

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Eletrónica Industrial

Avelino Araújo Ferreira

Sensores sem fios autónomos, alimentados por painel solar e microbateria de lítio, com controlo de alimentação através de circuitos MPPT de baixa potência.

Mestrado integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

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

Outubro de 2012

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

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

O autor do trabalho, Avelino Ferreira, deseja manifestar os seus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, com a sua valiosa colaboração, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves tenho a agradecer a orientação científica, o incentivo, as sugestões e discussões, a confiança e o apoio constantes ao longo de todo o trabalho. E ainda as sugestões feitas durante a escrita da tese e a revisão final.

Aos meus amigos do departamento de eletrónica, pelas suas competências técnicas, sugestões e amizade, que significativamente contribuíram para este trabalho. Especialmente Rui Barros, Vítor Costa, Sérgio Silva, João Rodrigues e Vítor Veiga.

Aos restantes colegas, técnicos do departamento de eletrónica Industrial, o meu agradecimento pela amizade, paciência e bom ambiente.

Finalmente à minha família, em especial aos meus pais e namorada, 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

Os avanços tecnológicos nas áreas de sensores, microtecnologias e comunicações sem fios, possibilitam cada vez mais a utilização de RSSFs (redes de sensores sem fios), permitindo assim revolucionar diversas áreas. Atualmente, às RSSFs não se propagam em grande escala, devido as suas necessidades energéticas, pelo que a utilização de uma bateria não satisfaz por completo as necessidades dos dispositivos eletrónicos. Para colmatar as necessidades energéticas, os circuitos de gestão devem conseguir captar a energia proveniente do ambiente e disponibiliza-la quando necessário.

O ambiente disponibiliza diversas fontes de energia, apresentando-se a energia fotovoltaica como a mais vantajosa, porém a sua extração não se afigura simples, pois é necessário implementar conversores capazes de extrair a máxima potência para alimentar os sensores. Por outro lado, as baterias utilizadas vão se descarregando ao longo do tempo, pelo que a sua gestão deve ser monitorizada, implementando sempre que necessário o carregamento da bateria.

A presente dissertação tem como objetivo principal, o desenvolvimento de um carregador de baterias de polímero de lítio e alimentação do dispositivo eletrónico através da energia fotovoltaica usando um conversor microcontrolador capaz de extrair a máxima potência do painel (MPPT) e proporcionar a recarga adequada da bateria.

Utilizando um painel fotovoltaico de pequenas dimensões e uma bateria de polímero de lítio, ambas flexíveis, desenvolveu-se todo o circuito de gestão e recarga da bateria em SMD (Surface Mounted Device) com uma espessura de alguns milímetros, de modo a proporcionar a maior flexibilidade ao sensor sem fios autónomo.

Palavras-Chave: Sensores autónomos, Energia fotovoltaica, MPPT, bateria, Flexível,

Abstract

The technological advances in the sensors, micro-technologies and wireless communication areas made the usage of RSSFs (wireless sensors networks) become possible, allowing the development of different areas. In the present days the RSSFs are not widely used due to their supplying requirements, because a common battery does not meet all the electronic devices needs. In order to solve this problem, the management circuits must be able to capture the energy coming from the surroundings and make their usage possible when needed.

Fortunately our environment offers a wide range of energies, being the photovoltaic energy the one with more advantages. However the power generation is not so simple due to the need of implementing power converters capable of producing the maximum power to feed the sensors. On the other hand, the used batteries are going to discharge over the time being the power management on these devices an important task to monitor, implementing a battery charge when needed.

The main objective of this dissertation is the development of a lithium polymer battery charger and the supplying of the electronic device by solar energy using a microcontroller converter that is able to drain the maximum power from the panel (MPPT) and deliver a suitable power for the battery charge.

Using a small dimension and flexible photovoltaic panel and a flexible lithium polymer battery a management and recharge circuit was developed in SMD (Surface Mounted Device) with a few millimetres thickness, providing a better flexibility to the autonomous wireless sensor.

Keywords: Autonomous sensors, photovoltaic energy, MPPT, battery, flexible,

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
Lista de Símbolos Siglas e Acrónimos.....	xix
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do Trabalho	1
1.3 Organização da Dissertação.....	2
Capítulo 2 Estado de arte	5
2.1 Energia fotovoltaica.....	5
2.1.1 História da célula fotovoltaica	5
2.1.2 Tipos de células.....	7
2.2 Baterias	11
2.2.1 Atualidade das baterias	13
2.2.2 Bateria Li-Po.....	16
2.3 Sistemas Autónomos	17
2.3.1 Exemplos de sistemas autónomos.....	18
Capítulo 3 Conceitos e fundamentos teóricos	21
3.1 Célula fotovoltaica.....	21
3.1.1 Modelo elétrico da célula fotovoltaica	23
3.1.2 Curva característica da célula fotovoltaica	24
3.1.3 Rendimento da célula fotovoltaica	26
3.1.4 Temperatura.....	26
3.1.5 Radiação solar.....	27
3.1.6 Coeficiente de absorção.....	28
3.1.7 Associação em série e Paralelo.....	28

3.2	Baterias de polímero de lítio.....	29
3.2.1	Processo de carga e descarga	30
3.2.2	Método de carga de uma bateria.....	31
3.2.3	Proteção das baterias	32
3.2.4	Baterias de estado sólido.....	32
3.3	Conversores DC-DC.....	33
3.3.1	Conversor Step Up.....	34
3.3.1.1	Modo de condução contínua.....	36
3.3.1.2	Limiar de condução contínua e descontínua	37
3.3.1.3	Modo de condução descontínua	39
3.3.1.4	Ripple da tensão de saída	40
3.3.1.5	Indutância crítica.....	41
3.3.2	Conversores elevadores-abaixadores.....	42
3.4	MPPT	43
3.4.1	Tipos de algoritmo	44
3.4.2	Tensão constante	44
3.4.3	Perturba e observa.....	45
3.4.4	Condutância Incremental.....	47
3.4.5	Comparação dos diversos métodos	49
Capítulo 4	Simulações.....	51
4.1	PSIM	51
4.2	Simulação do painel fotovoltaico.....	52
4.3	Algoritmo Tensão Constante.....	53
4.4	Algoritmo Perturba e Observa.....	56
4.5	Algoritmo Condutância Incremental	58
4.6	Comparação dos diversos algoritmos.....	60
Capítulo 5	Implementação prática	63
5.1	Abordagem Prática.....	63
5.2	Bateria	64
5.2.1	Proteção da bateria	65
5.3	Painel fotovoltaico MP3-37.....	66
5.4	Unidade de controlo	69

5.4.1	Microcontrolador	70
5.4.2	Sensores.....	71
5.4.3	Reóstato digital	72
5.5	Conversor Step Up.....	73
5.6	MPPT	76
5.6.1	Seleção do método MPPT.....	77
5.6.2	MPPT Tensão Constante.....	79
5.6.3	Resultados.....	80
5.7	Carregador de baterias.....	82
5.7.1	Algoritmo de controlo.....	83
5.7.2	Resultados.....	84
5.8	Alimentação de dispositivos eletrónicos.....	85
5.9	Eficiência	86
Capítulo 6	Conclusões e Trabalho Futuro	89
6.1	Conclusões.....	89
6.2	Propostas de trabalho futuro.....	90

Índice de Figuras

Figura 1 - Alexandre Edmond Becquerel	5
Figura 2 - Extrato da patente da célula solar em 1954.....	6
Figura 3 - Instalação da primeira célula fotovoltaica em Americus	6
Figura 4 - tipos de células fotovoltaicas.....	9
Figura 5 - Eficiência das células fotovoltaicas [13]	10
Figura 6 - Alessandro Volta e a invenção da bateria	11
Figura 7 - Comparação entre as diversas baterias recarregáveis [23]	13
Figura 8 - Bateria de acido-chumbo	14
Figura 9 - Bateria de Níquel-cádmio	14
Figura 10 - bateria de hidreto metálico de níquel	14
Figura 11 - bateria de íões de lítio	15
Figura 12 - bateria de polímero de lítio.....	15
Tabela 2 - Comparação entre as diversas baterias recarregáveis.....	16
Figura 13 - Esquema de um sistema autónomo.....	17
Figura 14 - iSense Solar Power Harvesting System.....	18
Figura 15 - Millimeter-Scale Nearly Perpetual Sensor System with Stacked Battery and Solar Cells.....	19
Figura 16 - A Cubic-Millimeter Energy-Autonomous Wireless Intraocular Pressure Monitor.....	19
Figura 17 - Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos eléctricos.....	19
Figura 18 - Energy-Harvest-RD.....	20
Figura 19 - eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting	20
Figura 20 - Diagrama de blocos do carregamento de uma bateria	21
Figura 21 - Dopagem do silício com Boro e Fósforo	22
Figura 22 - Esquemático de uma célula fotovoltaica	23
Figura 23 - Circuito equivalente da célula	23
Figura 24 - modelo simplificado da célula fotovoltaica	25
Figura 25 - Circuito equivalente e comportamento das curvas características	25

Figura 26 - Caracterização da célula fotovoltaica	26
Figura 27 - Variação da tensão e corrente consoante o aumento da temperatura	27
Figura 28 - Variação da tensão e corrente consoante o aumento da radiação solar	28
Figura 29 - Associação em série	29
Figura 30 - Associação em paralelo	29
Figura 31 - Esquemático de uma bateria de Polímero de lítio.....	30
Figura 32 - Efeito de carga e descarga da bateria	31
Figura 33 - Método de carga misto de tensão e corrente.....	31
Figura 34 - Baterias de estado líquido e sólido.....	33
Figura 35 - Diagrama de blocos da atuação do conversor.....	34
Figura 36 - Conversor Step Up.....	35
Figura 37 - Estados do conversor Step up.....	35
Figura 38 - Tensão e Corrente na bobine	36
Figura 39 - Formas de onda do conversor no limiar de condução continua	37
Figura 40 - Formas de onda de I_{OB} e I_{LB} para V_o constante.....	38
Figura 41 - Formas de onda do conversor no modo descontínuo.....	39
Figura 42 - Ripple da tensão de saída do conversor	41
Figura 43 - topologias elevadoras-abaiadoras	42
Figura 44 - Obtenção do ponto de máxima potência.....	43
Figura 45 - Algoritmo Tensão Constante.....	45
Figura 46 - Direções possíveis de obtenção do MPP através do P&O	46
Figura 47 - Algoritmo Perturba e Observa.....	47
Figura 48 - Procura do ponto de máxima potência.....	48
Figura 49 - Algoritmo Condutância Incremental	49
Figura 50 - Simulação do painel MP3-37	52
Figura 51 - Modelo físico do MP3-37	53
Figura 52 - Esquemático do step up com algoritmo tensão constante de MPPT.....	54
Figura 53 - Variação da potência com interrupção para leitura da tensão em aberto	54

Figura 54 - Controlo do algoritmo de tensão constante	55
Figura 55 - Variação das potências no MPPT tensão constante.....	56
Figura 56 - Esquemático do step Up com algoritmo perturba e observa de MPPT.....	57
Figura 57 - Controlo do algoritmo de perturba e observa.....	57
Figura 58 - Variação das potências no MPPT perturba e observa	58
Figura 59 - Esquemático do step up com algoritmo condutância incremental de MPPT.....	59
Figura 60 - Controlo do algoritmo da condutância incremental	59
Figura 61 - Variação das potências no MPPT condutância incremental.....	60
Figura 62 - Diagrama de blocos implementado.....	64
Figura 63 - Flexibilidade apresentada pelas baterias ultrafinas da PowerStream	64
Figura 64 - Curvas de descarga para a bateria PGEB014461.....	65
Figura 65 - Diagrama de uma aplicação usando o UCC3958 como proteção	66
Tabela 7 - Características do painel fotovoltaico MP3-37.....	66
Figura 66 - Painel MP3-37	67
Figura 67 - Curvas características do painel MP3-37 com 100% e 25% de radiação fornecidas pela PowerFilm.....	67
Figura 68 - Resistências utilizadas para calcular as características do painel fotovoltaico.....	67
Figura 69 - Características do painel MP3-37 segundo a radiação	68
Figura 70 - Potencia obtida a 25°C e 50°C	69
Figura 71 - Diagrama de blocos da Unidade de Controlo.....	69
Figura 72 - PIC12LF1840	70
Figura 73 - Sensor de corrente MAX9938 da Maxim	71
Figura 74 - - Reóstato digital MCP4017T.....	72
Figura 75 - Barramento I2C	73
Figura 76 - Trama I2C.....	73
Figura 77 - Implementação do MAX1676.....	74
Figura 78 - Circuito de testes do MAX1676 com microcontrolador e reóstato digital	74
Figura 79 - Tensão de saída do conversor e erro apresentado relativamente aos valores teóricos esperados.....	75

Figura 80 - Circuito MPPT implementado.....	76
Figura 81 - Protótipo implementado e radiômetro	77
Figura 82 - Curva de potência de um painel fotovoltaico	77
Figura 83 - Curva de potência utilizando fonte dc em serie com uma resistência, para simular o painel fotovoltaico	77
Figura 84 - Potência à entrada do conversor em função da posição do reóstato	78
Figura 85 - Corrente à entrada do conversor em função da posição do reóstato	78
Figura 86 - Variação das tensões à saída do step up e na bateria.....	78
Figura 87 - Potência fornecida à bateria em função da posição do reóstato.....	78
Figura 88 - Definição do ponto de MPP através da tensão em vazio	80
Figura 89 - Teste do MPPT com recurso a fonte DC	81
Figura 90 - Teste do MPPT utilizando o painel MP3-37	81
Figura 91 - Circuito de carregamento de uma bateria implementado	82
Figura 92 - Algoritmo de carregamento implementado.....	83
Figura 93 - Corrente de carga (multímetro da esquerdo), Tensão na bateria (multímetro da direita) e controlo de Corrente no reóstato	84
Figura 94 - Carregamento da bateria PGEB016144	85
Figura 95 - Alimentação de uma carga através do painel fotovoltaico e da bateria	86
Figura 96 - Eficiência do MAX1676 para uma tensão de saída constante de 3.3V	87
Figura 97 - Eficiência do MAX1676 para uma tensão de saída constante de 5V	87
Figura 98 - Eficiência do Step up controlado.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 1 - História das Baterias	12
Tabela 2 - Comparação entre as diversas baterias recarregáveis	16
Tabela 3 - Características das diversas fontes de energia proveniente do ambiente [32]	17
Tabela 4 - Comparação dos diversos métodos dinâmicos de extração da máxima potência	50
Tabela 5 - Eficiência simulada dos diversos MPPTs	61
Tabela 6 - Características da bateria PGE016144	64
Tabela 7 - Características do painel fotovoltaico MP3-37	66

Lista de Símbolos Siglas e Acrônimos

Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
I_{pv}	Corrente gerada pela célula fotovoltaica em função da radiação	Ampere (A)
I_{out}	Corrente fornecida pela célula fotovoltaica	Ampere (A)
I_d	Corrente que circula pelo diodo	Ampere (A)
I_{sh}	Corrente de curto-circuito	Ampere (A)
V	Tensão aos terminais da célula	Volt (V)
R_s	Resistência em série	Ohm (Ω)
R_{sh}	Resistência em paralelo	Ohm (Ω)
I_o	Corrente inversa máxima de saturação do diodo	Ampere (A)
n	Coeficiente de emissão ou fator de idealidade	
V_D	Tensão no diodo	Volt (V)
T	Temperatura em kelvin	Kelvin (K)
q	Carga do elétron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)	
k	Constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$)	
αT	Coeficiente de Temperatura	
T	Temperatura	Grau ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	Temperatura de referência	Grau ($^{\circ}\text{C}$)
S	Radiação global	(W/m^2)
S_{ref}	Radiação de referência	(W/m^2)
η	Rendimento	
P_o	Potência de saída	Watt (W)
P_i	Potência de entrada	Watt (W)
I	Corrente	Ampere (A)
V_{oc}	Tensão em circuito aberto	Volt (V)
K_i	Coeficiente de temperatura na corrente	
k_v	Coeficiente de temperatura na tensão	
V_{ocref}	Tensão de referência em circuito aberto	Volt (V)
D	Duty-cycle	
V_{MPP}	Tensão de máxima potência	Volt (V)
k	Fator de multiplicação entre a tensão em aberto e de máxima potencia	
R	Resistência	Ohm (Ω)

Siglas

Sigla	Descrição
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
MPPT	Maximum Power Point Tracking
SMD	Surface Mounted Device
CIS	Copper Indium Selenide
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide
VRLA	Valve Regulated Lead Acid
SLA	Sealed Lead Acid
PWM	Pulse With Modulation
DC	Direct Current
I2C	Inter Integrated Circuit
ADC	Analog to Digital Converter
DLL	Dynamic Link Library

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo dos últimos anos a indústria da microeletrónica tem vindo a focar-se na redução dos consumos energéticos, de modo a criar uma base sustentável, onde os dispositivos eletrónicos possam ser alimentados exclusivamente por fontes energéticas, provenientes do ambiente. Atualmente a miniaturização dos componentes eletrónicos encontra-se numa fase avançada, em que é possível continuar a obter componentes altamente eficientes com tamanhos reduzidos, o que sugere cada vez mais a sustentabilidade das aplicações.

A utilização de uma bateria como fonte energética acarreta várias condicionantes, no que diz respeito a durabilidade e miniaturização de um dispositivo eletrónico. Não obstante das suas qualidades, torna-se necessário implementar medidas que visem reduzir essa dependência energética. De acordo com os pressupostos assumidos, a utilização de fontes energéticas provenientes do ambiente para alimentar os dispositivos eletrónicos ou recarregar baterias, apresentam-se como métodos fiáveis.

De todas as fontes energéticas provenientes do ambiente, a energia fotovoltaica apresenta-se como sendo, a que melhor desempenho proporciona em sistemas autónomos, devido essencialmente à potência disponibilizada. Porém a utilização de painéis fotovoltaicos pressupõe algumas dificuldades na obtenção da energia, devido à falta de linearidade existente entre a corrente e tensão fornecidas. As dificuldades devem ser ultrapassadas com a utilização de conversores, capazes de extrair a máxima potência disponível, independentemente das condições climáticas. Os mesmos circuitos devem, ainda, assegurar todo o processo de recarregamento das baterias, de modo a maximizar a longevidade do produto.

1.2 Objetivos do Trabalho

Utilizando um painel solar fotovoltaico de pequenas dimensões e uma bateria de lítio, ambas flexíveis e adquiridas no mercado, pretende-se desenvolver todo o circuito eletrónico para gerir a energia disponível num painel fotovoltaico de pequenas dimensões e o carregamento de uma

bateria. Todo o controlo deve ser efetuado através de um microcontrolador, maximizando a eficiência do sistema, e deve ter em conta sempre a utilização da máxima potência disponível no painel fotovoltaico.

O circuito deve ser desenvolvido em SMD, com uma espessura de alguns milímetros, de modo a tornar o protótipo o mais flexível possível.

Os objetivos e tarefas propostas são:

- Estudo dos painéis fotovoltaicos e das pilhas de polímero de lítio;
- Aquisição da bateria e painel fotovoltaico flexível;
- Estudo do estado de arte dos conversores MPPT (Maximum Power Point Tracking) e carregamento de uma bateria;
- Simulação e implementação do circuito MPPT (através de um microcontrolador) para carregamento de uma bateria;
- Caracterização e otimização do circuito MPPT;
- Desenho e fabricação do circuito;
- Testes e Otimização

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada consoante as atividades desenvolvidas e para melhor compreensão está dividida em três partes. Na primeira é feita uma análise teórica, que comporta os três primeiros capítulos. Na segunda parte é feita a simulação e comparação dos diversos métodos de procura do ponto de máxima potência, e na terceira e final é feita a descrição, implementação e análise de resultados.

No primeiro capítulo é feito o enquadramento do problema energético, flexibilidade dos produtos e definição dos objetivos.

O segundo capítulo tem como base o estado da arte dos painéis fotovoltaicos, baterias recarregáveis e sistemas autónomos constituídos por painéis fotovoltaicos, como geradores de energia proveniente do ambiente.

No terceiro capítulo são abordados os conceitos teóricos necessários a realização da dissertação. É feita uma análise elétrica das células fotovoltaicas, carregamento de baterias,

conversores dc-dc (corrente contínua – corrente contínua) e circuitos de extração da máxima potência.

O quarto capítulo incorpora as simulações e análise dos diversos métodos de obtenção do ponto de máxima potência para células fotovoltaicas.

A implementação e análise de resultados são descritas no quinto capítulo.

Por fim, no sexto capítulo são elaboradas as conclusões finais e propostas de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado de arte

2.1 Energia fotovoltaica

O efeito fotovoltaico consiste na criação de uma diferença de potencial entre os extremos de um material semicondutor, produzida através da absorção da luz solar. Foi visualizado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, através do mergulho de placas metálicas de platina, ou prata em um eletrólito e expondo, estas ao sol [1].



Figura 1 - Alexandre Edmond Becquerel

A produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico apenas foi alcançada em 1877 por Grylls Adams e Richard Evans Day ao utilizarem as propriedades fotocondutores do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo [2]. Apesar da baixa eficiência demonstrada (0.5%), nos finais do século XIX, o engenheiro alemão Werner Siemens comercializou células de selênio como fotômetros para máquinas fotográficas [3].

A evolução da energia fotovoltaica e em particular das células, teve de esperar pelas explicações científicas sobre o efeito fotovoltaico, teoria das bandas e física dos semicondutores para alcançar novas e determinantes alterações na sua composição.

2.1.1 História da célula fotovoltaica

A primeira célula fotovoltaica foi inventada, após o químico Calvin Fuller em 1953 dos Laboratórios Bell ter desenvolvido o processo de dopagem de um material de forma a controlar as propriedades elétricas deste. A descoberta de Fuller impulsionou o físico Gerald Pearson a produzir um material constituído por uma junção p-n com o objetivo de criar um campo elétrico na junção.

Ao caracterizar eletricamente o material, Pearson descobriu a presença de uma corrente elétrica quando o material era exposto a luz solar, surgindo então a primeira célula fotovoltaica [4]. A célula fotovoltaica desenvolvida obteve, então um rendimento de 4% em vez dos 1% atingidos com as células de selênio.

A primeira célula fotovoltaica a obter um rendimento de 6% foi apresentada por Fuller, quando utilizou o arsênio em vez de gálio no substrato n e uma difusão de boro no substrato p [4].

Após várias demonstrações, a primeira célula fotovoltaica pode ser finalmente apresentada numa conferência em 25 de Abril de 1954 e patenteada.[5]

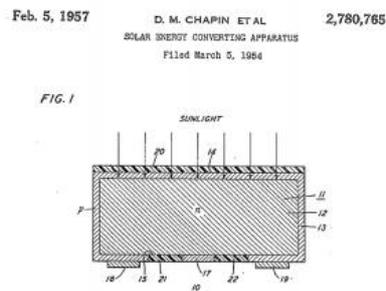


Figura 2 - Extrato da patente da célula solar em 1954

A célula fotovoltaica foi implementada numa aplicação pela primeira vez em 1955, no estado da Geórgia e tinha como objetivo alimentar uma rede de telefones local (Figura 3)[6]. Porém, rápido se percebeu que o custo de fabricação seria um grande entrave ao desenvolvimento e comercialização, permitindo apenas que estas sejam utilizadas em aplicações espaciais.



Figura 3 - Instalação da primeira célula fotovoltaica em Americus

Nos anos seguintes assistiu-se a um forte desenvolvimento e utilização das células solares para aplicações espaciais, obtendo-se avanços significativos no que diz respeito a eficiência. A partir de 1960 o contacto frontal foi substituído por uma rede fina de vários contactos, reduzindo assim a resistência em série [7].

Outro avanço significativo surgiu por intermédio da Comsat, ao desenvolver a célula violeta, registrando uma eficiência de 13.5% [8]. Esta era composta por uma camada do tipo n significativamente mais fina que as anteriores, o que possibilitava uma melhor resposta à luz azul e pela criação de um campo elétrico na superfície da célula que permitia absorver com mais eficiência a luz vermelha.

Em 1973, o preço do barril de petróleo fez soar o alarme sobre as fontes de energia, de tal forma que várias empresas, começaram a investir no desenvolvimento de células fotovoltaicas, de forma a reduzir a dependência energética do petróleo. Os investimentos efetuados, rapidamente começaram a surgir efeito, provocando uma verdadeira revolução no que diz respeito à produção de células fotovoltaicas, desde a utilização de silício multicristalino em vez de monocristalino, novos métodos de produção e até a utilização de serigrafia para efetuar deposição em vez de fotolitografia [9]. A conceção dos novos conceitos, permitiu atingir rendimentos elevados, na ordem dos 20% [10] e reduzir os custos de fabricação para patamares antes impensáveis.

Nos anos seguintes, o desenvolvimento em massa das células fotovoltaicas permitiu descobrir novos materiais e métodos de construção, permitindo assim, hoje a existência de um mercado amplo de células fotovoltaicas.

2.1.2 Tipos de células

Atualmente as células são divididas em três categorias, convencionais, filme fino ou multijunção dependendo da uniformidade de distribuição de átomos no material.

Numa primeira fase surgiram as células convencionais, em silício monocristalino (c-Si) ou policristalino (m-Si). A conceção destas células requer graus de pureza elevados, o que origina eficiências altas e custo elevados devido a necessidade de obter elevados níveis de pureza.

A necessidade de obter células fotovoltaicas com preços reduzidos, levou a materialização de um novo conceito, designado por células de filme fino. Estas novas células, baseiam-se na deposição de camadas finas de material semicondutor, obtendo assim, uma boa relação eficiência e preço. A utilização dos filmes finos permite que as células fotovoltaicas sejam utilizadas em diversas aplicações, devido a flexibilidade obtida. Os materiais semicondutores usados são geralmente o silício amorfo (a-Si), arsenieto de gálio (GaAs), telurieto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIS e CIGS).

