYIMIDE_FILM.pdf
- [136] DuPont. DuPont Pyralux LF Copper-Clad Laminates. [Online] [Citação: 3 de Fevereiro de 2012.]
http://www2.dupont.com/Pyralux/en_US/assets/downloads/pdf/LFclad_H-73244.pdf
- [137] Kontakt Chemie. [Online] [Citação: 16 de Fevereiro de 2012.]
http://kontaktspray.com/en/?download=A-20_TDS_EN.pdf
- [138] Battery and Energy Technologies. [Online] [Citação: 16 de Fevereiro de 2012.]
<http://www.mpoweruk.com/protection.htm>