A contínua necessidade de elevar a eficiência levou à criação das células de multijunção, uma nova geração, concebidas através da interconexão de vários compostos. A escolha dos semicondutores é caracterizada pelo seu band gap¹, que faz com que estes tenham maior apetência para absorver determinadas gamas do espectro de radiação solar. A interconexão de vários compostos permite absorver diversas gamas de espectro, conseguindo assim um maior rendimento. A semelhança do que aconteceu com as células convencionais nos primeiros anos, a sua conceção apenas se torna viável em aplicações especiais.

Células de silício monocristalino (c-Si): Foram as primeiras células a serem comercializadas em grande escala, sendo ainda na atualidade as mais utilizadas. O silício utilizado deve apresentar características monocristalinas e com baixa densidade de defeitos, para que o processo de fabricação consiga obter elevadas purzas, na ordem dos 99%. A utilização de processos de fabricação rigorosos, principalmente na obtenção da pureza permite que as células monocristalinas apresentem eficiências significativamente elevadas (27,6% máximo), porém com custos também elevados.

Células de silício policristalino (p-Si): As células policristalinas são produzidas através de métodos muito semelhantes as monocristalinas, diferenciando-se principalmente na obtenção de níveis de pureza inferiores. A elaboração de células com níveis de pureza inferiores contempla custos reduzidos de fabricação, porém com eficiências também inferiores (20,4% máxima).

Células de arsenieto de gálio (GaAs): O Arsenieto de Gálio é um semicondutor composto pela inclusão e mistura do Gálio (Ga) e Arsénio (As). Atualmente são as células fotovoltaicas de monojunção mais eficientes (28,3% máxima), pois o seu material possibilita elevados níveis de absorção à radiação solar e baixa sensibilidade à temperatura, logo é possível obter elevados rendimentos com pequenas quantidades de matéria-prima.

Atualmente os custos da matéria-prima e fabricação destas têm impedido a sua ascensão.

Células de silício amorfo (a-Si): As células de silício amorfo distinguem-se das outras células de silício, devido a apresentarem na sua estrutura uma elevada desordem nos átomos. O silício amorfo é encarado como uma solução viável, especialmente nos filmes finos, pois o seu processo

¹ Quantidade de energia necessária para libertar um eletrão da sua orbita (Adaptado de <<http://www.pveducation.org/pvc/drom/pn-junction/band-gap>>, acesso em 26-05-2012)

de fabrico é relativamente barato e permite que a deposição seja efetuada em diversos tipos de substratos. A utilização de substratos flexíveis permite inovar na utilização de células fotovoltaicas conseguindo assim abranger diversas áreas de utilização.

Porém, a desordem dos átomos reflete-se essencialmente na eficiência que estas podem apresentar, variando entre os 8 e 12.5%. A maior desvantagem da utilização das células, prende-se com a degradação que estas sofrem nos primeiros meses, reduzindo assim a sua vida útil.

Células de telurieto de cádmio (CdTe): O telurieto de cádmio possui um band gap de energia na ordem dos 1,44eV muito perto do ideal, e um índice de absorção muito elevado [11]. A utilização do CdTe permite obter rendimentos elevados (17,3% máxima) com pequenas quantidades de material condutor e com custos reduzidos. A toxicidade do cádmio apresenta-se como uma desvantagem.

Células de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS): Este tipo de células são caracterizadas pela sua estabilidade, quando expostas à radiação solar, permitindo assim alcançar bons níveis de eficiência (20,3% máxima). O elevado nível de absorção permite ainda a economia de material, pois enquanto as células de silício necessitam de 200 μm a 300 μm , as CIGS apenas precisam de 1 μm [12]. Porém, a escassez e dificuldade de manuseamento do material devido a sua toxicidade constituem os maiores entraves à sua comercialização.

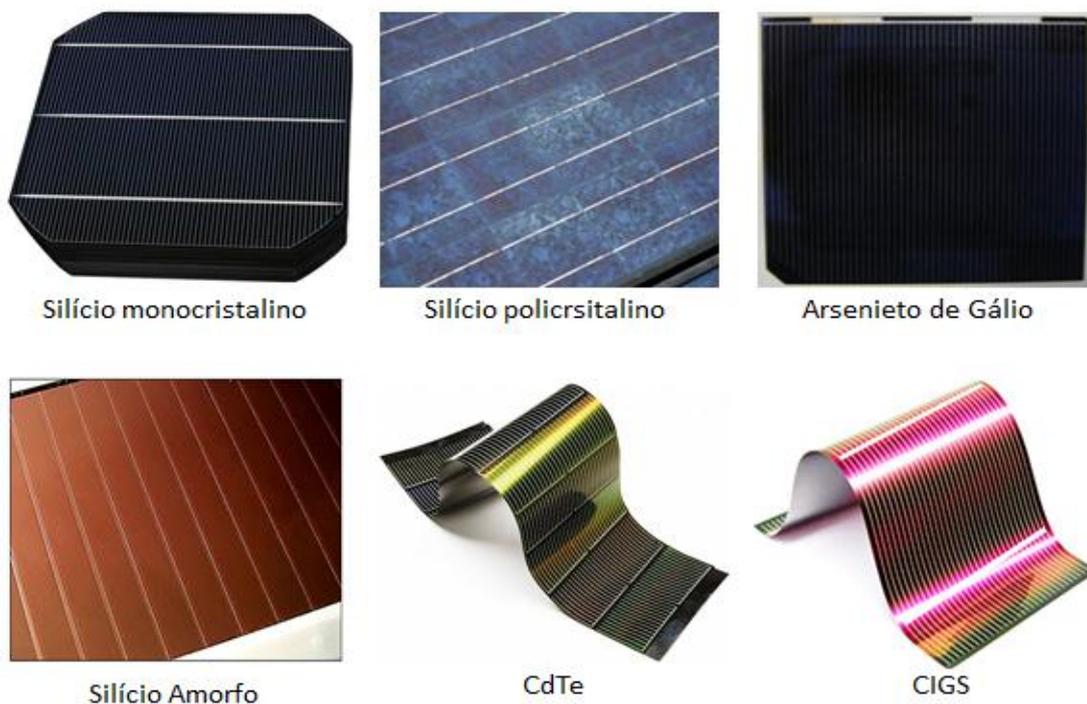


Figura 4 - tipos de células fotovoltaicas

Para compreender melhor a evolução das células fotovoltaicas é apresentado um gráfico na Figura 5 que refere todos os acontecimentos relevantes referentes a eficiência das células.

No ano de 2011 foram alcançados importantes avanços, pois a Solar Junction e a Alta Devices estabeleceram novos recordes nas células de multijunção 43,5% e filmes finos 28,3% respetivamente. No que diz respeito as células convencionais, o avanço tecnológico dos últimos anos não se têm traduzido em grandes melhorias, pois a célula mais eficiente data de 2005 pela Amonix.

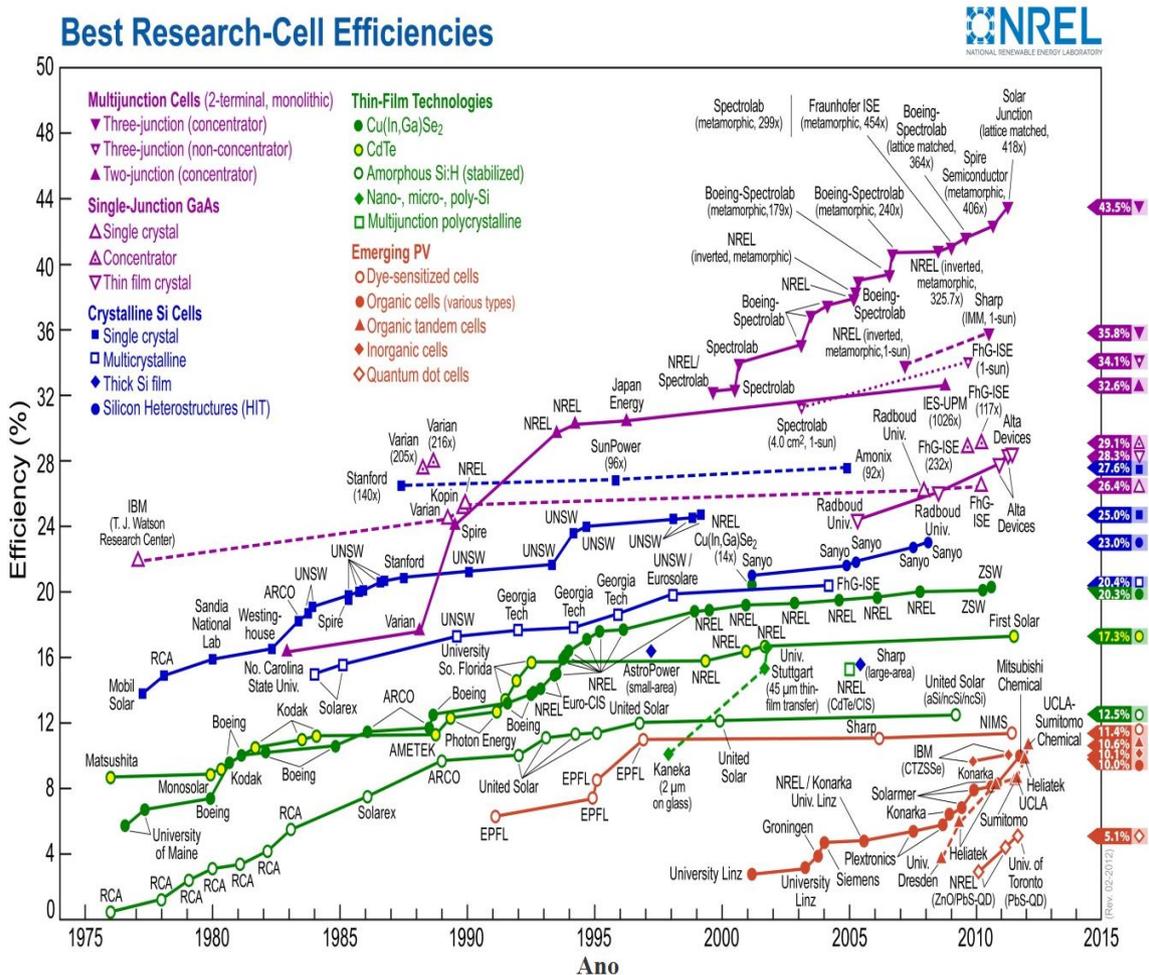


Figura 5 - Eficiência das células fotovoltaicas [13]

2.2 Baterias

A 20 de Março de 1800 Alessandro Volta comunicava por carta ao Sr Joseph Banks presidente da Royal Society, a invenção da bateria [14]. Esta descoberta teve como base os estudos desenvolvidos por Luigi Galvani, em que referia a existência de eletricidade em organismos vivos [15].

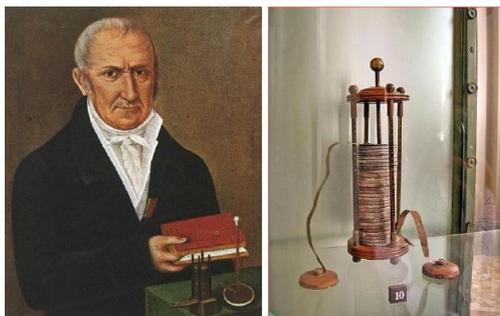


Figura 6 - Alessandro Volta e a invenção da bateria

Em 1836 o químico britânico Johnm Frederic Daniell desenvolveu uma bateria mais estável e com maior capacidade que a de Volta [16]. A bateria de Daniell conseguiu um aumento de condutividade na bateria, pois o uso de sulfato de zinco e cobre consumia o hidrogénio dentro da bateria, aumentando assim a sua eficiência.

Em 1859 o francês Gaston Planté, deu um grande impulso no estudo e desenvolvimento das baterias, ao ter inventado a primeira bateria recarregável [17]. A bateria designada por acumulador de chumbo, ainda hoje é amplamente utilizada nos veículos a motor.

Georges Leclanché, engenheiro francês, em 1866 inventou a denominada bateria de Leclanché, caracterizada por possuir um cátodo de dióxido de manganês, um ânodo de zinco e um eletrólito de cloreto de amónio [18].

Em 1886 Carl Gassner, um inventor alemão patenteou a primeira bateria seca [19]. O seu eletrólito usava gesso em vez da solução líquida de Leclanché, o que permitia o aumento de segurança no manuseamento das baterias [20].

Em 1899 Waldemar Jungner inventou as baterias de níquel-cadmio [21], estas tornaram-se num importante avanço na tecnologias das baterias, pois foi possível criar uma bateria recarregável de dimensões reduzidas e com tempo de vida consideravelmente grande, quando comparadas com as baterias de zinco-carbono inventada por Carl Gassner.

O químico Americano Manley Stanley Whittingham inventou no ano de 1970 a primeira bateria de iões de lítio não recarregável. Uns anos mais tarde foi inventada a bateria de lítio recarregável,

porém a sua instabilidade não levou à sua comercialização. A comercialização destas baterias só surgiria em 1991, aquando da invenção de uma nova bateria pela sony [22].

As baterias de polímero de lítio surgiram no ano 1996, apresentando boas capacidades e fácil manuseamento [23]. Um importante avanço no que diz respeito à flexibilidade das baterias.

A necessidade de obter cada vez melhores desempenhos nas baterias, em tamanhos reduzidos, levou em 2009 a Cymbet a desenvolver uma bateria de lítio de estado sólido [24].

A Tabela 1 resume a história e evolução das baterias.

Tabela 1 - História das Baterias

História das Baterias		
1791	Galvani (Itália)	Descobrimto de eletricidade em organismos vivos
1800	Volta (Itália)	Invenção da primeira bateria
1802	Cruickshank (Inglaterra)	Primeira bateria possível de produção em grande escala
1836	Daniell (Inglaterra)	Invenção da bateria de Daniell
1859	Planté (França)	Invenção da bateria de chumbo-ácido
1868	Leclanché (França)	Invenção da bateria de Leclanché
1888	Gassner (EUA)	Conclusão da primeira bateria seca
1899	Jungner (Suécia)	Invenção da bateria de níquel-cádmio
1901	Edison	Invenção da bateria de iões de níquel
1912	Lewis (EUA)	Invenção da bateria de lítio
1960	Union Carbide (EUA)	Desenvolvimento de baterias alcalinas
1970	Whittingham (EUA)	Comercialização da bateria de lítio
1991	Sony (Japão)	Comercialização de baterias de lítio recarregável
1992	Kordesch (Canadá)	Comercialização de baterias alcalinas recarregáveis
1996		Invenção da bateria de polímero de lítio
2009	Cymbet (EUA)	Comercialização das baterias de lítio em estado sólido

2.2.1 Atualidade das baterias

Hoje em dia o desenvolvimento de novas tecnologias e processos prende-se cada vez mais com a necessidade de obter baterias com melhores desempenhos, em tamanhos cada vez mais reduzidos e flexíveis. A escolha de uma bateria depende essencialmente das necessidades da aplicação, sendo os principais fatores, a capacidade elétrica, o tamanho, a segurança e a possibilidade de recarga.

A produção de baterias atualmente assenta essencialmente nas baterias de lítio, chumbo-acido, Níquel-cadmio e Níquel-Metal [25]. A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** faz uma comparação entre diversas baterias, utilizando como características de comparação o volume, peso e densidade energética.

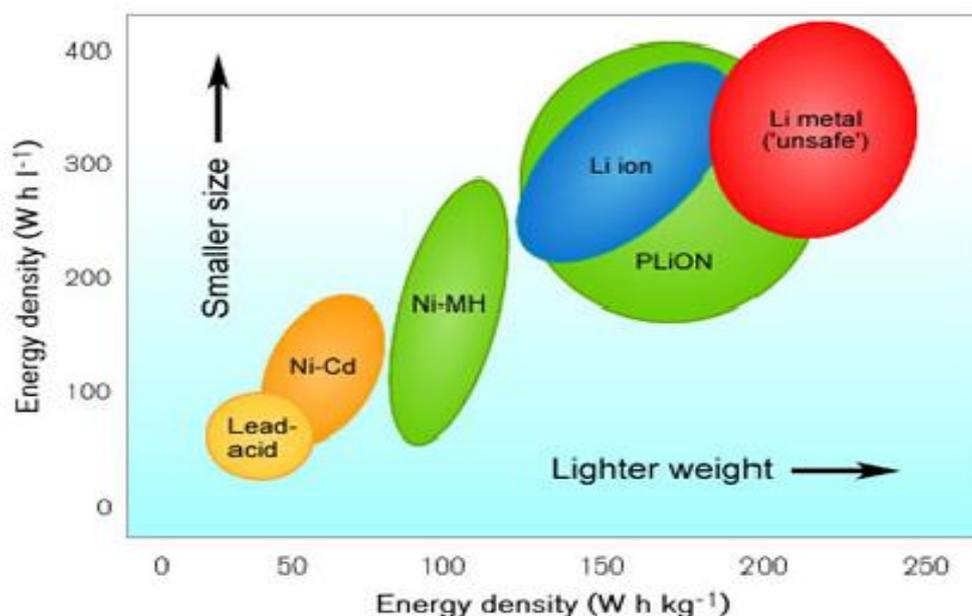


Figura 7 - Comparação entre as diversas baterias recarregáveis [23]

As baterias de acido-chumbo foram as primeiras baterias recarregáveis a surgir no mercado e ainda hoje são amplamente utilizadas em veículos motorizadas, iluminação de emergência e UPS, porém, com a diferença do seu eletrólito ter sido substituído por separadores humedecidos e possuírem um encapsulamento fechado.

Hoje em dia as baterias de acido-chumbo são divididas em dois grupos, VRLA (Valve Regulated Lead Acid) que possuem válvula de ventilação devido aos gases inerentes ao processo químico e as SLA (Sealed Lead Acid) que não possuem válvula de escape [26].

Apresentam como desvantagem principal, possuir um peso e volume desproporcional à densidade energética que apresentam. A ampla utilização destas baterias deve-se principalmente ao baixo custo de produção e à capacidade que estas têm de responder bem a picos de corrente em espaços pequenos de tempo [27].



Figura 8 - Bateria de ácido-chumbo

A utilização de baterias de Níquel-cádmio tem como principais vantagens a possibilidade de obter potências elevadas com menos volume sem que exista queda de tensão durante a utilização e possuem tempos de vida oito vezes superior, quando comparadas com as baterias de chumbo [28]. No entanto apresentam a desvantagem de serem bastante caras, sofrerem de efeito de memória e as suas células possuem tensões baixas [29].



Figura 9 - Bateria de Níquel-cádmio

As baterias de Hidreto metálico de níquel são consideradas amigas do ambiente, pois utilizam hidrogénio sobre a forma de hidreto metálico ao invés de cádmio, ou seja, utilizam um dielétrico não poluente. Estas são caracterizadas por terem uma profundidade de descarga na ordem dos 99% e por não apresentarem efeito de memória como as baterias de níquel de cádmio [27].



Figura 10 - bateria de hidreto metálico de níquel

Como é perceptível na Figura 7 o lítio apresenta-se como sendo o melhor elemento químico até ao momento, para a produção de baterias, pois é possível obter excelentes relações densidade energética, peso e volume.

As baterias de íões de lítio foram as primeiras a surgir no mercado, revolucionando-o por completo, devido as suas características. Estas apresentam densidades energéticas elevadas (cerca de quatro vezes superiores as baterias de acido-chumbo), tensões superiores para o mesmo número de células, ausência de efeito de memória e ainda uma redução grande de volume e peso. Porém, nem tudo são vantagens, pois a utilização do lítio requer circuitos de proteção, para que a sua corrente e tensão se mantenha dentro dos limites de segurança, o seu custo de produção é relativamente superior a outras baterias e permite a redução da sua capacidade ao longo do tempo [25][27].



Figura 11 - bateria de íões de lítio

As baterias de polímero de lítio são muito semelhantes as baterias de íões de lítio no que diz respeito às suas características, porém, a existência de um polímero como eletrólito reduz ainda mais o volume, possibilitando uma maior flexibilidade da bateria e um aumento de segurança, pois o vazamento de um eletrólito sólido torna-se mais difícil que um eletrólito líquido. Contudo tem a desvantagem de possuir capacidades relativamente mais baixas que as baterias de íões de lítio [25].



Figura 12 - bateria de polímero de lítio

A bateria de lítio-metal é caracterizada por possuir uma densidade energética muito elevada, porém a segurança destas baterias tem sido um entrave à sua comercialização até ao momento [30].

A Tabela 2 apresenta um resumo das diversas baterias e suas características mais relevantes [25][27][29][31]. Todas as baterias têm ampla utilização em diversas aplicações, pois existe uma grande diferenciação entre as suas características.

Tabela 2 - Comparação entre as diversas baterias recarregáveis

	Ácido-chumbo	NiCd	NiMh	Lithium-ion	Li-Po
Tensão nominal (V)	2	1.2	1.2	3.6	3.7
Capacidade nominal (Ah)	0.2 a 30	0.65 a 3	0.25 a 10	0.005 a 10	0.1 a 8
Corrente máxima de descarga	5C	20C	5C	>2C	>2C
Auto descarga num mês (%)	5	20	30	10	10
Profundidade de descarga	20-50		99	80	80
Eficiência	50-90	80	66	90	98
Ciclos de Vida (80% da capacidade inicial)	200 a 300	1500	500 a 100	500 a 1000	300 a 500
Wh/L	35 a 100	60 a 185	75 a 290	220-380	170-410
Wh/Kg	30 a 60	30 a 75	80 a 120	125 a 180	130 a 225

2.2.2 Bateria Li-Po

Atendendo às necessidades do projeto e às características das baterias, a bateria de polímero de lítio apresenta-se como sendo a melhor desempenho proporcionará, pois apresenta uma eficácia de carga e descarga na ordem dos 98% e ainda densidades energéticas por unidade de volume e peso bastante agradáveis quando comparadas com as outras baterias. Todas estas características aliadas à utilização de um polímero como dielétrico em vez de um líquido oferecem boas características de recarga e flexibilidade ao projeto.

2.3 Sistemas Autónomos

Na atualidade, deparamo-nos cada vez mais com o uso de sensores sem fios em todo o tipo de aplicações, desde a indústria automóvel até ao sector medicinal. Porém o avanço tecnológico nesta área tem encontrado na eficiência energética o maior entrave, devido à utilização de baterias não recarregáveis. De forma a criar sustentabilidade, surgiram os sistemas autónomos de alimentação, que tem como função gerar a sua própria energia, alimentar toda a eletrónica adjacente e ainda recarregar as baterias elétricas. Estes sistemas normalmente são caracterizados por possuírem equipamentos capazes de captar energia, geralmente a partir do sol, vibrações, calor ou frio e permitirem o recarregamento de baterias através dessa energia.



Figura 13 - Esquema de um sistema autónomo

A energia fotovoltaica apresenta-se como sendo a fonte de energia mais promissora na utilização em sistemas autónomos ao ar livre. A facilidade na obtenção da energia fotovoltaica quando comparada com outras fontes energéticas provenientes do ambiente e ainda a densidade energética obtida, conferem aos sistemas autónomos a fiabilidade necessária.

Tabela 3 - Características das diversas fontes de energia proveniente do ambiente [32]

Source	Device Type	
	Source Characteristics	Harvested Power
Photovoltaic		
Indoor	0.1mW/cm ²	10 μW/cm ²
Outdoor	100mW/cm ²	10mW/cm ²
Vibration/motion		
Human	0.5m@1Hz 1m/s ² @50Hz	4 μW/cm ²
Industrial	1m@5Hz 10m/s ² @1kHz	100 μW/cm ²
Thermal Energy		
Human	20mW/cm ²	30μW/cm ²
Industrial	100 mW/cm ²	1-10mW/cm ²
RF		
Cell phone	0.3 μW/cm ²	0.1 μW /cm ²

2.3.1 Exemplos de sistemas autónomos

O avanço da eletrónica proporcionou utilizar sistemas autónomos em diversas áreas e em diversos formatos. Se nos primeiros tempos os produtos apenas focavam a alimentação dos dispositivos, hoje em dia os produtos devem ser o mais eficientes possível e flexíveis, de modo a responder as exigências de mercado.

Neste tópico são apresentadas alguns sistemas autónomos de referência, em diversas áreas.

A Coalesenses, uma empresa de referência alemã, desenvolveu em 2009 o “*iSense Solar Power Harvesting System*” [33], um sistema autónomo, que utiliza a energia solar para alimentar redes de sensores sem fios. A energia absorvida pelo painel fotovoltaico pode ser entregue à bateria, ao sensor ou mesmo aos dois elementos, conseguindo assim um excelente rendimento.

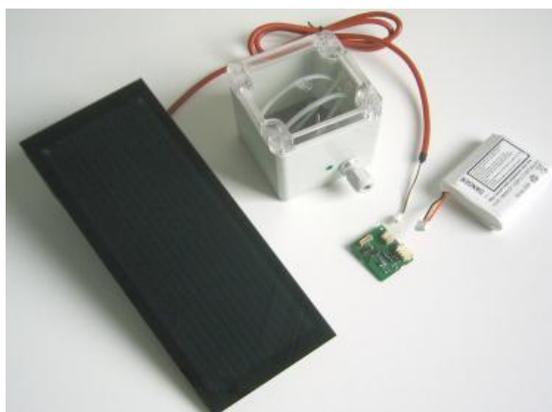


Figura 14 - iSense Solar Power Harvesting System

A Universidade de Michigan tem dado nos últimos anos um grande contributo, no desenvolvimento de sensores utilizando sistemas autónomos em escalas reduzidas.

Em 2010 desenvolveu o “*Millimeter-Scale Nearly Perpetual Sensor System with Stacked Battery and Solar Cells*” [34], um sensor de pressão e temperatura, que é alimentado através de uma bateria de 12 μ Ah da cymbet e duas células fotovoltaicas capazes de gerar 20nA a 1V [35]. O sistema apresenta a desvantagem de operar com a bateria como fonte primária em vez do painel fotovoltaico. A bateria só deveria ser utilizada como auxílio as células fotovoltaicas.

Em 2011 desenvolveu o “*A Cubic-Millimeter Energy-Autonomous Wireless Intraocular Pressure Monitor*” [36], um sensor intraocular com 1.5mm³ de volume. O sensor é colocado na córnea do olho de modo a detetar e quantificar a pressão existente. A utilização de células com uma área de 0.07mm² permite disponibilizar uma potência de 80.6nW e carregar em apenas uma hora e meia a

bateria de $1\mu\text{Ah}$, sempre que o olho esteja exposto a luz solar. As células fotovoltaicas neste sistema apenas servem para carregar a bateria, o que reduz a eficiência energética.

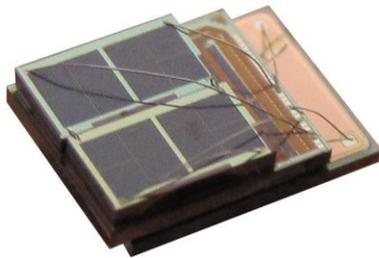


Figura 15 - Millimeter-Scale Nearly Perpetual Sensor System with Stacked Battery and Solar Cells

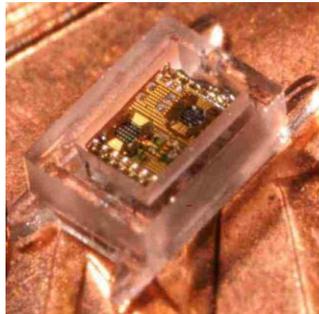
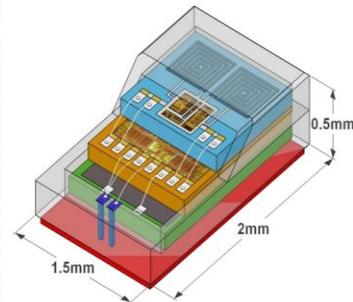


Figura 16 - A Cubic-Millimeter Energy-Autonomous Wireless Intraocular Pressure Monitor



Em 2012 o centro Algoritmi da Universidade do Minho desenvolveu o *“Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos elétricos”* [37], que utiliza a energia fotovoltaica através de um painel de 150mW para carregar uma bateria e alimentar um qualquer sensor. O desenvolvimento do modelo teve em conta a eficiência energética e principalmente a flexibilidade, para poder responder às necessidades das novas aplicações. Apresenta como desvantagens a utilização de um controlo analógico sobre o painel fotovoltaico, não conseguindo assim extrair a máxima potencia incidente neste

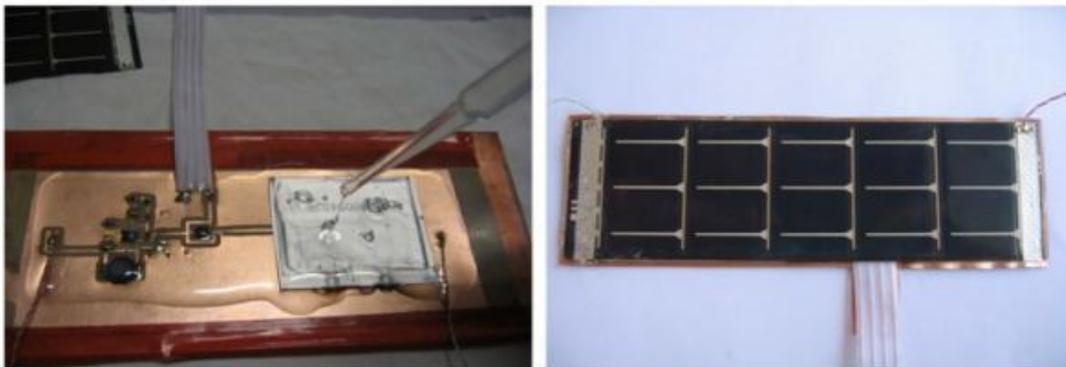


Figura 17 - Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos elétricos

Atualmente algumas empresas de topo no ramo da eletrónica, começaram a desenvolver e comercializar kits de desenvolvimento, que funcionam a partir de energias renováveis. A utilização de kits visa explorar todas as qualidades dos sistemas autónomos e potencializar o seu uso em novas aplicações.

A Silicon Labs em parceria com a sanyo, Infinite Power Solutions e Linear Technology produziram o *“Energy-Harvest-RD”* [38], um kit que combina as qualidades da energia solar com as potencialidades dos processadores e transdutores da Silicon Labs. A energia captada através

dos painéis fotovoltaicos é armazenada numa bateria de $700\mu\text{Ah}$ e disponibilizada a partir desta aos microcontroladores, sensores e transdutores. O modelo precisa apenas de 2h exposto ao sol para carregar a bateria ou 24h exposto à luz elétrica. O carregamento constante da bateria apresenta-se como uma desvantagem, pois a energia proveniente poderia ser entregue diretamente aos dispositivos de forma mais eficiente.

A Texas Instrumentes desenvolveu “*eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting*” [39], em parceria com a Cymbet, um kit que utiliza a energia solar para ajudar a criar uma rede de sensores sem fios baseado no microcontrolador MSP4030. A utilização de um painel fotovoltaico (5,7 cm x 5.7cm) otimizado para ambientes com pouca luz oferece ao sistema, energia suficiente para alimentar todos circuitos. A utilização do EnerChip™ EH CBC5300 [40] como módulo de gestão confere ao sistema uma excelente eficiência, porém a utilização de um MPPT falso confere ao sistema falhas não procura da máxima potência.



Figura 18 - Energy-Harvest-RD

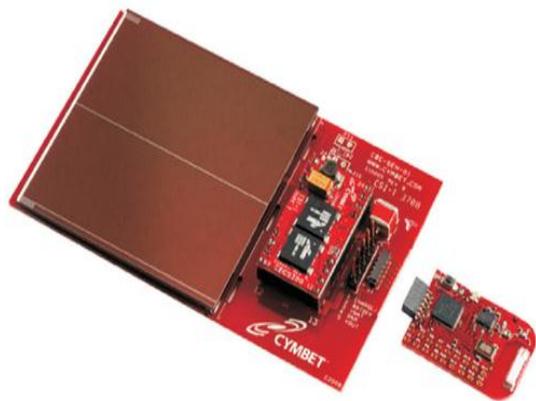


Figura 19 - eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting

Capítulo 3

Conceitos e fundamentos teóricos

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que serviram de base à realização do projeto. A análise é dividida em quatro componentes essenciais, que são as células fotovoltaicas, as baterias, os conversores dc-dc e os MPPT.

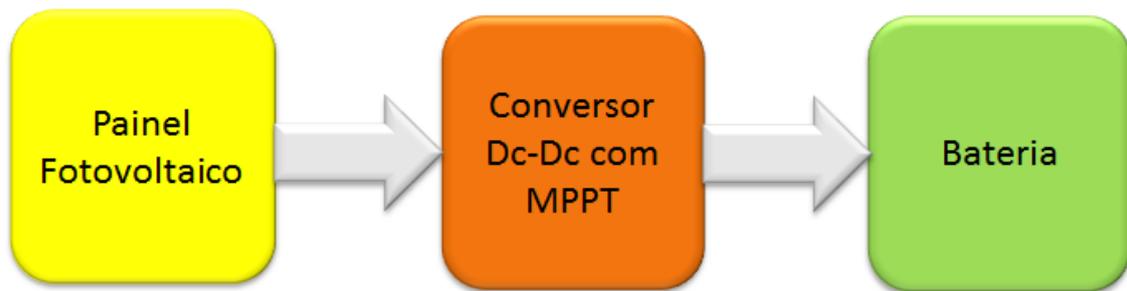


Figura 20 - Diagrama de blocos do carregamento de uma bateria

Nas células fotovoltaicas é feita uma análise funcional e descritiva da conversão de energia através do processo fotovoltaico, recorrendo ao modelo elétrico equivalente.

As baterias de polímero de lítio são descritas segundo a sua constituição, processo de descarga, processo de carga e segurança.

Nos conversores dc-dc são abordados as topologias não isoladas mais usuais, focando principalmente o conversor step up.

Os MPPTS são parte integral dos sistemas fotovoltaicos, pelo que são analisadas e comparadas as topologias mais usuais: a tensão constante, o perturba e observa e a condutância incremental.

3.1 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica converte diretamente a energia solar em energia elétrica, ou seja, quando a radiação solar incide sobre o semicondutor, um fluxo de eletrões será criado, obtendo-se assim uma diferença de potencial entre as duas extremidades do material.

As células são constituídas por materiais semicondutores, geralmente cristalinos que apresentam uma condutividade elétrica intermédia entre um material isolante e condutor. Porém, a sua condutividade pode ser alterada quanto desejável através de métodos de dopagem. A

combinação de vários materiais semicondutores com diferentes tipos de dopagens tem ainda a vantagem de fazer imergir qualidades elétricas, que não eram evidenciadas na utilização de semicondutores em separado.

Atualmente, existem vários semicondutores utilizados em células fotovoltaicas, o silício, o arsenieto de gálio, o telurieto de cádmio, ou disseleneto de cobre e índio. Contudo, o principal elemento na construção das células fotovoltaicas é o silício, devido às suas qualidades e abundância na crosta terrestre. A escolha do semicondutor prende-se essencialmente pelo custo de produção e eficiência desejada.

O silício é caracterizado por conter na sua composição quatro elétrons de valência, passíveis de se ligar aos seus vizinhos, criando assim redes cristalinas. O silício puro no entanto é considerado não condutor porque não existem elétrons livres para se poderem movimentar. A solução encontrada para contornar esta situação passa por injetar ou retirar elétrons do cristal, através da junção com outros elementos, criando assim elétrons livres capazes de se movimentarem [41].

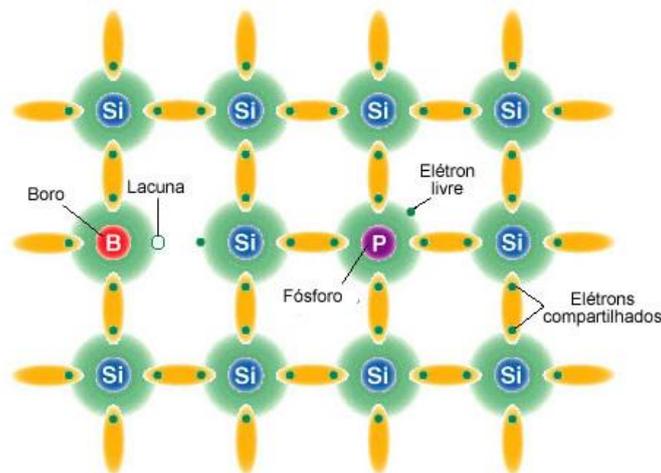


Figura 21 - Dopagem do silício com Boro e Fósforo

Tendo em conta que o silício possui quatro elétrons na última camada, ao injetar átomos com cinco elétrons de ligação, existirá um único elétron que não se conseguirá interligar, obtendo-se assim um excesso de elétrons. Este processo devido à criação de excesso de elétrons é denominado por dopagem do tipo n.

Do mesmo modo que é possível criar um excesso de elétrons, também é possível criar lacunas de elétrons, ou seja, se for introduzido um átomo com apenas três elétrons capazes de se interligar, existirá uma lacuna de elétrons, procedendo-se assim a uma dopagem do tipo p.

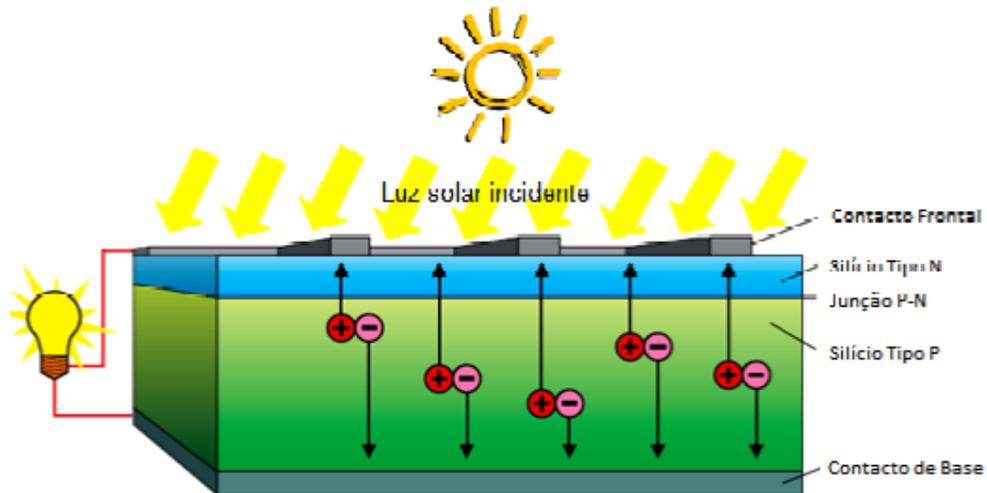


Figura 22 - Esquemático de uma célula fotovoltaica

Considerando então um material semicondutor, com uma junção p-n, sempre que esta esteja exposta à radiação solar ocorrerá uma diferença de potencial entre as suas extremidades n e p provocando uma deslocação do eletrões livres da camada n para a p. A deslocação de eletrões vai criar um acréscimo de eletrões na camada p, o que faz com que esta esteja carregada negativamente e uma redução na camada tipo n, logo torna-a carregada positivamente.

3.1.1 Modelo elétrico da célula fotovoltaica

De modo a perceber, perfeitamente o princípio de funcionamento elétrico da célula é elaborado um circuito equivalente, onde é tido em conta os diversos fenómenos existentes no meio ambiente, como as variações de radiação ou temperatura. Neste modelo é descrito as possíveis fugas devido à composição das células, através das resistências em serie e paralelo [42].

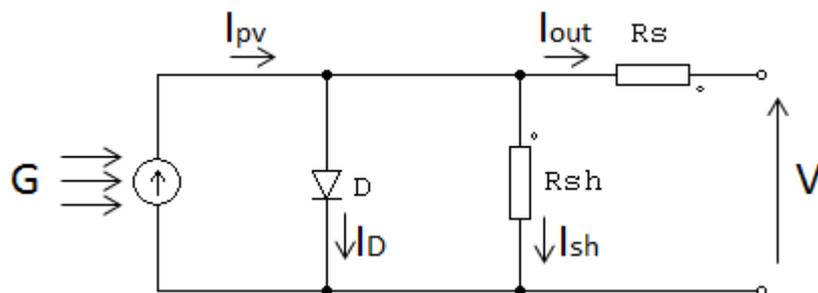


Figura 23 - Circuito equivalente da célula

Efetuada uma análise ao circuito equivalente, é possível descrever as correntes:

$$I_{pv} = I_d + I_{out} + I_{sh} \quad (3.1)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I_{out} * R_s}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

A corrente que atravessa o diodo é descrita na equação 3.3, onde q é a carga do eletrão, n a contante de idealidade do diodo, T a temperatura do diodo, I_0 a corrente inversa máxima de saturação do diodo e K a constante de Boltzmann.

$$I_d = I_0 [e^{\frac{q(V_D)}{n * K * T}} - 1] = I_0 [e^{\frac{q(V + R_s * I_{out})}{n * K * T}} - 1] \quad (3.3)$$

Substituindo as equações (3.2) e (3.3) em (3.1), obtém-se:

$$I_{out} = I_{pv} - I_0 [e^{\frac{q(V + R_s * I_{out})}{n * K * T}} - 1] - \frac{V + R_s I_{out}}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

A corrente fornecida pela célula fotovoltaica varia em função da radiação incidente e da temperatura a que a célula se encontra, onde I_{sh} é a corrente curto-circuito, α_T o coeficiente de temperatura, T a temperatura a que a célula se encontra, T_r a temperatura de referência, S a radiação que incide sobre a célula e S_{ref} radiação de referência [43].

$$I_{pv} = [I_{sc} + \alpha_T (T - T_{ref})] * \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.5)$$

Substituindo (3.5) em (3.4), obtém-se a corrente fornecida pela célula à carga em função da temperatura e radiação incidente.

$$I_{out} = [I_{sc} + \alpha_T (T - T_r)] * \frac{S}{S_{ref}} - I_0 [e^{\frac{q(V + R_s * I_{out})}{n * K * T}} - 1] - \frac{V + R_s I_{out}}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

3.1.2 Curva característica da célula fotovoltaica

A curva característica de uma célula fotovoltaica (I^*V) representa os valores disponíveis de corrente em função da tensão para umas determinadas condições atmosféricas. Uma análise da curva, segundo várias condições atmosféricas permite identificar o impacto real das condições atmosféricas, possibilitando assim perceber a aplicabilidade da célula a uma determinada aplicação.

Idealmente o termo $R_s \cdot I_{out}$ e R_{sh} podem ser desprezados, pois o primeiro termo apresenta valores insignificantes quando comparados com a tensão e a resistência em paralelo é demasiado elevada quando comparada com a resistência em serie[44]. Obtém-se assim o modelo simplificado (Figura 24).

$$I_{out} = [I_{sc} + \alpha_T(T - T_r)] * \frac{S}{S_{ref}} - I_0 [e^{\frac{qV}{n * K * T}} - 1] \tag{3.7}$$

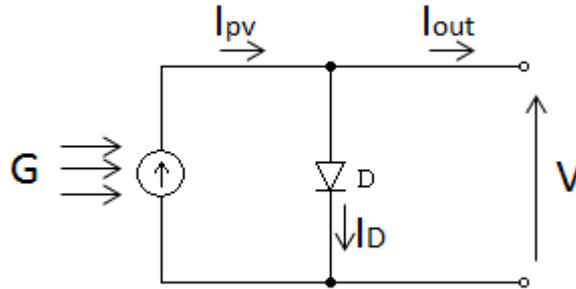


Figura 24 - modelo simplificado da célula fotovoltaica

Sempre que a corrente I_{pv} não exista devido à radiação, a célula comporta-se como um diodo, logo, a sua curva característica é representada pela própria curva do diodo. Quando existe radiação solar, é gerado o efeito fotovoltaico, o que significa que a fonte de corrente gera uma corrente proporcional ao valor da radiação, colocando a curva característica da célula fotovoltaica no terceiro e quarto quadrante. Porém, geralmente para melhor compreensão a curva característica apenas é apresentada segundo o quadrante em que é gerada corrente (4º quadrante) e refletida segundo o eixo da tensão[45][46].

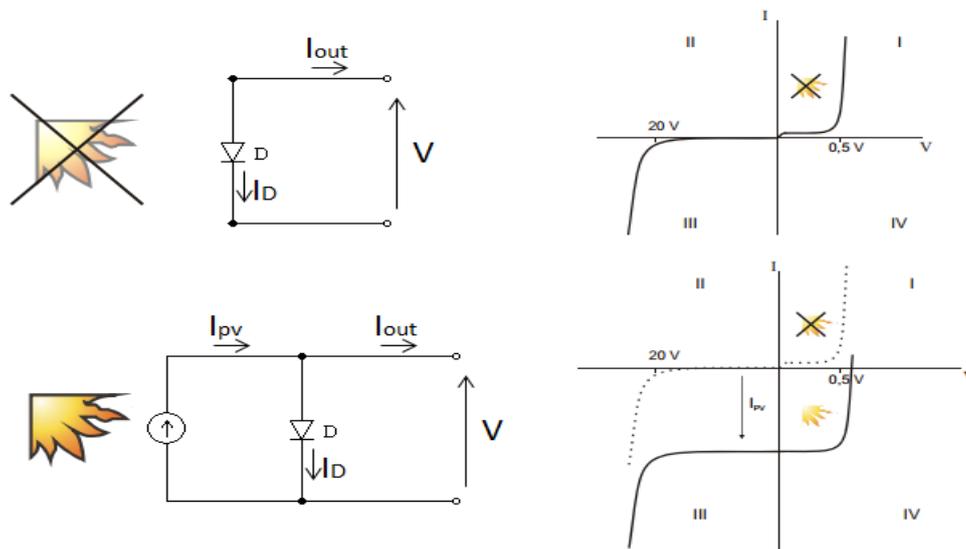


Figura 25 - Circuito equivalente e comportamento das curvas características

Na prática a curva característica pode ser determinada segundo a variação da impedância aos terminais da célula para umas determinadas condições atmosféricas. A corrente vai evoluir de um valor máximo (curto circuito) até um valor nulo (circuito em aberto). O mesmo vai acontecer com a tensão, mas em sentido inverso. Consoante as variações de tensão e corrente, a potência disponibilizada também irá variar de um valor nulo (curto circuito), passando por um máximo e terminando novamente em zero, (circuito aberto) como é demonstrado na Figura 26.

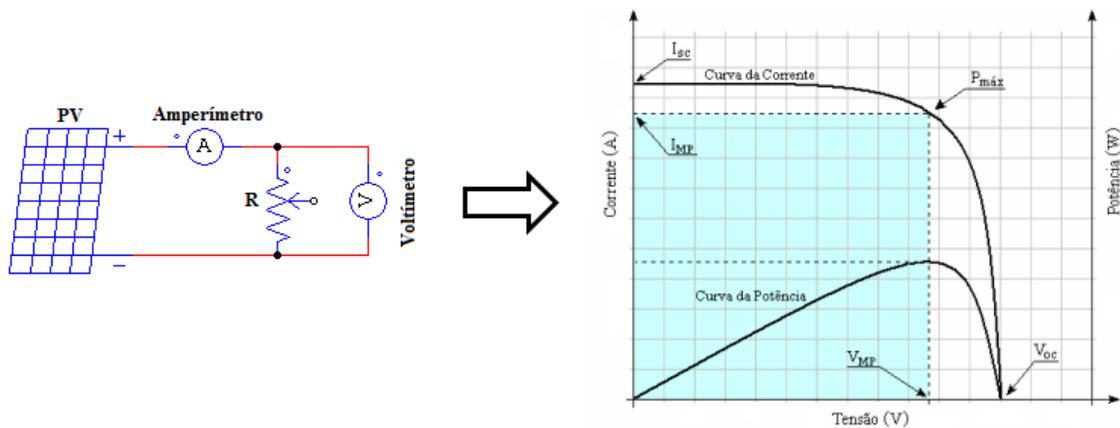


Figura 26 - Caracterização da célula fotovoltaica

3.1.3 Rendimento da célula fotovoltaica

O maior obstáculo à crescente utilização das células fotovoltaicas prende-se com a relação custo-eficiência das células existentes no mercado.

O rendimento de uma célula pode ser definido através do quociente entre a potência de saída e a potência de entrada, sendo que a potência de entrada é descrita como a intensidade luminosa incidente na célula. O seu rendimento é afetado sobretudo pela temperatura a que a célula se encontra e pelo coeficiente de absorção do material semicondutor utilizado na fabricação da célula [47].

$$\eta(\%) = \frac{P_o}{P_i} * 100 \tag{3.8}$$

3.1.4 Temperatura

Alguma parte da energia incidente numa célula fotovoltaica é desperdiçada sobre a forma de calor, pois os materiais utilizados na composição das células tendem a reduzir a sua eficiência com

o aumento da temperatura. O aumento da temperatura provoca efeitos contrários na tensão e corrente, conseguindo assim, um aumento de corrente (equação 3.9) e uma redução significativa da tensão, (equação 3.10) o que provoca uma redução da potência disponível.

Na maioria das células de silício cristalino, o aumento da temperatura traduz-se em uma perda de rendimento na ordem dos 0.5%/°C e 0.25%/°C para as células de silício amorfo [48].

Na Figura 27 é perceptível a variação da corrente e tensão consoante o aumento da temperatura.

$$I(T) = I(T_{ref}) + k_i(T - T_{ref}) \tag{3.9}$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_{ref}) + k_v(T - T_{ref}) \tag{3.10}$$

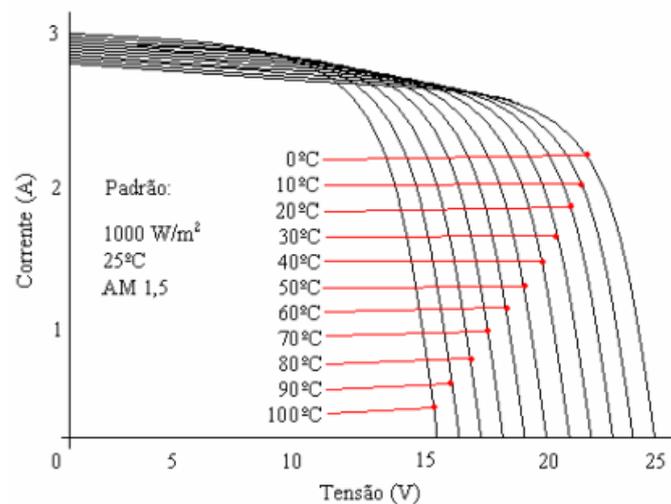


Figura 27 - Variação da tensão e corrente consoante o aumento da temperatura

3.1.5 Radiação solar

A radiação solar é descrita como sendo a energia emitida por um feixe de luz em uma determinada direção [49]. À semelhança da temperatura a radiação solar também provoca uma variação da tensão e corrente gerada pela célula. Porém, o aumento da radiação provoca um aumento de corrente e redução da tensão, o que provoca um aumento bastante significativo da potência [50]. Na Figura 28 é ilustrado a variação de corrente e tensão para várias intensidades luminosas.

$$I(T) = I_{Lref}(T) * \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.11)$$

$$V_{oc}(T) = V_{ocref}(T) + V_t * \ln\left(\frac{S}{S_{ref}}\right) \quad (3.12)$$

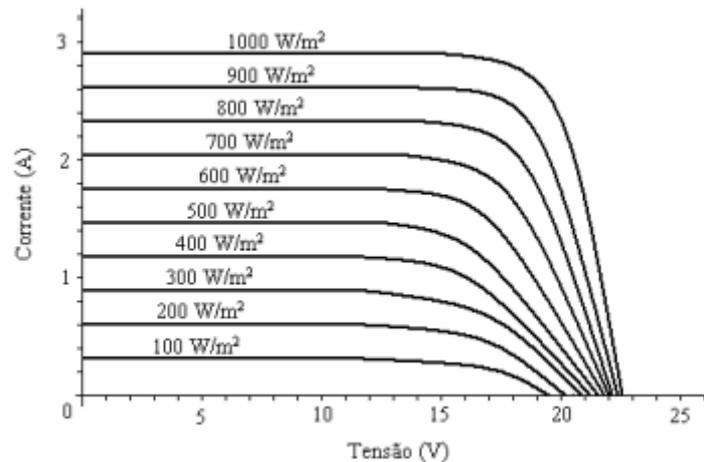


Figura 28 - Variação da tensão e corrente consoante o aumento da radiação solar

3.1.6 Coeficiente de absorção

Os materiais semicondutores utilizados são caracterizados por conseguirem absorver determinados comprimentos de onda de luz solar, o que significa que grande parte da luz solar incidente sobre uma célula fotovoltaica é desperdiçada, por esta não ter apetência para absorver vários comprimentos de onda. Logo, é necessário que os materiais utilizados possuam bons níveis de absorção para que consigam usufruir o máximo da energia incidente [51].

3.1.7 Associação em série e Paralelo

Nem sempre as células fotovoltaicas conseguem alimentar determinadas aplicações, por não fornecerem tensões ou correntes suficientes, pelo que se torna necessário fazer associações em série ou paralelo das células. Quando se pretende um acréscimo de corrente procede-se a uma associação em paralelo, ou em série quando se pretende aumentar a tensão disponível. Para elaborar associações convém que as células sejam o mais idênticas possível, salvo algumas variações devido ao processo de fabricação, para que, se possa tornar a associação o mais eficaz possível.

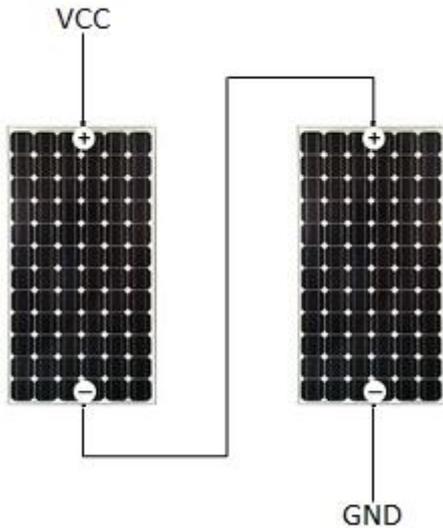


Figura 29 - Associação em série

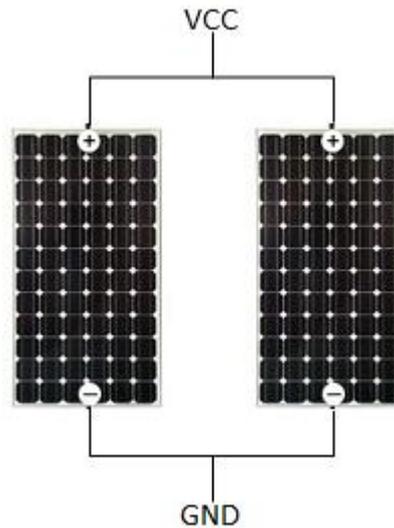


Figura 30 - Associação em paralelo

Na associação em série as células serão percorridas pela mesma corrente, mas a tensão aos terminais do circuito será a soma da tensão de cada célula. Pelo contrário, na associação em paralelo as células estão submetidas à mesma tensão e a corrente fornecida pela associação será a somatório das correntes de todas as células fotovoltaicas.

3.2 Baterias de polímero de lítio

Uma bateria é um dispositivo armazenador de energia que é capaz de converter energia química em energia elétrica, através de reações químicas no seu interior. Quando é feita a conversão de energia química em energia elétrica sob a forma de corrente, dá-se o processo de descarga e o contrário é designado por processo de carga.

A bateria é constituída por dois elétrodos, o ânodo (terminal negativo) e o cátodo (terminal positivo) e um eletrólito que pode ser líquido ou sólido (Figura 31)[52]. Sendo maioritariamente compostas por um dielétrico de polímero que apresenta boas características para a condução de iões, um ânodo de carbono ou grafite, e um cátodo de cobalto ou manganês.

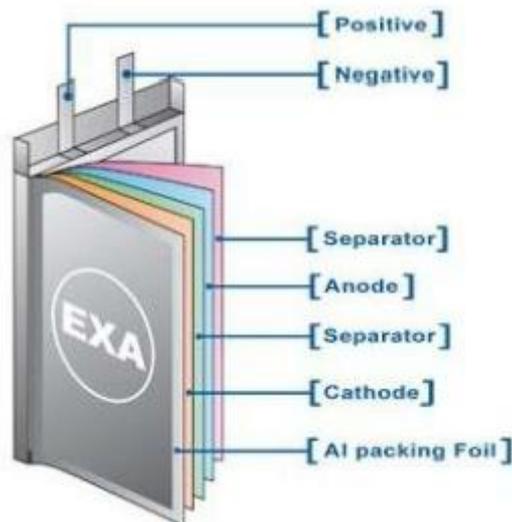


Figura 31 - Esquemático de uma bateria de Polímero de lítio

As células² de polímero de lítio são caracterizadas por possuírem uma tensão nominal de 3,7V e por poderem operar com tensões mínimas de 3V ou máximas de 4,2V sem que as baterias se danifiquem. Atualmente as baterias de polímero de lítio apresentam capacidades entre os 100mAh e 8Ah, o que possibilita a utilização destas baterias em diversas áreas.

3.2.1 Processo de carga e descarga

O processo de descarga é feito através da conexão dos terminais da bateria a uma determinada carga, fazendo com que a bateria produza uma corrente através dos processos de oxidação-redução [53]. Durante o processo químico os elétrões vão fluir do ânodo para o cátodo através da carga, e os iões resultantes do processo, também se dirigirão para o cátodo mas através do eletrólito. No caso da bateria, o redutor será o ânodo (fornece elétrões) e o oxidante o cátodo (recebe elétrões) [54].

O carregamento da bateria é feito através da aplicação aos seus terminais, de uma diferença de potencial superior à da bateria. Porém, a simples aplicação de uma diferença de potencial pode provocar danos devido ao aumento de temperatura, logo é necessário implementar processos de carga minuciosos que possibilitem carregar a bateria o mais eficiente possível de modo a estimar a sua vida útil [54]. Na Figura 32 é ilustrado o processo de carga.

² Enquanto o termo bateria é usado frequentemente, o processo eletroquímico refere-se a uma célula. A bateria consiste em uma ou mais células, conectadas em série ou paralelo, ou ambas, dependendo da tensão ou capacidade desejada. (Fonte: David Linden "Handbook of Batteries")

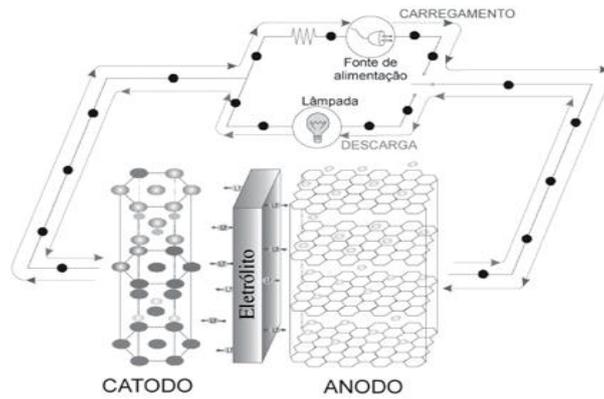


Figura 32 - Efeito de carga e descarga da bateria

3.2.2 Método de carga de uma bateria

O processo de carga de uma bateria não se afigura fácil, devido a alguns fatores, nomeadamente a temperatura e os limites de tensão e corrente. A implementação do carregador deve ter em conta as necessidades da bateria, de modo a limitar efeitos indesejados, como sobrecargas.

Atualmente existem diversos métodos de carga, sendo os mais usuais, a corrente constante, a tensão constante ou o misto de tensão e corrente [55], porém nem todos são adequados a determinadas baterias, pelo que o método de carga deve ser definido pelo fabricante.

Nas baterias de polímero de lítio é aconselhado a utilização do método de carga misto, em que devem existir excelentes níveis de controlo, para que nunca sejam ultrapassados os seus limites [27].

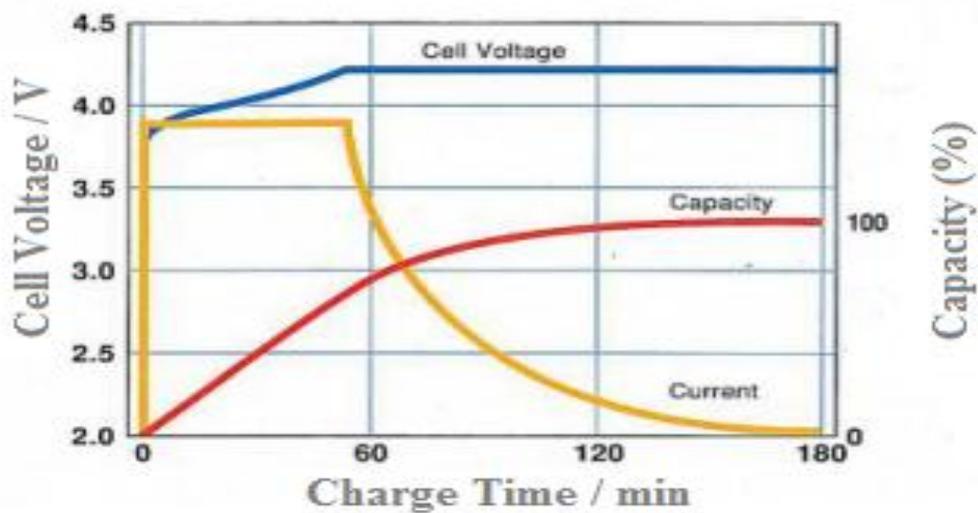


Figura 33 - Método de carga misto de tensão e corrente

O método consiste em aplicar um misto de corrente e tensão constante à bateria. Numa primeira fase é aplicada uma corrente constante elevada (máximo 1°C) para que possa permitir a carga rápida da bateria até um determinado valor de tensão estipulado pelo fabricante, de modo a não danificar a bateria. Normalmente atingido o valor de tensão, significa que a bateria se encontra 80% carregada. A segunda fase é descrita por tensão constante, que consiste em aplicar uma tensão constante aos terminais da bateria até que a corrente de carga diminua até um valor mínimo. Concluída a segunda fase a bateria de polímero de lítio encontra-se plenamente carregada.

3.2.3 Proteção das baterias

A utilização de baterias de lítio requer algumas medidas de segurança, de modo a prevenir eventuais danos na bateria, que poderiam provocar a redução da sua vida útil ou mesmo a sua destruição [25]. Assim sendo devem ser equacionados elementos de proteção que possam impedir fenómenos de subtensão (perda de capacidade), sobretensão (deterioramento da bateria), sobrecorrente (aquecimento), curto-circuito (aquecimento elevado e possível explosão), aumentos de temperatura elevados (deterioramento da bateria).

3.2.4 Baterias de estado sólido

As baterias de estado líquido são caracterizadas por utilizarem um dielétrico constituído por um ácido, uma solução alcalina ou um solvente orgânico em estado líquido. Esta característica obriga a incorporação de um encapsulamento forte, como garantia de segurança e estabilidade, obtendo-se assim um aumento de peso e tamanho [54]. O que se traduz essencialmente numa redução de densidade energética por unidade de comprimento.

A utilização de dielétricos de estado sólido tem como principal objetivo, garantir uma maior segurança, pois são utilizados materiais não inflamáveis e que não permitem fugas [56]. A obtenção de segurança à custa da utilização de novos materiais permite também obter maiores densidades energéticas por tamanho e peso, devido à redução significativa de encapsulamento.

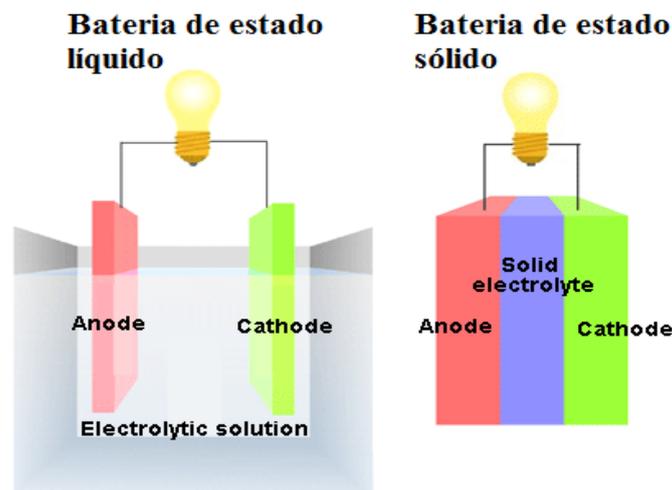


Figura 34 - Baterias de estado líquido e sólido

Apesar de esta tecnologia ser recente, as suas vantagens já são notórias no que diz respeito à segurança e tamanho, por isso a curto prazo espera-se que estas baterias marquem a diferença e suplantem outras tecnologias.

3.3 Conversores DC-DC

Os conversores dc-dc são dispositivos eletrónicos capazes de adequar as características de uma determinada fonte às características da carga. Geralmente os circuitos transformam os níveis de tensão ou corrente presente à entrada do conversor para outros níveis desejados pela carga. Os conversores estão amplamente difundidos em fontes dc, motores dc ou geração de energia elétrica através de sistemas de microprodução, entre outros.

Conforme foi visto anteriormente, os painéis fotovoltaicos são caracterizados pela sua instabilidade, relativamente a tensões e correntes geradas, logo a utilização de um conversores dc-dc como elemento de interligação entre os painéis fotovoltaicos e a carga visa proporcionar estabilidade necessária à carga. Os conversores possuem assim duas funções essenciais na interligação de painéis fotovoltaicos com cargas, que são elas: possibilitar o ajuste da tensão à carga e forçar os painéis a trabalhar no seu ponto de máxima potência.

A constituição dos conversores incorpora vários componentes, como transístores, bobines ou condensadores, que possibilitam assim o ajuste da tensão de saída. Consoante o valor de tensão pretendido é feito um ajuste dos tempos de ligação entre a fonte e a carga através da comutação do transístor.

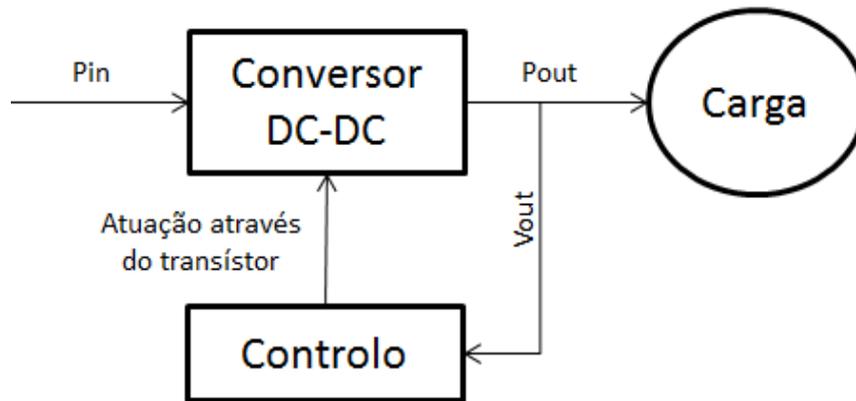


Figura 35 - Diagrama de blocos da atuação do conversor

Atualmente os conversores podem ser divididos em dois grupos, os isolados e não isolados. Entende-se por isolamento, todo e qualquer dispositivo que consiga isolar eletricamente a entrada do conversor da saída deste. Geralmente o isolamento é obtido através da utilização de transformadores, porém, a utilização proporciona menores eficiências, devido às perdas no ferro do transformador.

As principais topologias não isoladas são os conversores Step up, Step down, Step up-down, Cúk, Sepic e Zeta. Relativamente às isoladas, as mais convencionais são o Forward, Flyback, Push Pull, Half-Bridge e Full-Bridge [57].

De uma forma geral os conversores obtêm funções diferentes consoante a disposição dos componentes.

Neste capítulo será dada uma visão geral sobre as topologias não isoladas elevadoras, efetuando apenas uma análise detalhada ao conversor step up (painel fotovoltaico com tensão nominal de 3V e bateria com 3,7V) por ser o que mais satisfaz o projeto pela sua simplicidade e eficiência.

Nas análises efetuadas utilizou-se um filtro capacitivo à saída do conversor, de modo a estabilizar a tensão de saída e ainda foi considerado a idealização dos componentes (resposta imediata dos elementos de comutação).

3.3.1 Conversor Step Up

O conversor step up tem como objetivo converter uma tensão contínua, noutra tensão contínua de valor igual ou superior. O conversor apresenta uma topologia básica (Figura 36) qua assenta no

uso de um elemento comutador (transistor, mosfet ou IGBT), uma bobine e um condensador para armazenarem energia e ainda um diodo de bloqueio.

O controlo é efetuado através de um sinal pulsado (PWM) aplicado ao interruptor, que vai gerir o tempo em que a fonte fornece energia à carga.

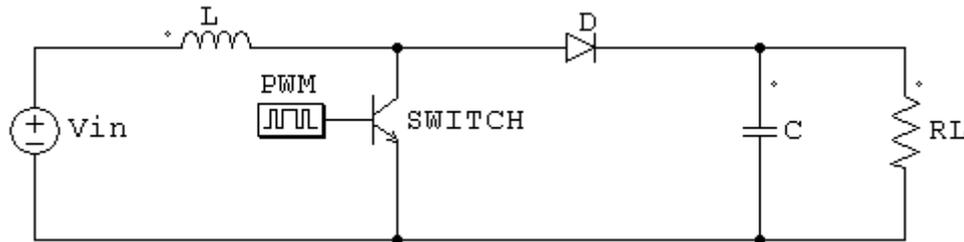


Figura 36 - Conversor Step Up

Como é perceptível na Figura 36, o conversor vai se comportar de dois modos diferentes consoante a atuação do elemento de comutação. Logo, sempre que este esteja ativo (ton), a energia fornecida pela carga é armazenada na bobine, passando a carga a ser alimentada pelo condensador, devido à polarização inversa do diodo. No estado desativo (toff), a energia armazenada na bobine é transferida para a carga e para o condensador permitindo assim o carregamento deste. Todo este processo acontece devido a polarização direta do diodo, que vai permitir a passagem de corrente por este [58].

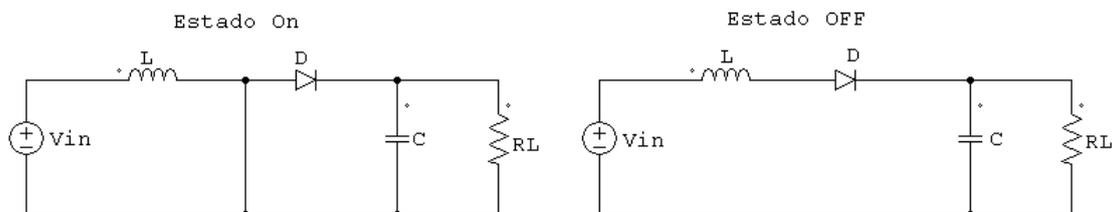


Figura 37 - Estados do conversor Step up

O processo pode ser definido segundo dois modos, dependendo do valor de corrente presente na bobine, ou seja, a condução contínua em que o seu valor nunca se anula ou condução descontínua em que existem períodos de tempo em que a corrente é nula.

3.3.1.1 Modo de condução contínua

No modo de condução contínua, a corrente que flui pela bobine nunca se anula, proporcionando assim um contínuo fornecimento de energia como é demonstrado na Figura 38 [58].

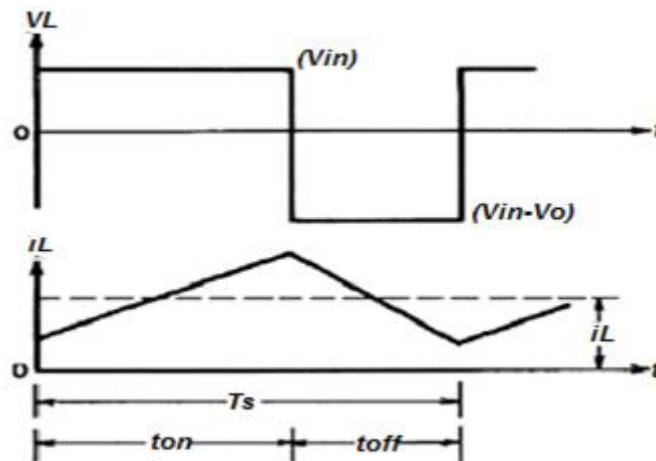


Figura 38 - Tensão e Corrente na bobine

Assim sendo, pela análise da Figura 37 e gráficos da Figura 38 é possível definir o efeito que os tempos de comutação vão ter na bobine.

Estado ON $V_L = V_{in}$ (3.13)

Estado OFF $V_L = V_{in} - V_o$ (3.14)

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (3.15)$$

$$V_L * t_{on} + V_L * t_{off} = 0 \quad (3.16)$$

Substituindo as equações obtidas anteriormente (3.13) e (3.14) na equação (3.16), obtém-se:

$$V_{in} * t_{on} - (V_o - V_{in}) * t_{off} = 0 \quad (3.17)$$

Sabendo que o T_s é a soma dos tempos de comutação de um determinado elemento de comutação, os seus tempos podem ser definidos em função do duty cycle³:

³ Razão entre o tempo ativo e tempo total

$$t_{on} = D \quad (3.18)$$

$$t_{off} = 1 - D \quad (3.19)$$

Substituindo as equações obtidas anteriormente (3.18) e (3.19) na equação (3.17), obtém-se:

$$V_{in} * D - (V_o - V_{in}) * (1 - D) = 0 \quad (3.20)$$

A saída pode então ser relacionada com a entrada através de:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.21)$$

Através da idealização do conversor pode-se dizer que a potência de entrada é igual à potência de saída.

$$P_i = P_o \Leftrightarrow V_{in} * I_{in} = V_o * I_o \quad (3.22)$$

Substituindo a equação (3.21) na equação (3.22) obtém-se a relação entre a corrente de entrada e saída:

$$\frac{I_o}{I_{in}} = 1 - D \quad (3.23)$$

3.3.1.2 Limiar de condução contínua e descontínua

O limiar da condução contínua, acontece quando a corrente na bobine atinge o valor nulo no instante em que é feita a alteração da comutação, como é demonstrado na Figura 39.

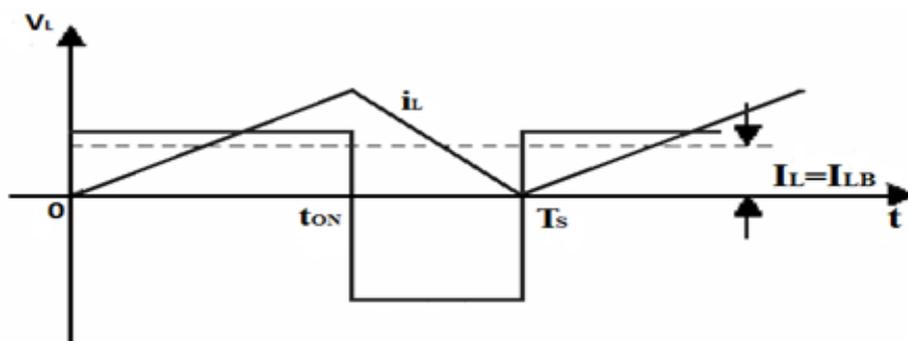


Figura 39 - Formas de onda do conversor no limiar de condução contínua

Assim o valor médio da corrente na bobine no limiar da condução contínua é dado por:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L, \max} = \frac{1}{2} * \frac{V_{in}}{L} * t_{on} \quad (3.24)$$

Substituindo a equação (3.18) e (3.21) na equação (3.24) obtêm-se:

$$I_{LB} = T_s * \frac{V_o}{2L} * D(1-D) \quad (3.25)$$

Utilizando a expressão (3.25) obtêm-se a corrente média de saída:

$$I_{OB} = T_s * \frac{V_o}{2L} * D(1-D)^2 \quad (3.26)$$

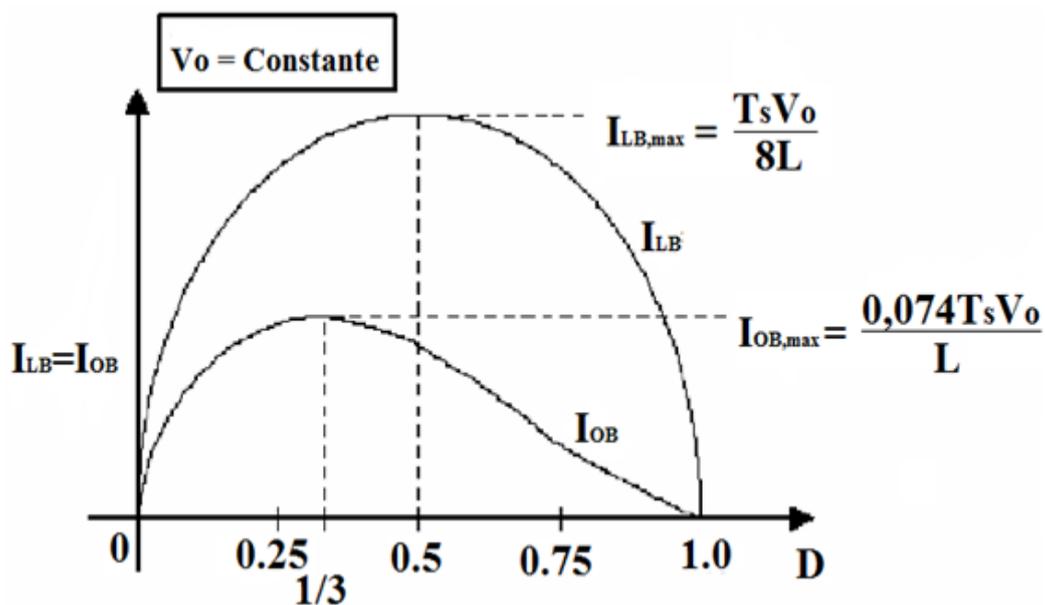


Figura 40 - Formas de onda de I_{ob} e I_{lb} para V_o constante

A Figura 40 apresenta os diversos valores que I_{OB} e I_{LB} tomam, quando o duty-cycle se altera, permanecendo a tensão de saída constante.

Analisando o gráfico é possível identificar os valores máximos de I_{LB} e I_{OB}

- $I_{LB\text{máx}}$ quando $D=0,5$:

$$I_{LB\text{máx}} = V_o * \frac{T_s}{8L} \quad (3.27)$$

- $I_{OB\text{máx}}$ quando $D=1/3$:

$$I_{OBm\acute{a}x} = \frac{2}{27} * \frac{V_o * T_s}{L} = 0,074 * \frac{V_o * T_s}{L} \quad (3.28)$$

Expressando I_{LB} e I_{OB} em função dos seus máximos, obtêm-se:

$$I_{LB} = 4D(1-D)I_{LBm\acute{a}x} \quad (3.29)$$

$$I_{OB} = \frac{27}{4} D(1-D)^2 * I_{OBm\acute{a}x} \quad (3.30)$$

3.3.1.3 Modo de condução descontínua

A condução descontínua é o segundo modo, em que um conversor pode operar e acontece sempre que a corrente na bobine se anule durante um período de tempo ($\Delta_2 T_s$) como é demonstrado na Figura 41.

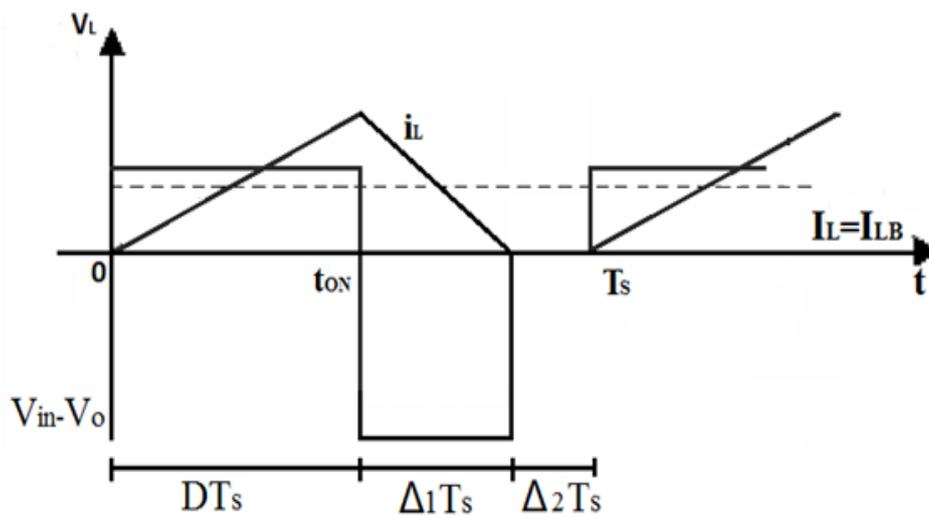


Figura 41 - Formas de onda do conversor no modo descontínuo

Por análise do gráfico da Figura 41 é possível definir as equações de tempo em ON, OFF e do período em que a corrente é nula.

$$t_{on} = D * T_s \quad (3.31)$$

$$t_{off} = \Delta_1 * T_s \quad (3.32)$$

$$\Delta_2 * T_s = T_s - t_{on} - t_{off} \quad (3.33)$$

Então atenção na bobine passa a ser dada por:

$$V_{in} * D * T_s + (V_{in} - V_o) * \Delta_1 * T_s = 0 \quad (3.34)$$

A saída pode então ser relacionada com a entrada através de:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (3.35)$$

Por analogia as potências de entrada e saída obtêm-se:

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad (3.36)$$

As correntes médias de entrada e saída são dadas então por:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{2L} * D * T_s * (D + \Delta_1) \quad (3.37)$$

$$I_o = \frac{T_s * V_{in}}{2L} * D * \Delta_1 \quad (3.38)$$

Substituindo as equações (3.28), (3.35) em e (3.38) obtêm-se a função de duty cycle.

$$D = \sqrt{\frac{4}{27} * \frac{V_o}{V_{in}} * \left(\frac{V_o}{V_{in}} - 1\right) * \frac{I_o}{I_{OB\text{ máx}}}} \quad (3.39)$$

3.3.1.4 Ripple da tensão de saída

O ripple da tensão de saída pode ser calculado com base nas formas de onda do gráfico da Figura 42 para o modo de condução contínuo.

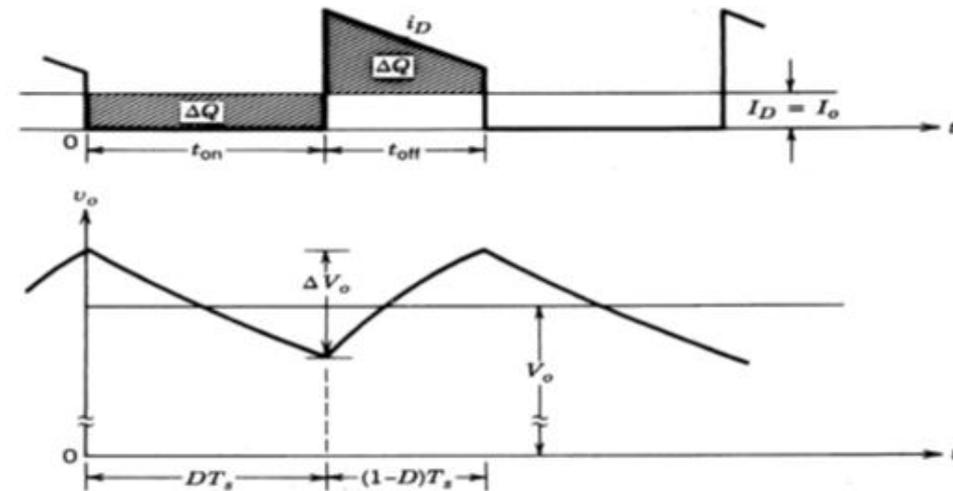


Figura 42 - Ripple da tensão de saída do conversor

Observando o gráfico pode-se então definir o ripple da tensão de saída como:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o * D * T_s}{C} = \frac{V_o}{R} * \frac{DT_s}{C} \quad (3.40)$$

Através da equação (3.40) é possível calcular a variação da tensão de saída.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT_s}{RC} \quad (3.41)$$

A partir da equação (3.40) é também possível determinar o valor do condensador tendo em conta o ripple.

$$C \geq \frac{DT_s V_o}{R \Delta V_o} \quad (3.42)$$

3.3.1.5 Indutância crítica

Na perspetiva de um funcionamento em modo contínuo, é possível dimensionar o conversor para correntes de carga superiores, entre 5 à 20% do valor máximo da corrente de carga. Através destes dados é possível identificar o valor mínimo da indutância para que o conversor funcione em regime contínuo.

$$L_{\min} \geq \frac{V_o * T_s}{16 * I_{ocrit}} \quad (3.43)$$

3.3.2 Conversores elevadores-abaixadores

Atualmente existem vários conversores, que possibilitam elevar ou baixar a tensão, utilizando um único circuito. Estes conversores são utilizados quando se pretende ter tensões superiores na saída num determinado momento e inferiores em outro. Os conversores step up-down, cuk, sepic ou zeta são alguns exemplos de conversores que conseguem elevar e reduzir a tensão. Estes conversores são muito semelhantes entre si, distinguem-se apenas uns dos outros, através da disposição dos componentes ou possibilidade de inversão do sinal de entrada.

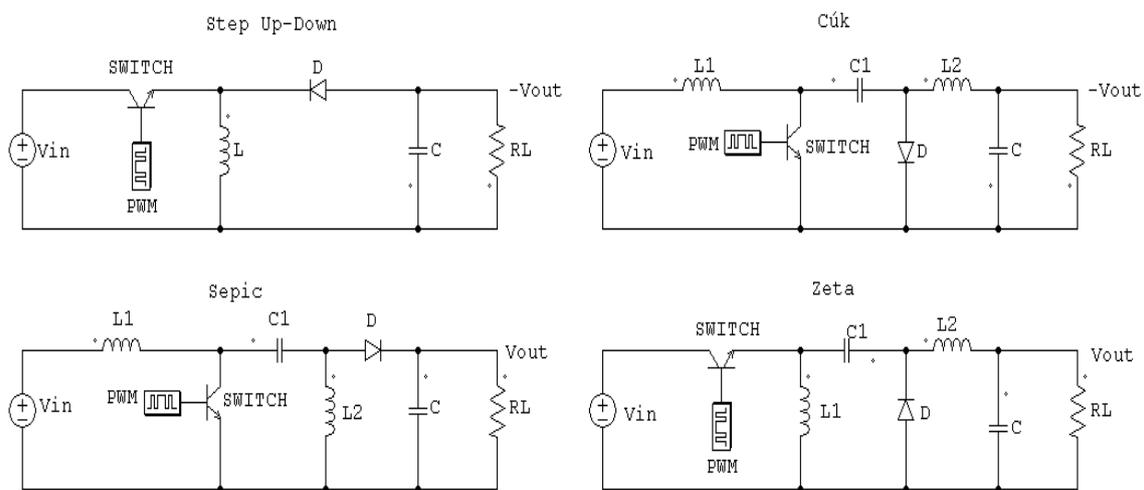


Figura 43 - topologias elevadoras-abaixadoras

A topologia step up-down é a mais utilizada devido à sua simplicidade, pois apenas necessita dos mesmos componentes que as topologias step up e step down. Porém, a disposição dos componentes impõe que o transístor suporte uma tensão elevada (tensão de entrada + tensão de saída) o que representa uma grande quebra de eficiência. Nesta topologia a tensão de saída é disponibilizada em sentido inverso à tensão de entrada.

O conversor cúk utiliza um condensador para efetuar a troca de energia entre a fonte e a carga e apresenta a tensão de saída com polaridade inversa à tensão de entrada. A utilização de duas bobines, tem o efeito de amenizar os picos de corrente, conseguindo assim linearizar a corrente tanto à saída como à entrada [59]. Comparativamente ao step up, o conversor cúk apresenta melhor eficiência devido as menores perdas de comutação.

O conversor sepic apresenta uma estrutura muito semelhante ao cuk, utilizando também o condensador para transferir a energia proveniente da fonte para a carga, porém, apresenta uma corrente de saída pulsada. O conversor pode servir para implementar métodos de carregamento de

baterias através de correntes pulsadas. O sepic deve utilizar um interruptor que consiga suportar uma tensão elevada (tensão de entrada + tensão de saída), a semelhança do que acontece com o step up-down.

O conversor zeta à semelhança do que acontece com o step up-down utiliza uma corrente contínua à saída e uma corrente descontínua à entrada, porém apresenta uma tensão de saída não inversora. A utilização do transistor em série permite precaver o circuito de sobrecorrentes, no entanto deve suportar também tensões elevadas (tensão de entrada + tensão de saída).

3.4 MPPT

Os painéis fotovoltaicos conforme foi ilustrado anteriormente, apresentam curvas características não lineares, pelo que, existe a necessidade de desenvolver controladores capazes de forçar os painéis fotovoltaicos a trabalhar no seu ponto de máxima potência. O ponto de máxima potência de um painel é descrito como o ponto onde a tensão e corrente fornecida por estes gera a maior potência, como é perceptível na Figura 44.

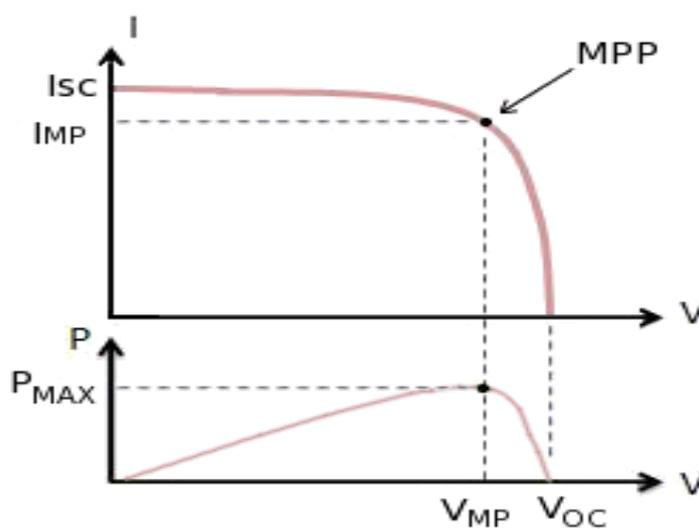


Figura 44 - Obtenção do ponto de máxima potência

O MPPT “Maximum power point Tracking” são controladores desenvolvidos com o intuito de aumentar a eficiência do sistema, forçando o painel a trabalhar sempre no ponto de máxima potência. Os controladores são constituídos por conversores dc-dc controlados através de algoritmos de procura e obtenção da máxima potência.

3.4.1 Tipos de algoritmo

Com o desenvolvimento da tecnologia dos painéis fotovoltaicos, surgiram também novos controladores MPPT cada vez melhores em termos de eficiência e consumo.

Atualmente a tecnologia de MPPT, já se encontra bastante desenvolvida, sendo que as técnicas mais usuais são a tensão constante, perturba e observa e condutância incremental. Todas estas técnicas apresentam as suas vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação. Logo a escolha do método e em particular o algoritmo deve ter em conta a complexidade de implementação, eficiência e custos.

3.4.2 Tensão constante

O método de tensão constante apresenta-se como sendo dos métodos dinâmicos mais simples de implementar. Todo o processo consiste na relação existente entre a tensão em circuito aberto e a tensão de máxima potência que geralmente se encontra entre 0,75 e 0,8.

$$V_{MPP} = k * V_{oc} \quad (3.44)$$

A necessidade de obter a tensão em circuito aberto, faz com que o sistema necessite de elementos capazes de desconectar o conversor do painel fotovoltaico, o que se traduz numa perda de energia durante o período de leitura. O erro, em regime permanente, induzido pela utilização da constante de idealidade traduz-se na principal desvantagem da utilização do método.

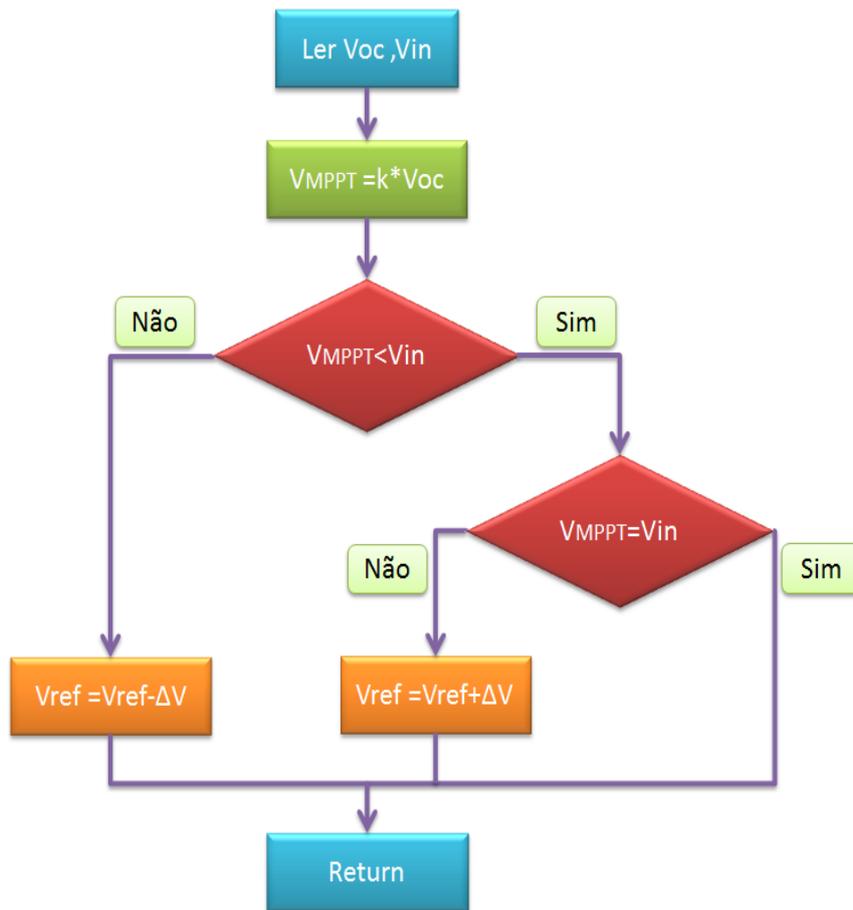


Figura 45 - Algoritmo Tensão Constante

3.4.3 Perturba e observa

O Perturba e observa é dos métodos mais usuais atualmente, devido à sua simplicidade de implementação e à procura constante do ponto máximo de potência.

O algoritmo consiste na introdução constante de perturbações no sistema e verificação da potência após as referidas perturbações. Ao introduzir uma perturbação da tensão ou corrente numa determinada direção, o sistema irá produzir uma alteração na potência disponibilizada pelo painel fotovoltaico. Caso esta nova potência seja superior à anterior, então a perturbação seguinte deve seguir a mesma direção, caso isto não se verifique, a perturbação deverá ser feita na direção contrária.

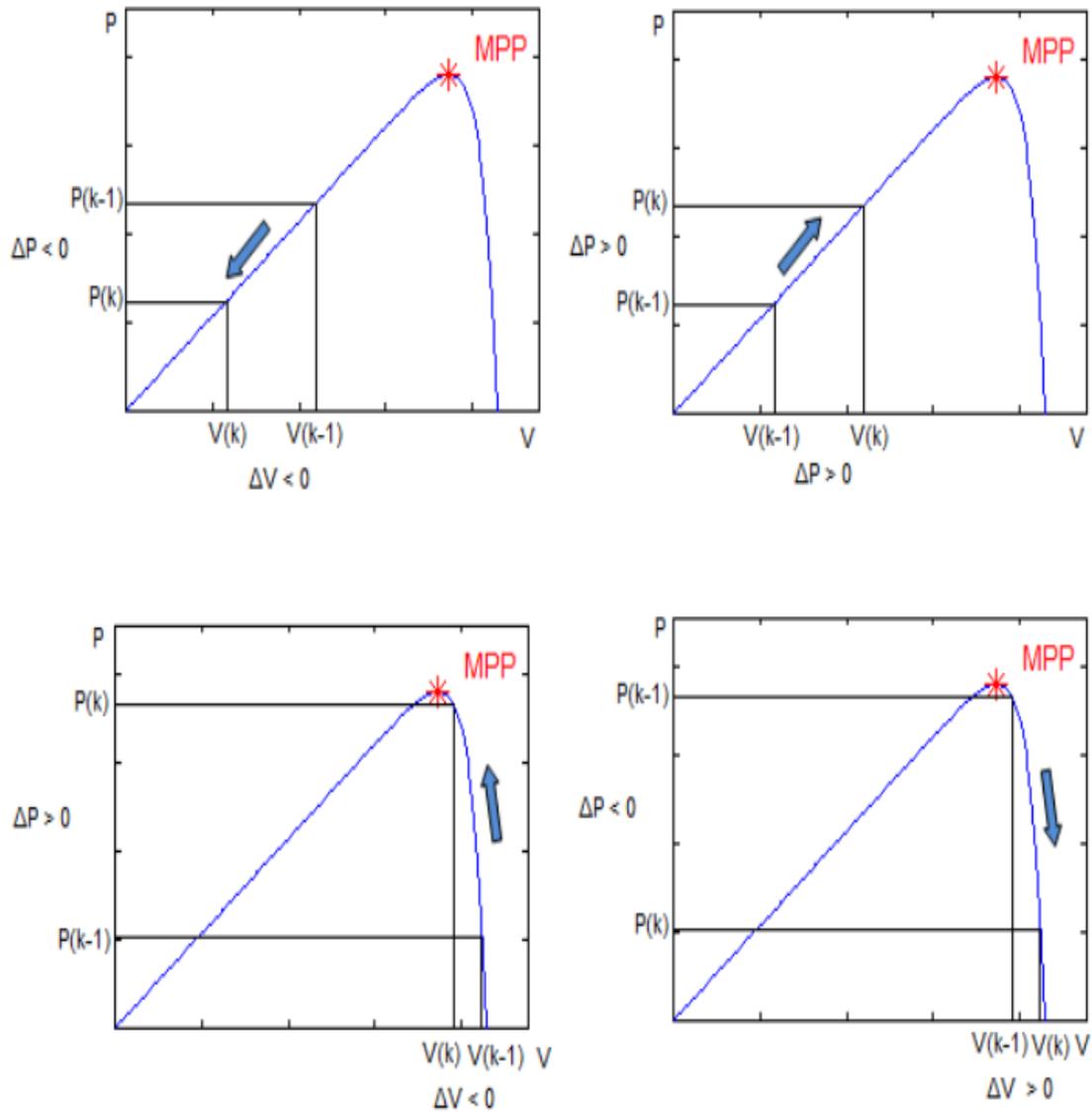


Figura 46 - Direções possíveis de obtenção do MPP através do P&O

Este método apresenta o aumento de eficiência quando comparado com a tensão constante, porém apresenta ainda algumas desvantagens no que diz respeito à velocidade de processamento e procura do ponto de máxima potência. Sempre que existam variações rápidas das condições climáticas, o presente algoritmo pode levar um tempo considerável até encontrar um novo ponto máximo. A maior perda de eficiência que o algoritmo obtém, deve-se essencialmente à procura constante do ponto de máxima potência, pois o algoritmo faz com que o sistema esteja sempre a oscilar em torno do ponto de máxima potência, em vez de se fixar neste.

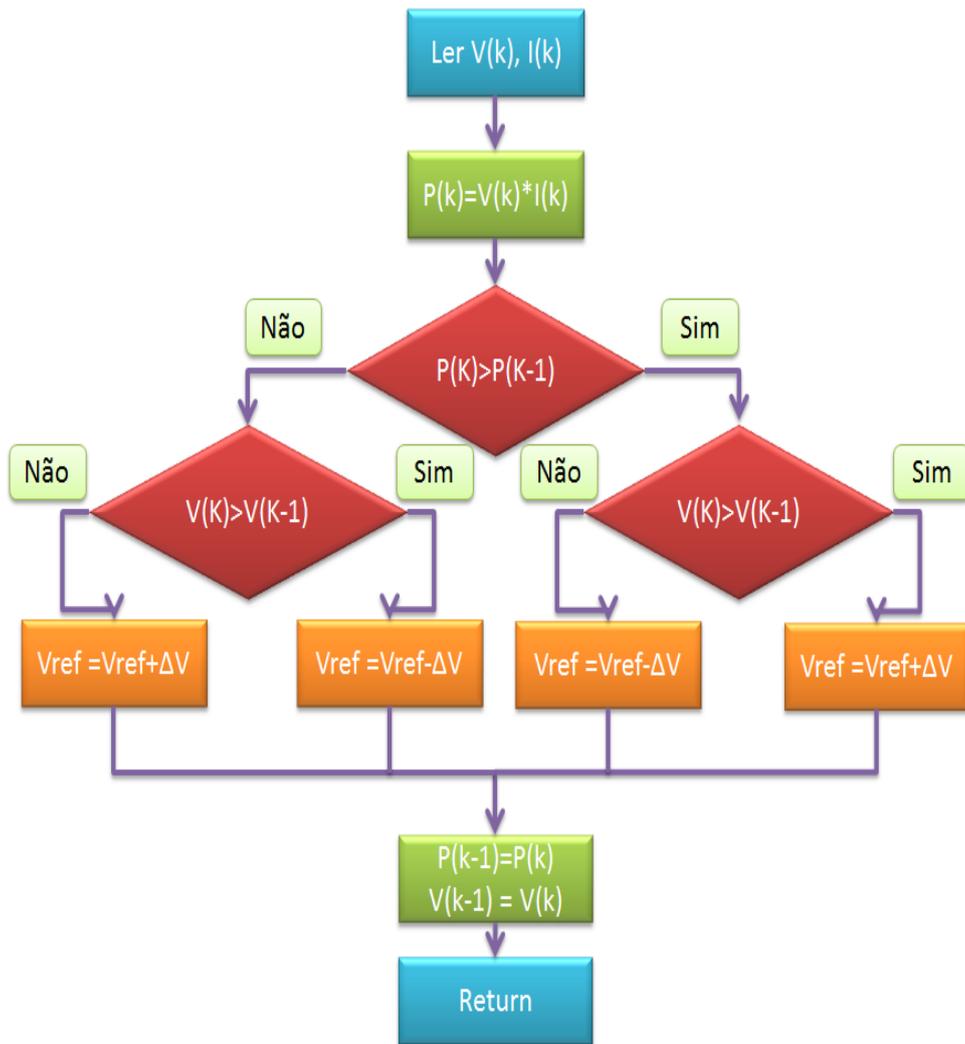


Figura 47 - Algoritmo Perturba e Observa

3.4.4 Condutância Incremental

Este método apresenta-se como a evolução do perturba e observa e consiste no cálculo da derivada da potência relativamente à tensão. A comparação da derivada com o valor zero fornece exatamente ao sistema em que direção se encontra o ponto máximo de potência ou mesmo se já o encontrou.

$$P = V * I \tag{3.45}$$

Derivando a potência em ordem a tensão:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V * I)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \tag{3.46}$$

Determinando o ponto máximo:

$$V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.47)$$

Podemos considerar então que:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ (MPP)} \quad (3.48)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ (MPP a esquerda)} \quad (3.49)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ (MPP a direita)} \quad (3.50)$$

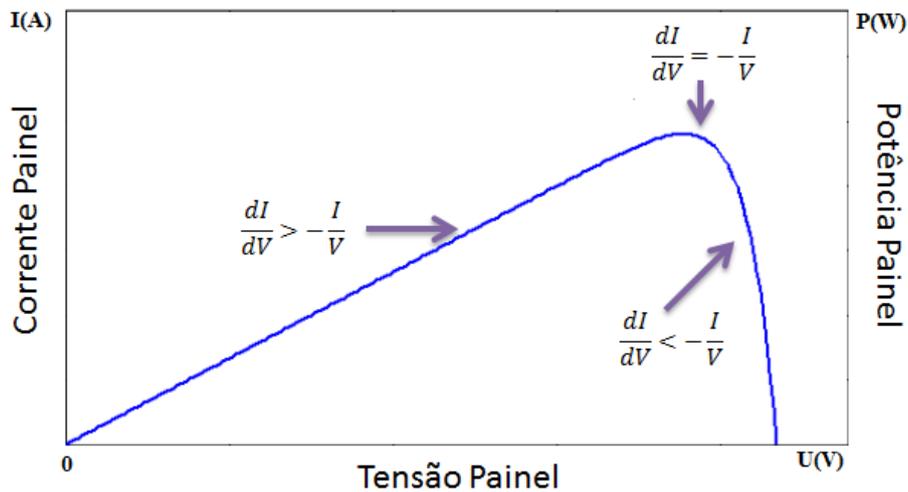


Figura 48 - Procura do ponto de máxima potência

A velocidade e a possibilidade de encontrar o ponto de máxima potência em vez de oscilar em torno deste, mesmo em condições climáticas difíceis, torna este método bastante interessante. Porém, a implementação da condutância incremental exige uma capacidade de processamento elevada quando comparada com outros algoritmos, pois o nível de cálculos necessários para a descoberta do ponto máximo assim o exige, o que possibilita a obtenção de um rendimento alto mas com um nível de custos superiores e complexidade.

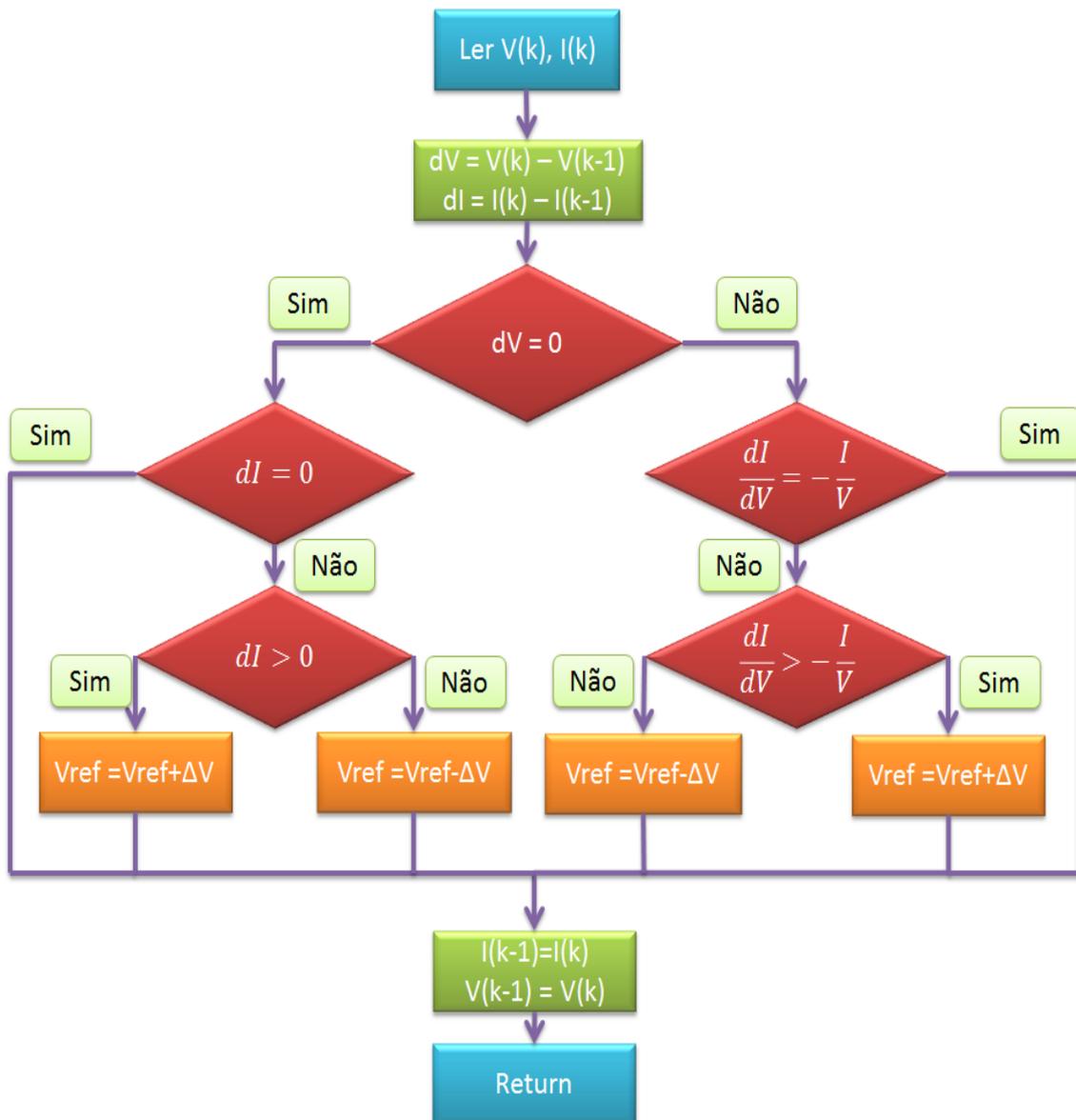


Figura 49 - Algoritmo Condutância Incremental

3.4.5 Comparação dos diversos métodos

A escolha de um método de procura do ponto de máxima potência deve ter em conta várias características, da aplicação, do painel e do próprio método. Na Tabela 4 são apresentadas as diversas características dos métodos Tensão Constante, Perturba e Observa e a condutância incremental.

Na tensão Constante é de salientar a baixa complexidade de implementação, onde a necessidade de utilizar apenas um sensor não é alheia. Porém, a necessidade de estudar o painel fotovoltaico para determinação da constante de idealidade entre a tensão de máxima potência e a tensão em circuito aberto apresenta como uma desvantagem significativa.

O Perturba e observa e a condutância Incremental diferenciam-se do Tensão Constante essencialmente devida à utilização de um MPPT real, ou seja, faz a leitura constante da tensão e corrente, determinando a potência em cada instante. Verificando assim os valores da potência, em vez de supor, o valor da tensão de máxima potência, através da tensão em aberto. Apresentam como desvantagem, e necessidade de utilizar sensores de corrente e tensão e um aumento de complexidade, mesmo que no algoritmo perturba e observa seja pequena.

Tabela 4 - Comparação dos diversos métodos dinâmicos de extração da máxima potência

	Tensão Constante	Perturba e observa	Condutância Incremental
Analógico ou Dinâmico	Dinâmico	Dinâmico	Dinâmico
MPPT real	Não	Sim	Sim
Afinação Periódica	Sim	Não	Não
Velocidade de convergência	Média	Variável	Variável
Complexidade de implementação	Baixa	Baixa	Média
Parâmetros requeridos	Tensão	Tensão, Corrente	Tensão, Corrente
Dependência do painel	Sim	Não	Não

Capítulo 4

Simulações

A evolução da eletrônica e a conseqüente complexidade dos circuitos eletrônicos, torna cada vez mais importante o uso de ferramentas de simulação. Assim, tendo em conta os requerimentos de um projeto, é possível elaborar a simulação de todo o protótipo, perceber todos os cenários possíveis de acontecer, prevenindo e eliminando erros que poderiam afetar os circuitos eletrônicos. Cada vez mais os programas computacionais se preparam com novas tecnologias, permitindo assim perceber o perfeito funcionamento dos sistemas, tanto a nível de hardware como de software.

Todas estas vantagens, aliadas à comodidade e tempo ganho na implementação de um circuito eletrônico, leva a que esta ferramenta seja cada vez mais uma necessidade, tanto a nível empresarial como académico.

4.1 PSIM

Atualmente existem diversos programas computacionais de simulação, capazes de desenvolver e testar os circuitos eletrônicos, tendo em conta as diversas características dos componentes. O PSIM apresenta-se como sendo um programa virado essencialmente para a Eletrônica de Potência, com bons interfaces tanto a nível do utilizador, como com outros programas computacionais, o que faz deste um excelente simulador. A implementação das energias renováveis, através do desenvolvimento de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas e ainda a possibilidade de inserção de código sem a necessidade utilização de DLLs (Dynamic Link Library), teve o poder de potencializar o PSIM a nível académico. Tendo em conta todas estas vantagens e ainda a possibilidade de utilização de painéis fotovoltaicos modelados, faz com que este seja o simulador ideal para desenvolver todos os MPPTs e perceber ainda as diferenças de desempenho entre eles.

4.2 Simulação do painel fotovoltaico

O desenvolvimento de um conversor com o objetivo de procurar a máxima potência, deve ter em conta todas as características apresentadas por um painel fotovoltaico. Nem sempre o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos em ambiente de simulação se afigura uma tarefa fácil, devido às enormes variações no desempenho de um painel fotovoltaico. O PSIM para contornar este problema e para assemelhar cada vez mais as suas simulações, disponibiliza um simulador de painéis fotovoltaicos, tendo em conta as características físicas deste, e ainda os fenómenos naturais.

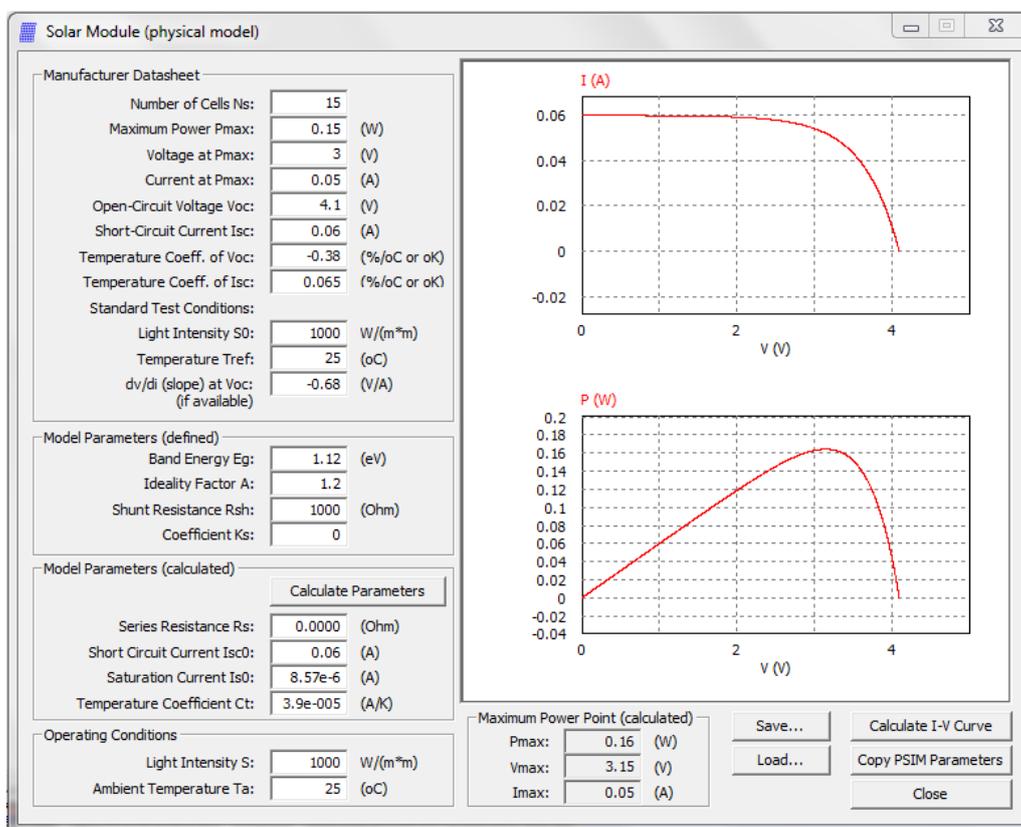


Figura 50 - Simulação do painel MP3-37

Para determinar a eficiência e variações resultantes da escolha do algoritmo de controlo, optou-se por elaborar uma simulação o mais real possível, elaborando assim a simulação do painel fotovoltaico MP3-37 da Power Film Solar como é perceptível na Figura 50. A escolha deste Painel teve em consideração o projeto final e todos os seus objetivos.

Para elaborar a simulação do painel, é necessário obter algumas características físicas, fornecidas pelo fabricante, como os valores máximos e mínimos da tensão e corrente, variação da

tensão e corrente, consoante a temperatura e ponto de máxima potência. Porém, nem todas as características são disponibilizadas pelo fabricante, o que torna mais difícil simular o painel com exatidão. De forma a contornar este problema, utilizou-se as condições definidas por defeito do simulador, para a variação de corrente e tensão consoante a temperatura.

Após a definição de todas as características físicas, é possível calcular as correntes de curto-circuito e saturação, resistência de série e coeficiente de temperatura, configurando assim as curvas I-V do painel.

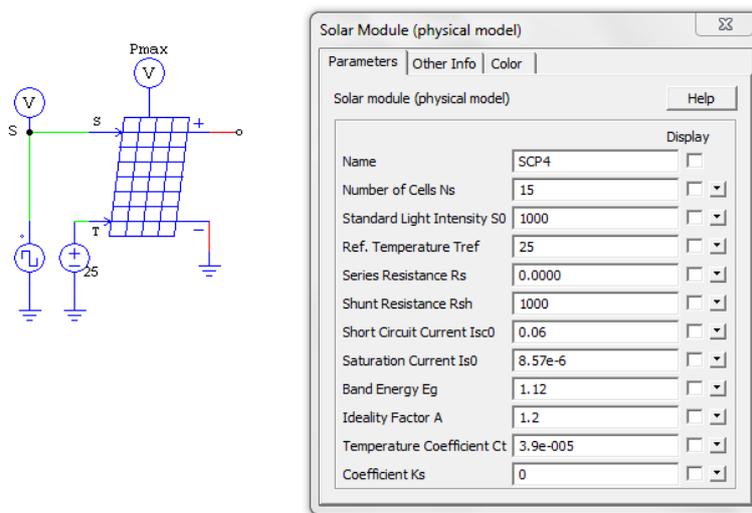


Figura 51 - Modelo físico do MP3-37

Na simulação, a variação do ponto de máxima potência é feita através da aplicação de uma onda quadrada na radiação, fazendo que esta, oscile sempre entre os 1000 e 900W/cm². Relativamente à temperatura, optou-se por mantê-la constante, a 25°C.

4.3 Algoritmo Tensão Constante

O algoritmo de tensão constante, já referido anteriormente, dentro dos algoritmos digitais é mais simples de implementar, pois apenas necessita de verificar a tensão em circuito aberto para calcular o ponto de máxima potência.

Para desligar o painel do restante circuito de potência, a fim de verificar a tensão em circuito aberto, é utilizado um relé de comutação como é perceptível na Figura 52. Apesar de apenas necessitar de abrir o circuito, para determinar a tensão em aberto, esta apresentou alguns problemas em simulação, logo foi necessário a inclusão de um condensador de reduzida capacidade, que possa carregar de imediato.

Como foi apresentado anteriormente, um painel fotovoltaico não apresenta linearidade entre a corrente e tensão, logo o controlo destes fatores torna-se essencial na obtenção de uma boa eficiência. De modo a maximizar a eficiência do circuito eletrónico é utilizado um controlo PI, a tensão definida para máxima potência

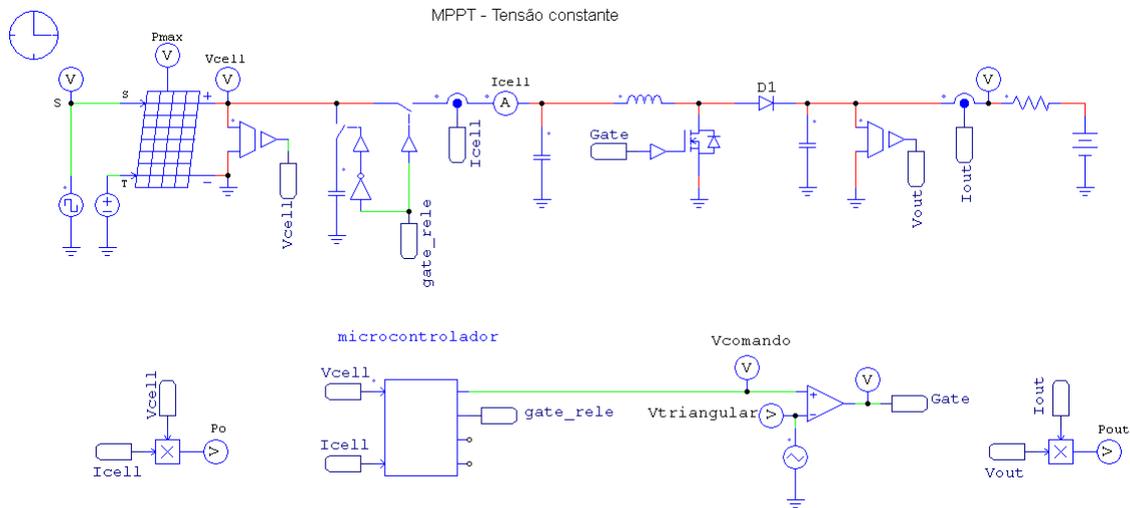


Figura 52 - Esquemático do step up com algoritmo tensão constante de MPPT

A desconexão do painel fotovoltaico com a carga, acarreta uma redução de eficiência ao sistema, pois existe uma fração de tempo em que a potência disponibilizada pelo painel será nula. Logo existe a necessidade que estes algoritmos sejam rápidos a efetuar esta operação, para que este efeito seja minimizado ao máximo. Na Figura 53 são apresentadas as diversas ondas de potência, onde é possível identificar que o tempo de leitura não se torna muito relevante no que diz respeito a perda de potência na carga.

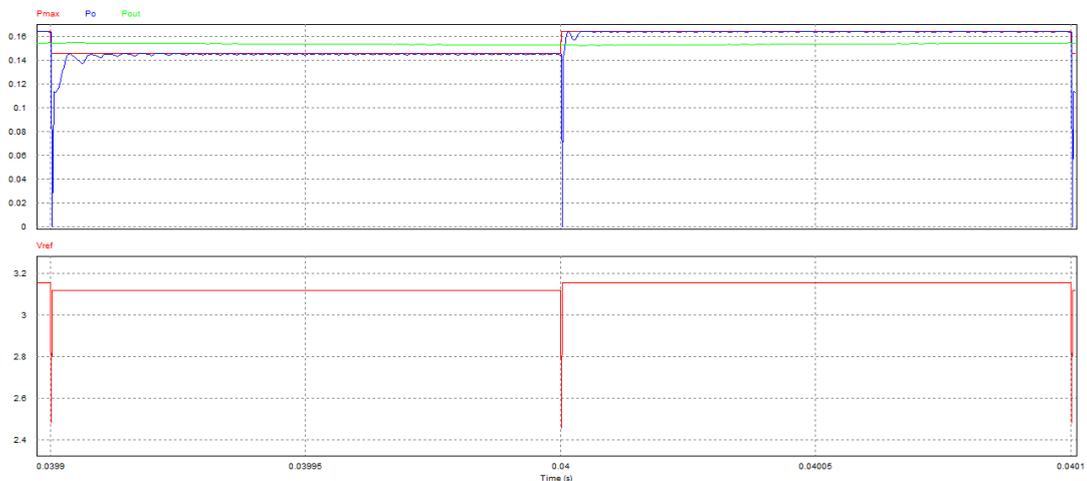


Figura 53 - Variação da potência com interrupção para leitura da tensão em aberto

Na parametrização do algoritmo, o maior problema prende-se com a definição da taxa de amostragem da tensão em aberto. Esta deve assumir um compromisso entre duas situações:

- Quanto maior o número de amostragens, maior é o tempo em que o sistema se encontra em aberto, logo potência nula.
- Quanto menor o período de amostragem, maior é a probabilidade do sistema trabalhar durante algum tempo sobre um ponto de potência máxima falsa.

Nas simulações, foi levado em conta o período ideal, de modo a visualizar exatamente a variação da potência de saída nas melhores condições.

Apesar do sistema obter pontos de energia nulos, a velocidade de controlo, faz com que a estabilidade seja atingida rapidamente, minimizando assim os efeitos prejudiciais da perda momentânea de potência. Na Figura 54 é possível perceber que o controlo varia muito aquando da leitura da tensão em aberto. Isto deve-se essencialmente ao facto do condensador não conseguir carregar completamente antes de efetuar uma nova leitura.

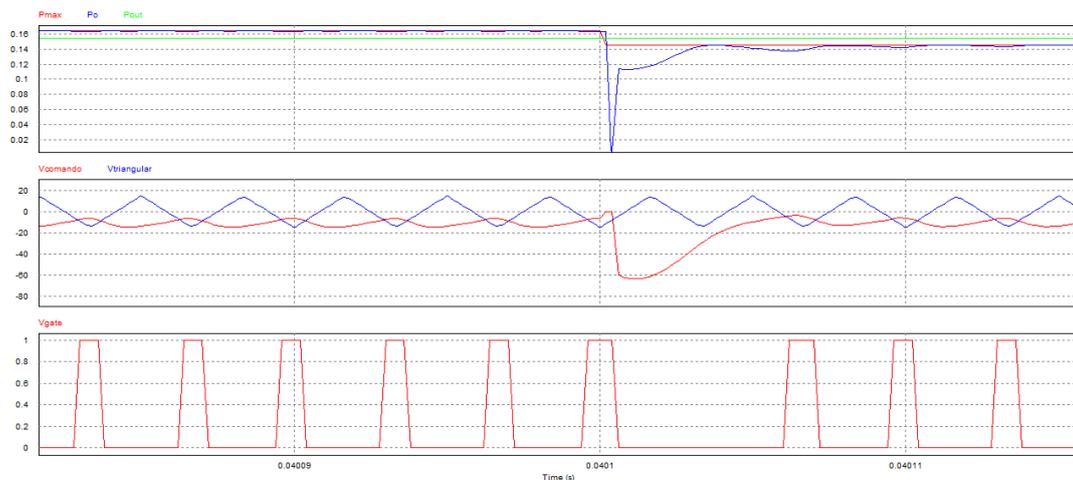


Figura 54 - Controlo do algoritmo de tensão constante

Através das funcionalidades da ferramenta de simulação é possível obter exatamente as percentagens de variação das potências, quantificando assim, a eficiência obtida por este controlo. Após a escolha de um intervalo de tempo, que coincide exatamente com o período da radiação solar, é determinado o valor médio das diversas ondas de potência e calculado a eficiência resultante.

$$P_{\max} = 154,70380mW \quad (4.0)$$

$$P_{out} = 153,41393mW \quad (4.1)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{max}} * 100\% = \frac{0,15341393}{0,15470380} * 100\% = 99,166\% \quad (4.2)$$

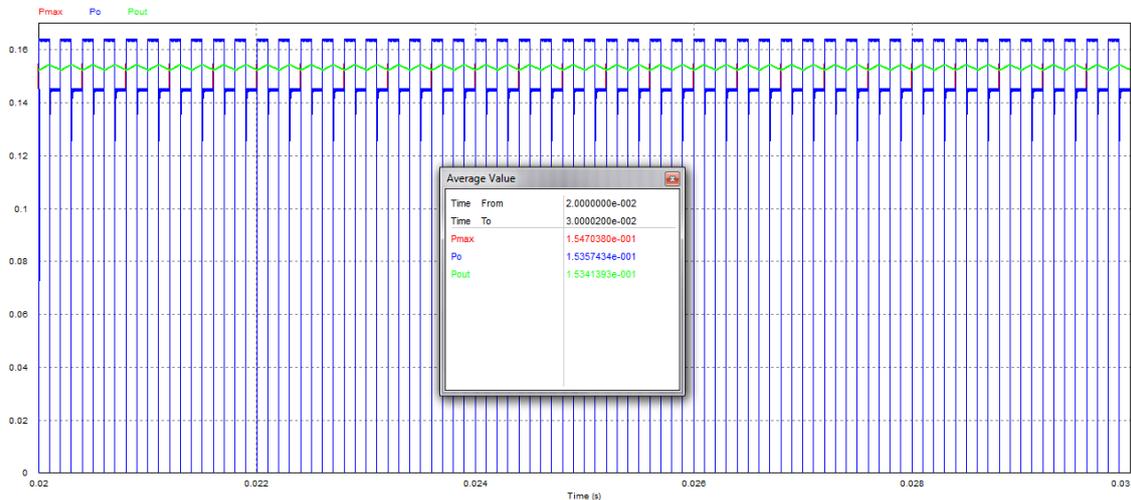


Figura 55 - Variação das potências no MPPT tensão constante

Conforme era previsível, os resultados em termos de eficiência são muito próximos do ideal, logo é possível caracterizar este método, como uma solução de boa eficiência e implementação razoavelmente fácil, ao nível de hardware e software, como é demonstrado pelo esquemático desenvolvido e algoritmo de controlo apresentado.

4.4 Algoritmo Perturba e Observa

No método perturba e observa, a aliança entre o dinamismo do algoritmo e a pesquisa real do ponto de máxima potencia, faz com que este seja um método bastante implementado em sistemas com boas relações de potência. Onde a implementação de mais um sensor ou acréscimo de cálculos no microcontrolador não provocam qualquer aumento de consumos ou redução dos tempos de atuação.

Em termos de hardware o método diferencia-se do método de tensão constante, devido à necessidade de utilizar dois sensores em vez de um único e principalmente por não necessitar de desconectar o painel da carga, para efetuar qualquer leitura.

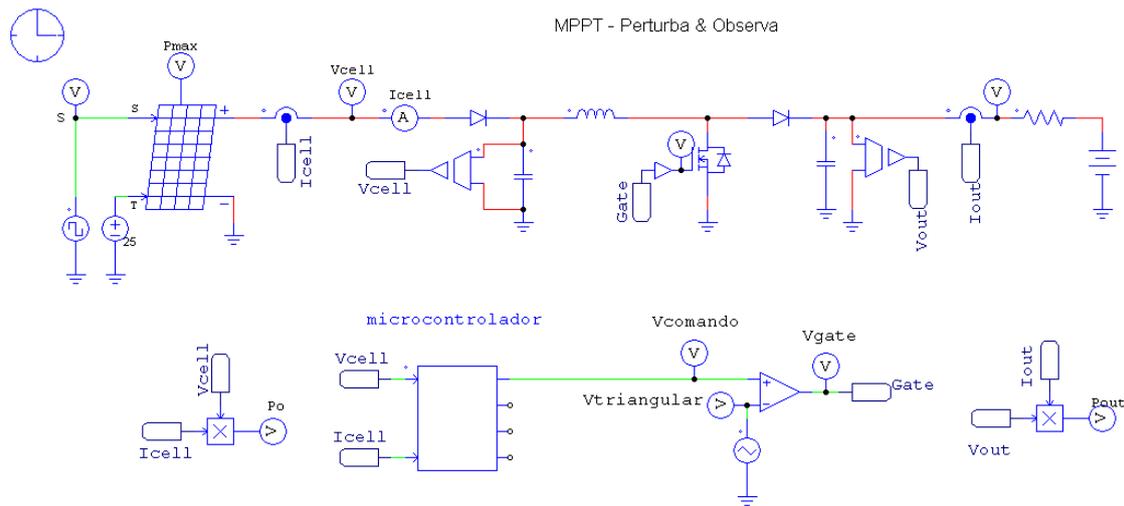


Figura 56 - Esquemático do step Up com algoritmo perturba e observa de MPPT

Um dos problemas apresentado por este algoritmo, prende-se por este não se conseguir fixar num ponto de máxima potência, pois o controlo do algoritmo como o seu próprio nome dá a entender, perturba e só depois é que observa, logo vai necessitar de sucessivas perturbações para se colocar em torno do ponto de máxima potência.

Quando existe uma variação das condições climáticas, o sistema identifica essa variação, e corrigi-a o mais rápido possível, de modo a tornar o sistema estável o mais rápido possível. Logo a maior percentagem de perdas é obtida aquando das alterações climáticas, como é perceptível na Figura 57.

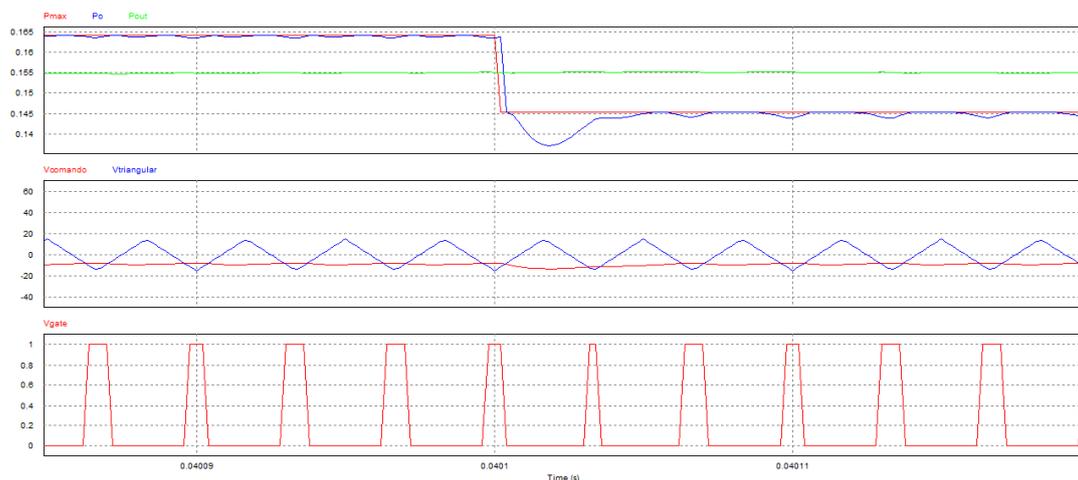


Figura 57 - Controlo do algoritmo de perturba e observa

A rapidez de resposta do sistema a variações climáticas e o constante funcionamento do sistema como um conjunto, leva a um incremento substancial da eficiência obtida. O mesmo seria

de esperar pois a utilização de um MPPT real acresce ao sistema, maior velocidade na obtenção do ponto máximo de potência, o que implica um aumento da eficiência.

$$P_{\max} = 154,70380mW \quad (4.3)$$

$$P_{out} = 154,15785mW \quad (4.4)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{\max}} * 100\% = \frac{0,15415785}{0,15470380} * 100\% = 99,647\% \quad (4.5)$$

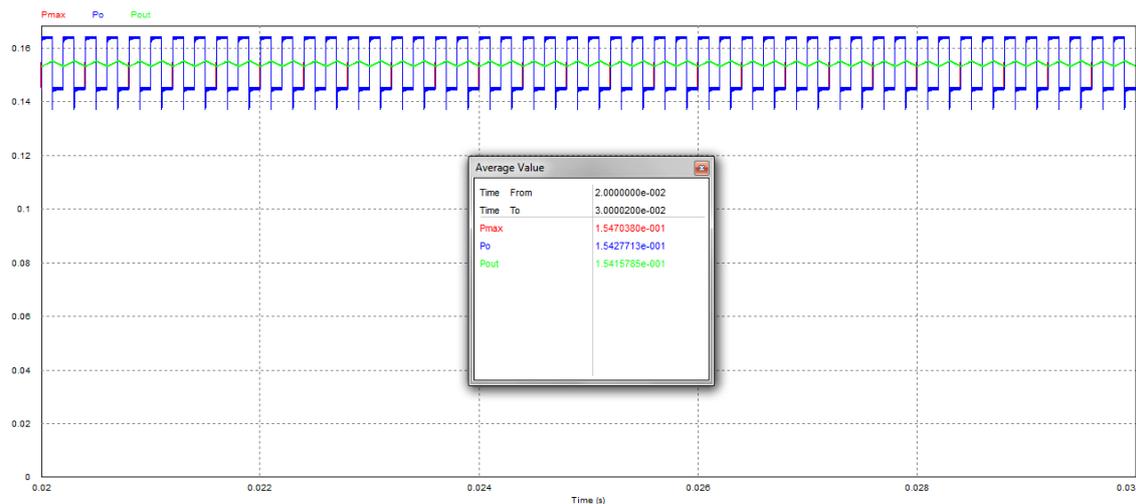


Figura 58 - Variação das potências no MPPT perturba e observa

Estes algoritmos não respondem sempre da mesma forma às variações de potência, pois na Figura 58 é perceptível que o sistema se adapta mais rápido quando existe um aumento de potência do que quando acontece o inverso. Tal acontece, essencialmente, devido à necessidade de o condensador descarregar, para poderem trabalhar a tensões mais baixas.

Verificando a eficiência obtida, é possível perceber os benefícios da constante monitorização da potência obtida, pois é alcançado um aumento significativo de eficiência quando comparado com o método anterior.

4.5 Algoritmo Condutância Incremental

O algoritmo da condutância incremental é apresentado, por vários estudos, como sendo o algoritmo que melhor desempenho demonstra ao nível da conversão da energia. É um método perfeitamente comparável com o perturba e observa, pois as suas diferenças são apenas ao nível de software, e desempenho obtido.

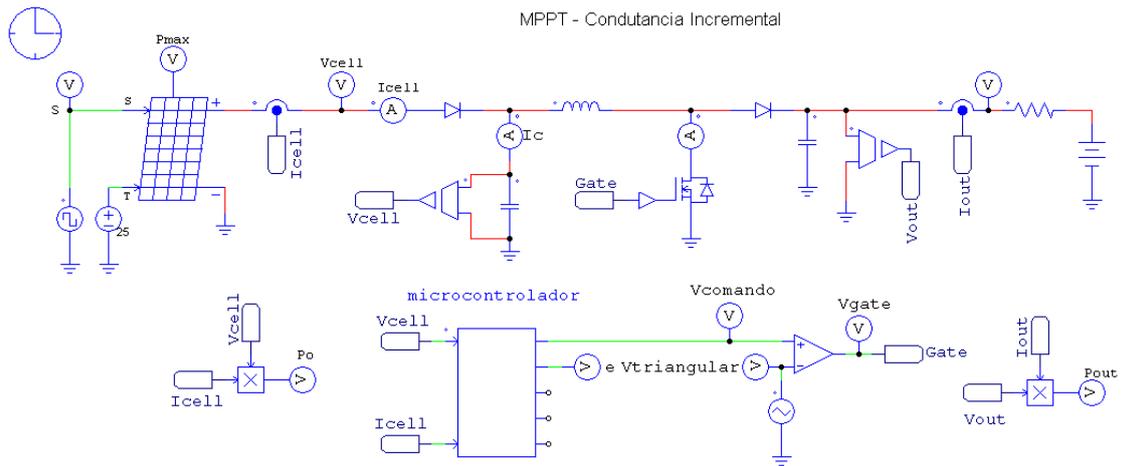


Figura 59 - Esquemático do step up com algoritmo condutância incremental de MPPT

A determinação e fixação por parte do algoritmo no ponto máxima potência, é apresentada como a principal vantagem quando comparado com o método anterior. A maior dificuldade na implementação do método prende-se essencialmente com a definição da máxima potência, ou seja, definir em termos de potência, qual a sensibilidade que deve ser considerada. Em termos práticos trata-se de quantificar a resolução que se vai obter, essencialmente para o valor nulo da derivada.

Caso não fossem definidos níveis de sensibilidade, o algoritmo comportar-se-ia como o perturba e observa, pois nunca conseguiria obter o valor nulo da derivada da potência, logo estaria sempre a inserir perturbações no sistema, para que o consiga encontrar.

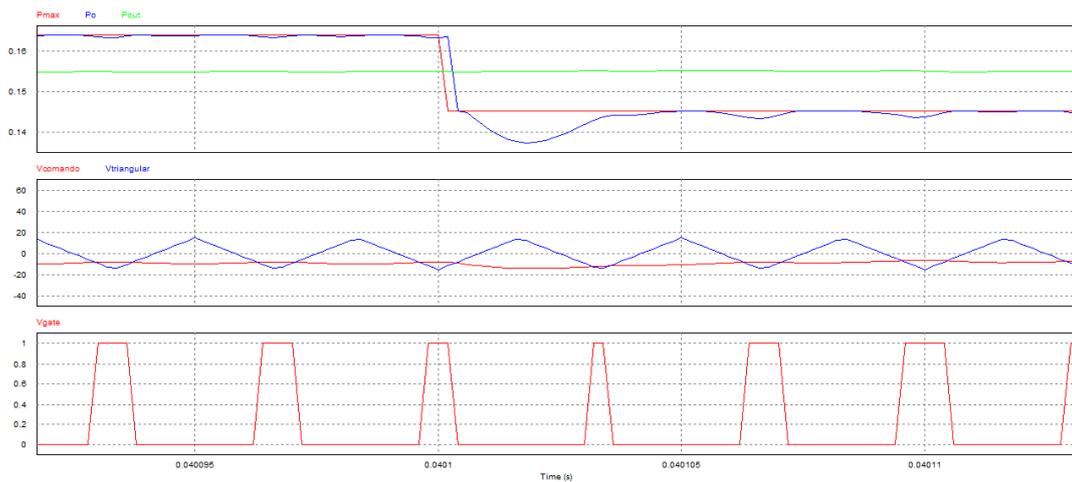


Figura 60 - Controlo do algoritmo da condutância incremental

Introduzindo níveis próximos do ideal, alcançou-se valores de potência muito satisfatórios, conseguindo um acréscimo de eficiência, relativamente ao método de perturba e observa, o que torna este método como o mais eficiente, o que comprova a literatura apresentada no capítulo 3.

$$P_{\max} = 154,70380mW \quad (4.6)$$

$$P_{out} = 154,16967mW \quad (4.7)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{\max}} * 100\% = \frac{0,15416967}{0,15470380} * 100\% = 99,655\% \quad (4.8)$$

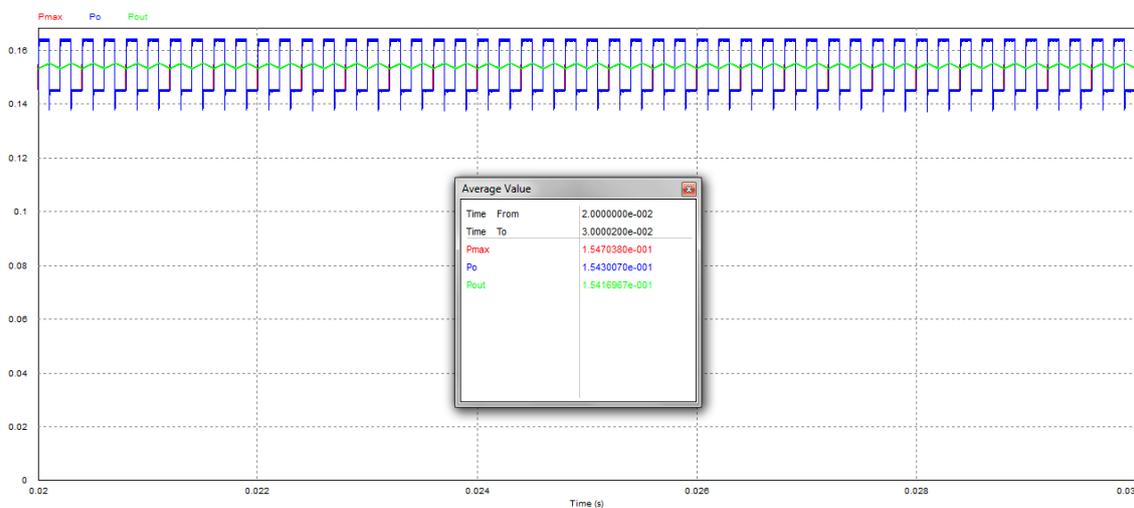


Figura 61 - Variação das potências no MPPT condutância incremental

A definição deste método prende-se essencialmente pela determinação do ponto máximo de potência, porém essa vantagem não se afigura como crucial devido ao aumento quase insignificante da eficiência relativamente ao método perturba e observa.

4.6 Comparação dos diversos algoritmos

As simulações tinham como intuito perceber as diferenças de eficiência entre os diversos algoritmos e não quantificar a eficiência de cada um, pois as simulações foram efetuadas com componentes ideais. Porém, as simulações pecam devido a não possibilidade de simular os consumos do microcontrolador e outros componentes, pois o aumento de complexidade dos algoritmos faz com que o microcontrolador demore mais tempo a concluir todos os seus cálculos, o que implica um aumento de potência consumida.

As simulações vieram comprovar, o que antes já tinha sido afirmado, ao nível de complexidade dos algoritmos, que algoritmos mais complexos obtêm maiores níveis de eficiência, porém apresentam também maiores consumos energéticos.

Tabela 5 - Eficiência simulada dos diversos MPPTs

MPPT	Eficiência
Tensão Constante	99.166%
Perturba e Observa	99.647%
Condutância Incremental	99.655%

Em sistemas de elevada potência, o algoritmo da condutância incremental afigura-se como sendo o que apresenta melhor desempenho, pois os consumos energéticos do microcontrolador não interferem no desempenho final. Relativamente aos sistemas de baixa potência, os métodos da tensão constante e perturba e observa afiguram-se como boas soluções.

O algoritmo tensão constante apresenta como vantagens, a utilização de um único sensor e consumos energéticos baixos por parte do microcontrolador, porém apresenta a eficiência mais baixa de todos os algoritmos estudados. No caso do perturba e observa apresenta uma eficiência muito boa, próxima do ideal, porém obtém consumos energéticos superiores ao tensão constante.

A escolha do método a utilizar deve ter em conta as várias características dos sistemas, como a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos, consumos energéticos dos vários componentes e eficiência do próprio método.

Capítulo 5

Implementação prática

5.1 Abordagem Prática

O desenvolvimento do protótipo contemplou as diversas características, indicadas nos objetivos iniciais, como tamanhos reduzidos, baixos consumos energéticos e flexibilidade dos diversos componentes, para futura integração em filme fino flexível.

A escolha da bateria e painel fotovoltaico têm um papel crucial no desenvolvimento do protótipo, pois estes influenciam na produção e armazenamento de energia, e no tamanho e flexibilidade do protótipo. Assim sendo, escolheu-se uma bateria de 200mAh e 3,7V de tensão nominal, que apresenta uma espessura de 1mm e um painel fotovoltaico de 150mW e uma espessura de 0.2mm, ambos flexíveis.

A escolha de uma bateria com uma tensão nominal de 3.7V e um painel fotovoltaico com apenas 3V, pressupõe a utilização de um conversor elevador, de modo a poder carregar a bateria que se encontrará a um nível superior de tensão. Dentro de todas as soluções apresentadas no capítulo de fundamentos teóricos, a utilização de um conversor Step Up simples confere maior eficiência (menos componentes e necessidade única de elevar) e simplicidade ao protótipo.

No que diz respeito ao controlo de todos os processos de carga e obtenção do ponto de máxima potencia, foi utilizado um microcontrolador do microchip com baixos consumos de modo a assegurar que o funcionamento do carregador aconteça com o maior nível de eficiência.

Na Figura 62 é apresentado um diagrama de blocos, onde é possível perceber todos os blocos introduzidos no protótipo e ainda as leituras feitas no controlo de tensão e corrente tanto ao nível de carregamento de bateria ou obtenção de máxima potência.

O microcontrolador tem como função assegurar o perfeito carregamento da bateria, porém podem existir falhas de controlo, por isso, de modo a prevenir possíveis problemas com a bateria ao nível de sobrecargas ou mesmo subtensões é utilizado um equipamento de proteção adicional

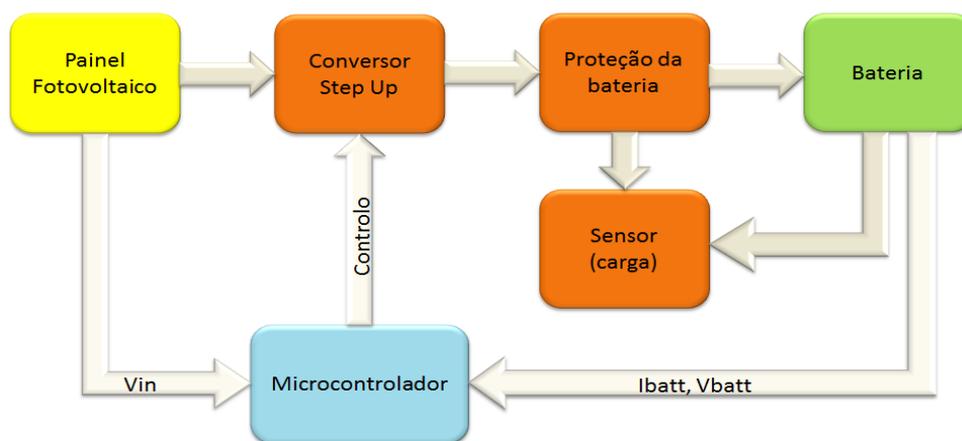


Figura 62 - Diagrama de blocos implementado

5.2 Bateria

A definição de todo o protótipo deve ter como base a bateria que se deseja carregar, logo, existe a necessidade de escolher uma bateria com uma boa relação capacidade, dimensão e flexibilidade. Tendo em conta os parâmetros estabelecidos pelo projeto, insere-se a PGEB016144 [60], uma bateria recarregável de polímero de lítio da PowerStream que apresenta uma capacidade 200mAh para uma espessura de 1mm.



Figura 63 - Flexibilidade apresentada pelas baterias ultrafinas da PowerStream

Tabela 6 - Características da bateria PGEB016144

Capacidade	Tensão	Tensão máxima de carga	Tensão mínima de descarga	Tamanho	Espessura
200mA	3.7V	4.2V	3V	44mm*61mm	1mm

A utilização de baterias de polímero de lítio requer alguns cuidados, no que diz respeito aos procedimentos de carga e descarga da bateria, definindo limites de utilização (tensão e corrente), de modo a beneficiar a vida útil da bateria e ainda prevenir determinados danos na bateria e

mesmo no protótipo. Na Figura 64 é apresentada as curvas características da bateria PGEB014461, um modelo similar ao utilizado, para diversas correntes de descarga [61].

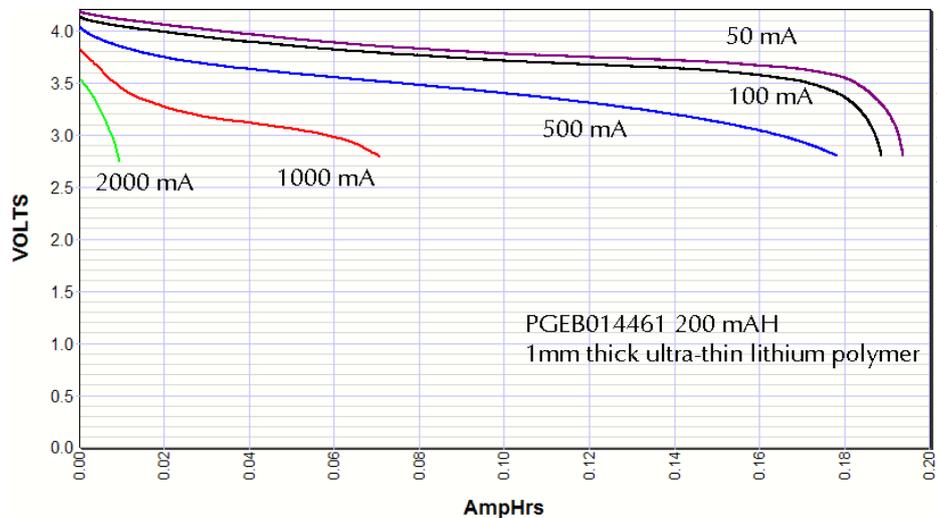


Figura 64 - Curvas de descarga para a bateria PGEB014461

Na Figura 64 é possível perceber a variação existente na capacidade disponível da bateria consoante a corrente consumida desta. Idealmente, apenas o tempo de descarga se deveria alterar consoante a corrente consumida, porém tal não acontece variando mesmo a capacidade disponível pela bateria aquando das variações de corrente consumida. Observando o gráfico é possível verificar que existe uma variação muito grande na capacidade da bateria disponível, pois para uma corrente de descarga de aproximadamente 50mA é utilizada 97% da sua capacidade e para uma corrente de 2000mA apenas é utilizada cerca de 5% da sua capacidade. A utilização destas baterias só se torna viável em aplicações com consumos médios até 3C de modo a maximizar a eficiência.

5.2.1 Proteção da bateria

Conforme referido anteriormente nos fundamentos teóricos, a utilização de uma bateria de polímero de lítio requer alguns cuidados. De modo a evitar os problemas referidos, é inserido no protótipo final, o circuito integrado UCC3958 da Unitrode que tem como função específica proteger a bateria contra sobretensões e subtensões [62].

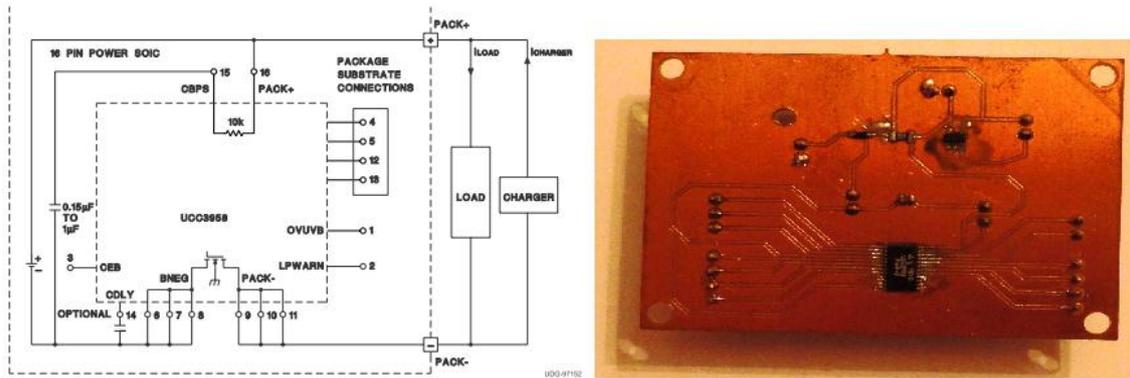


Figura 65 - Diagrama de uma aplicação usando o UCC3958 como proteção

O chip vai ativar ou desativar a bateria consoante os valores de tensão presentes na bateria. Sempre que o chip verifique que a tensão da bateria desceu abaixo dos 2,35V é indicado que esta se encontra em subtensão e procede à desconexão da bateria através do mosfet de controlo, de modo a minimizar as perdas de corrente. O próprio chip é desligado, mantendo só em função, um circuito capaz de detetar a ativação do carregador. Quando o carregador seja detetado, o chip entra em modo normal de trabalho e permite o carregamento da bateria conectando-a através do mosfet. A condição de subtensão só é desativada quando a tensão na bateria ultrapassa os 2,65V, colocando o chip no estado de controlo normal.

A condição de sobretensão é ativada pelo chip quando a tensão na bateria ultrapassa os 4,3V, impedindo o contínuo carregamento da bateria através do controlo do mosfet, porém, a descarga continua a ser permitida. O estado normal só é alcançado quando a bateria atinge uma tensão inferior a 4V.

5.3 Painel fotovoltaico MP3-37

A PowerFilm é uma das empresas que nos últimos anos se tem evidenciado pela procura e fabricação de novos painéis fotovoltaicos de filme fino flexíveis, tendo mesmo no modelo MP3-37 um excelente exemplo de eficiência, preço e dimensão. Na Tabela 7 é descrito as características do painel utilizado [57].

Tabela 7 - Características do painel fotovoltaico MP3-37

Corrente	Tensão	Potencia	Corrente (sc)	Tensão (oc)	Tamanho	Peso	Espessura
50mA	3V	0.15W	60mA	4.1V	37mm*114mm	1.2g	0.2mm



Figura 66 - Painel MP3-37

Apesar da PowerFilm descrever este painel com uma tensão em circuito aberto de 4.1V e uma corrente de curto circuito de 60mA, as curvas apresentadas também pelo fabricante não coincidem como é perceptível na Figura 67 [63]. Tendo em conta todas as discrepâncias verificadas, torna-se essencial um estudo prático sobre as suas características.

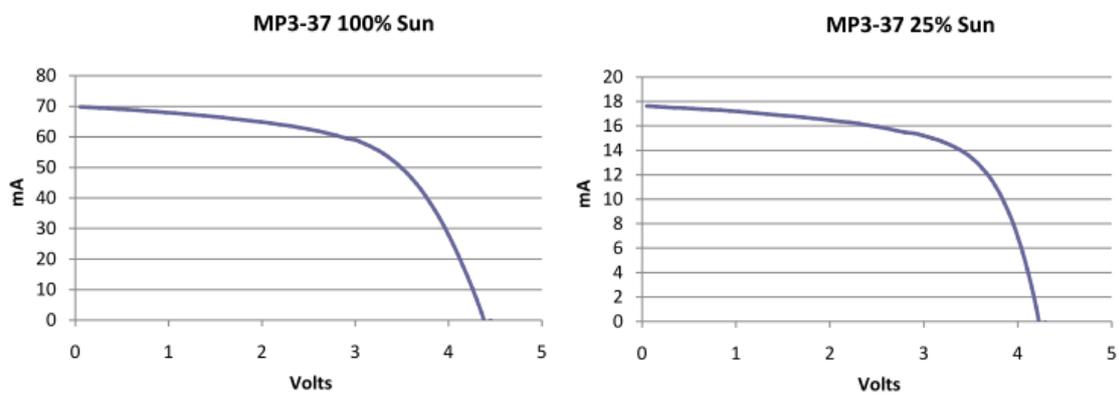


Figura 67 - Curvas características do painel MP3-37 com 100% e 25% de radiação fornecidas pela PowerFilm

Procedendo a variação da resistência aos terminais do painel fotovoltaico, é possível determinar a corrente e tensão fornecidas pelo painel fotovoltaico em determinada radiação solar. A leitura da corrente e tensão é efetuada através de um amperímetro e voltímetro respetivamente, já no que diz respeito a radiação é utilizado um radiómetro. A inclusão de um radiómetro permite a leitura das curvas de potência em diversos pontos de radiação, podendo assim perceber a influência que a radiação tem sobre toda a curva de potência e em especial nos pontos de máxima potência, em aberto e curto-circuito.

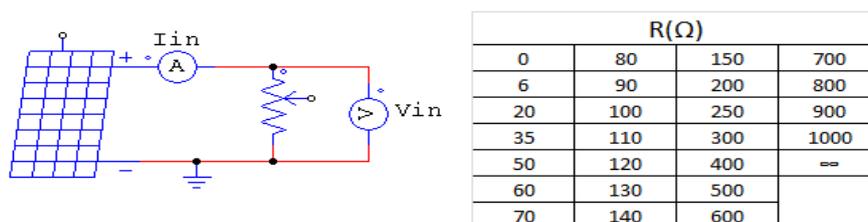


Figura 68 - Resistências utilizadas para calcular as características do painel fotovoltaico

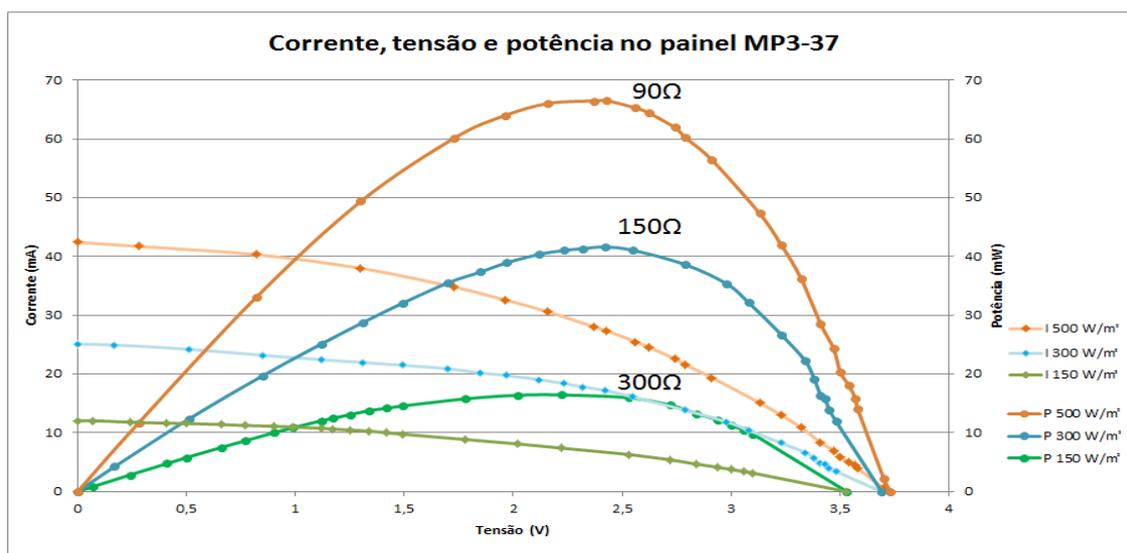


Figura 69 - Características do painel MP3-37 segundo a radiação

Conforme seria esperado, atingindo níveis de radiação constante é possível traçar as curvas de potência do painel fotovoltaico. A obtenção do gráfico da Figura 69 permite verificar ainda a variação de impedância consoante a radiação, ou seja, quanto maior seja a radiação, menor é o valor de impedância que se encontra à esquerda do ponto de máxima potência, pois para uma radiação de $500\text{W}/\text{cm}^2$ apenas é necessário uma resistência de 90ohms aproximadamente e numa radiação de $150\text{W}/\text{cm}^2$ é necessário uma resistência a rondar os 300ohms .

Apesar do painel fotovoltaico ter sido descrito pelas curvas características, estas não transmitem na realidade todos os fatores que podem influenciar a célula fotovoltaica. Assim sendo, foi elaborado ainda um estudo do impacto da temperatura no painel fotovoltaico, através da medição de todas as componentes anteriormente apresentadas consoante a temperatura em que a célula se encontrava.

Obtendo uma temperatura constante de 25°C e 50°C foram retirados os valores de corrente e tensão para uma radiação constante de $500\text{W}/\text{cm}^2$ traçando assim o gráfico da Figura 70. Os valores referentes à temperatura de 25°C foram obtidos num dia com forte vento, reduzindo assim a temperatura, por outro lado os dados a 50°C foram verificados após o painel fotovoltaico estar exposto durante um determinado tempo à radiação.

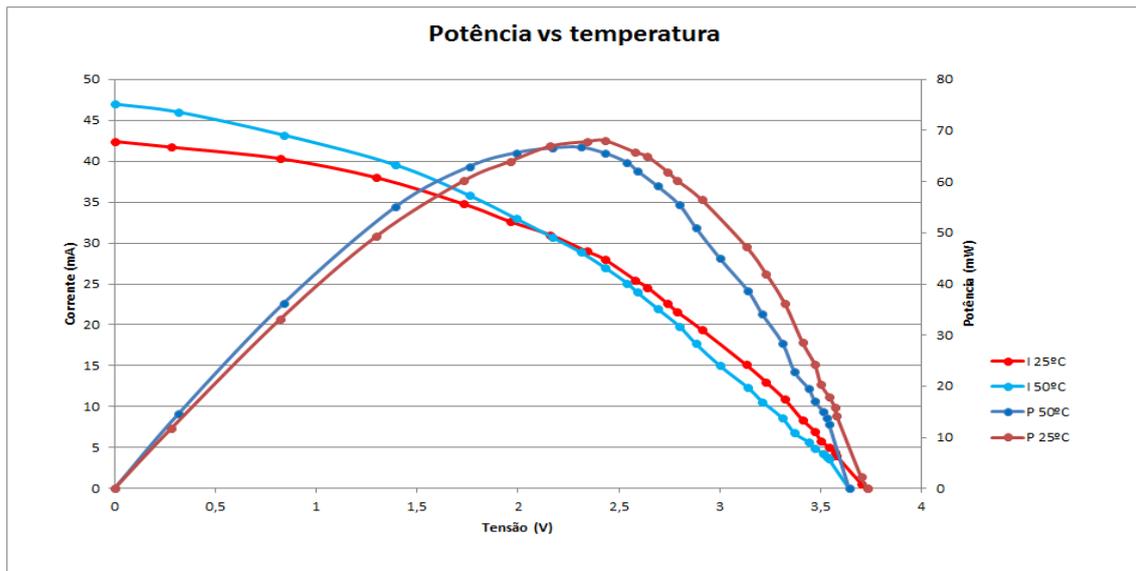


Figura 70 - Potencia obtida a 25°C e 50°C

A temperatura apresenta um efeito contrário à radiação solar na célula fotovoltaica provocando, um a aumento da corrente e diminuição da tensão, levando a uma redução da potência disponível.

A caracterização pormenorizada do painel fotovoltaico e da bateria vai permitir uma análise cuidada de todas as necessidades para a projeto do protótipo de carregamento da bateria e ainda uma análise fiável do rendimento de todo o sistema.

5.4 Unidade de controlo

O controlo de todos os processos é feito através da utilização de uma unidade de controlo, composta por diversos módulos de análise e atuação. O sistema segue um fluxo unidirecional composto pela leitura das tensões e correntes, processamento da informação recolhida e respetiva atuação no conversor. A seleção destes deve ser criteriosa, pois o sucesso do protótipo assenta essencialmente nas qualidades apresentadas pela unidade

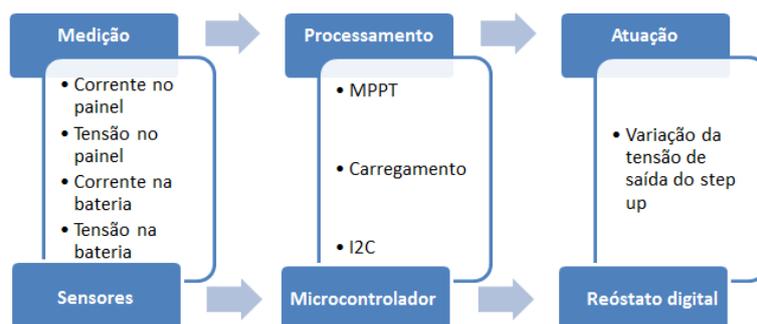


Figura 71 - Diagrama de blocos da Unidade de Controlo

No módulo de medição são utilizados quatro sensores para medir os níveis de tensão e corrente à saída do painel fotovoltaico e a entrada da bateria. Os dois primeiros permitem controlar a extração de energia do painel fotovoltaico, enquanto os outros servem para monitorizar o estado da bateria e seu carregamento. No bloco de processamento deve ser elaborada a análise das medições efetuadas anteriormente, de modo a perceber as necessidades do sistema e poder definir através da atuação uma reconfiguração do sistema

5.4.1 Microcontrolador

A unidade de controlo tem o microcontrolador como elemento principal, pois é a este, que confere a análise de dados, processamento e tomada de decisões. Este deve conseguir conciliar a informação requerida pelos sensores com os métodos de carregamento e procura da máxima potência e com o elemento de atuação. Tendo em conta as necessidades dos módulos adjacentes o microcontrolador deve possuir uma boa capacidade de processamento, um modo de comunicação fiável, nomeadamente I2C, portos PWM e um ADC (Analog-to-digital converter).

A escolha requereu sobre o PIC12LF1840 da microchip, devido a este incorporar internamente todos os requisitos apresentados anteriormente e ainda pelas suas qualidades energéticas (tensões baixas e correntes baixas de alimentação em modo ativo e stand by) e package de tamanho reduzido [64].

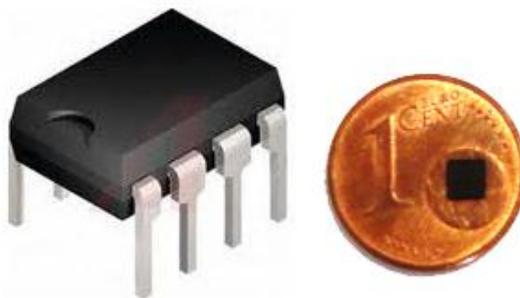


Figura 72 - PIC12LF1840

O microcontrolador utilizado apresenta consumos de 20nA a 1,8V em stand by, 69 μ A a 1MHz e 2,3mA a 32MHz em modo ativo. Operando ainda com uma tensão mínima de 1,8V.

O protocolo I2C torna-se uma necessidade devido ao elemento de atuação apenas utilizar este protocolo como meio de comunicação.

5.4.2 Sensores

A utilização de um microcontrolador com ADC permite a leitura de tensões de modo simples e eficaz, sem necessitar de recorrer a qualquer circuito auxiliar. O PIC12LF1840 apresenta na sua estrutura um ADC de 10bits, o que proporciona uma resolução relativamente boa para as necessidades do projeto.

$$resolução = \frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{2,048}{1023} = 2mV \quad (5.3)$$

Utilizando os vários canais disponíveis pelo microcontrolador é possível obter as tensões presentes no painel fotovoltaico e na bateria.

A leitura da corrente é obtida através da utilização de um sensor de corrente resistivo, que tem como princípio de funcionamento a amplificação da queda de tensão aos terminais de uma resistência. A utilização de um sensor composto por este modelo não implica um consumo energético acentuado, devido ao baixo valor da resistência usada para a leitura e ainda pelo valor alto de ganho. O MAX9938 da Maxim revela ser uma excelente solução, pois apresenta uma boa fiabilidade e reduzidos consumos de energia (1 μ A máximo, segundo o datasheet).

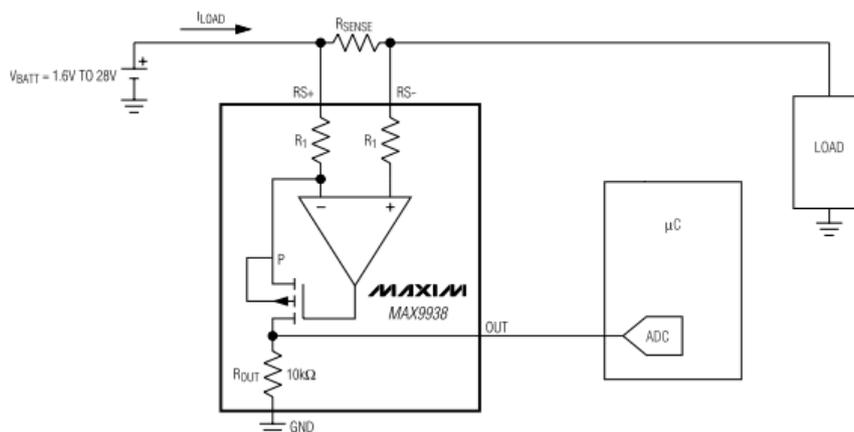


Figura 73 - Sensor de corrente MAX9938 da Maxim

$$U_{ADC} = G * R * I \Leftrightarrow U_{ADC} = 100 * 0.1 * I \Leftrightarrow U_{ADC} = 10 * I \quad (5.4)$$

A utilização de um ganho de 100 na leitura da corrente permite que o ADC tenha uma resolução na leitura de corrente de 0.2mA, tendo em conta a equação anterior a resolução em tensão de 2mV.

5.4.3 Reóstato digital

O controlo do step up terá como base a variação de uma resistência, que proporcionará o ajuste da tensão de saída. Para tal foi utilizado o MCP4017T da Microchip que comunica com outros dispositivos através do protocolo I2C.

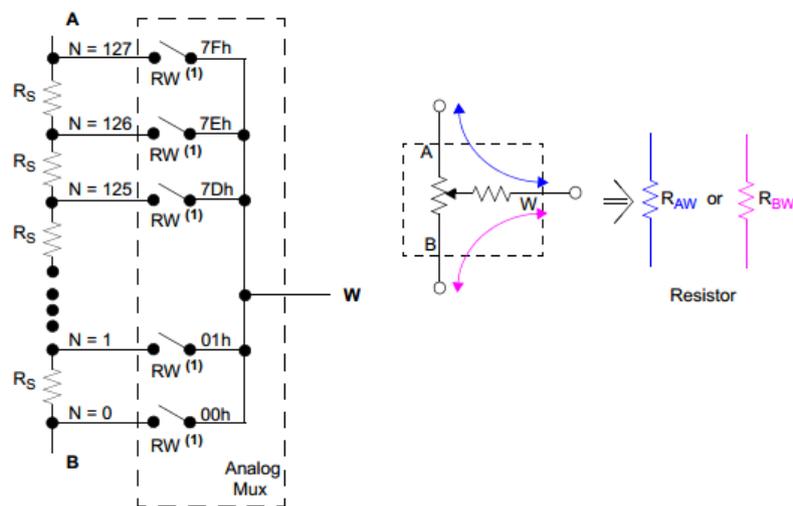


Figura 74 -- Reóstato digital MCP4017T

Na escolha do reóstato digital foi tida em conta a eficiência energética segundo duas vertentes, bons desempenhos energéticos e utilização de reóstatos com valores altos. A utilização de resistências de elevado valor reduz a dissipação de energia, devido à sua colocação ser em paralelo com o conversor step up. Para conseguir tal objetivo utilizou-se o MCP4017T com uma resistência total de 100K Ω e com 127 steps, o que representa uma variação mínima de resistência de 787,4 Ω .

$$R_s = \frac{R_{AB}}{127} = \frac{100000}{127} = 787,4\Omega \quad (5.2)$$

O protocolo I2C utilizado para comunicar entre o reóstato e o microcontrolador foi desenvolvido em 1996 pela Philips e rapidamente foi utilizado universalmente no mundo da eletrónica devido a sua simplicidade e fiabilidade. Apenas necessita de duas linhas de interface, uma para sincronismo e outra para transmissão de dados como é apresentado na Figura 75.

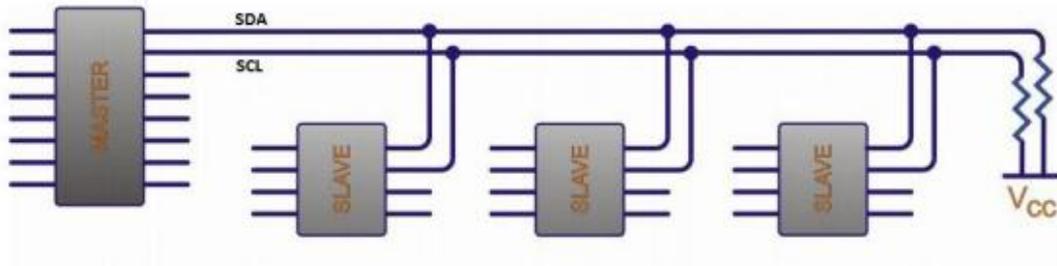


Figura 75 - Barramento I2C

Na prática o microcontrolador serve de master e o reóstato digital de slave. A comunicação entre os dois dispositivos é feita através do envio de uma trama que, de um modo geral contém o endereço do reóstato digital e o valor do step a definir na resistência.



Figura 76 - Trama I2C

A utilização do reóstato com I2C tem a vantagem da fiabilidade do processo e de permitir definir no momento o valor da resistência que se pretende, em vez de utilizar sucessivos incrementos até atingir o valor definido.

5.5 Conversor Step Up

Após elaboração do estudo teórico sobre os conversores e simulação deste no MPPT, optou-se por maximizar a eficiência, utilizando para isso o Max1676, um integrado específico, produzido pela maxim. A introdução deste integrado permite obter maior robustez e fiabilidade a todo o conversor, através da redução de perdas por aquecimento e controlo através da variação de resistências à saída do conversor, em vez de um controlo contínuo do mosfet de comutação. A escolha do Max1676 deveu-se essencialmente à relação de eficiência, possibilidade de controlo de uma corrente limite de 500mA e ainda trabalhar com tensões de arranque de 0,7V.

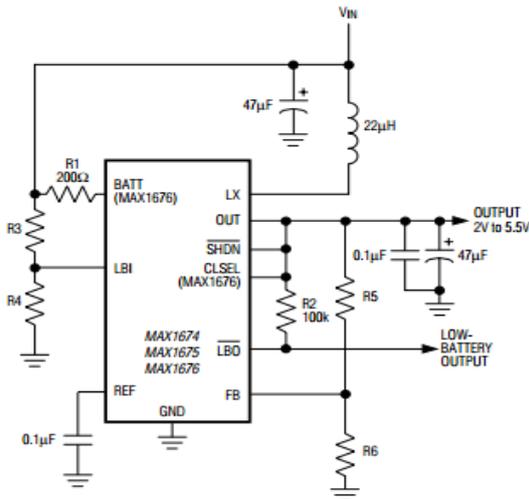


Figura 77 - Implementação do MAX1676

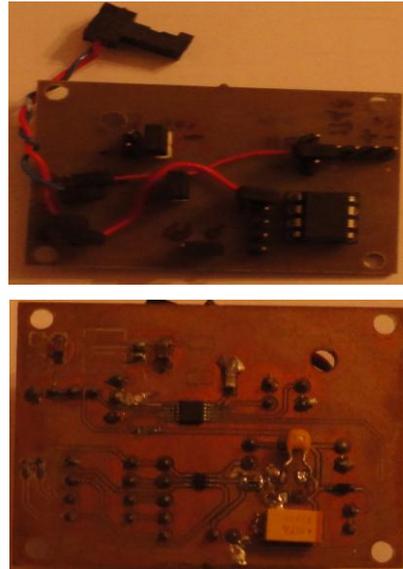


Figura 78 - Circuito de testes do MAX1676 com microcontrolador e reóstato digital

O conversor step up permite trabalhar em três modos distintos, dois onde as tensões de saída são fixas (3,3V e 5V) e uma variável, independentemente do valor da tensão de entrada. A obtenção dos 3,3V é feita através da colocação do pino de feedback à saída e para os 5V o mesmo pino é colocado à massa. Quando se pretende obter uma tensão na saída entre 2V e 5,5V deve-se ajustar o valor do divisor resistivo através da equação entre a saída, o feedback e a massa.

$$R_5 = R_6 \left(\frac{V_{out}}{1.3} - 1 \right) \quad (5.1)$$

Sabendo que será necessário o ajuste de tensão à saída do conversor para poder controlar a potência fornecida pelo painel fotovoltaico, torna-se essencial a utilização do modo variável, logo se depreende a necessidade do reóstato digital.

Tratando-se de comunicações de dados entre dois dispositivos, é sempre possível ocorrerem falhas em determinados momentos, logo torna-se essencial prevenir situações de perigo, garantindo uma resistência mínima entre os pontos de feedback e saída. Para tal, foi estabelecido que o conversor operará a partir de uma tensão mínima de 3V, o que permite minimizar a corrente em situações de subtensão. Por outro lado optou-se por utilizar uma tensão máxima de 5V, mesmo sabendo que a bateria apenas permite no máximo 4.3V devido a proteção incorporada, porém várias aplicações necessitam de 5V, passando a ser alimentados apenas pelo conversor e não pela bateria. Utilizando em R5 uma resistência de 84,5KΩ em série com o reóstato e em R6 uma

resistência de $64,9\text{K}\Omega$ obtém-se à saída uma tensão variável entre 3V e 5V consoante o valor introduzido pelo reóstato.

$$R_5 = R_6 \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right) \Leftrightarrow V_{out} = 1,3 \left(\frac{84500 + N * R_s}{64900} + 1 \right) \quad (5.3)$$

O conversor da Maxim pressupõe ainda a utilização de diversos componentes extra chip, para que se possa alterar as configurações básicas do conversor. De modo a garantir a maximização da eficiência, foram utilizados valores de componentes aconselhados pelo fabricante, alterando apenas as dimensões destes, para que possa satisfazer os objetivos de miniaturização e flexibilidade do protótipo.

Após interligação dos diversos componentes, nomeadamente, painel fotovoltaico, conversor e controlo, é possível testar a veracidade de todos os pressupostos assumidos até ao momento.

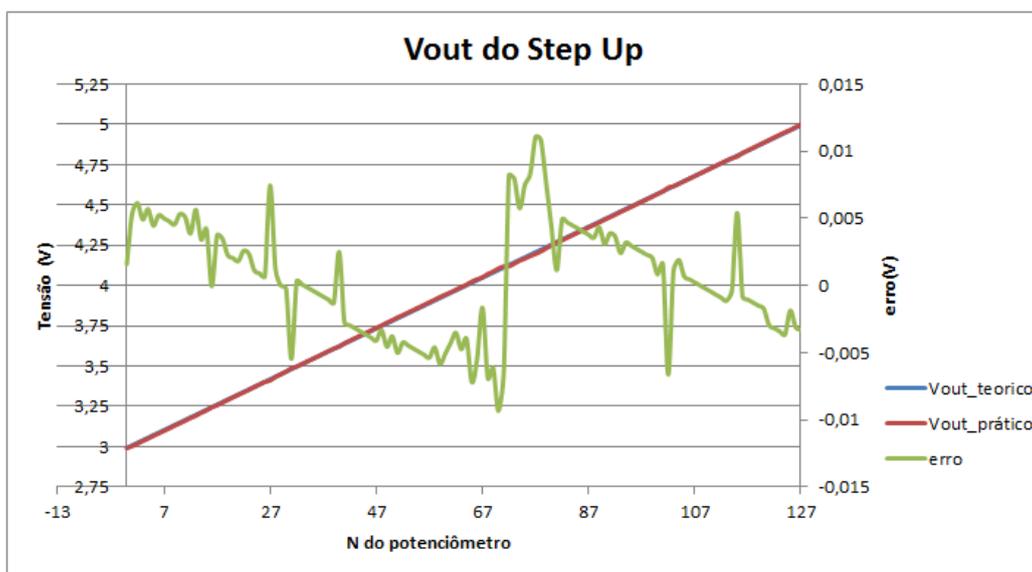


Figura 79 - Tensão de saída do conversor e erro apresentado relativamente aos valores teóricos esperados

Através da análise da Figura 79 é possível verificar os excelentes resultados obtidos na elevação da tensão, através da utilização do conversor MAX1676 em sintonia com o reóstato digital MCP4017T, pois a partir do erro é possível definir uma fiabilidade contínua, acima dos 99%.

5.6 MPPT

O processo de alimentação de uma carga e carregamento de uma bateria pressupõe a utilização da máxima potência disponível pelo painel fotovoltaico, de modo a maximizar a eficiência do sistema. A unidade de controlo deve centrar todos os seus esforços em recolher a máxima potência disponível pelo painel fotovoltaico e encaminhar esta carga sem que existam perdas relevantes.

A obtenção do ponto de máxima potência é feita através de sucessivas leituras da potência ou tensão em vazio, dependendo do método de controlo seleccionado. Definido um novo ponto, o ajuste da potência é feito através do microcontrolador, que altera a tensão à saída do conversor, variando a resistência do reóstato. Esta variação implicará também uma variação da potência disponibilizada pelo painel fotovoltaico.

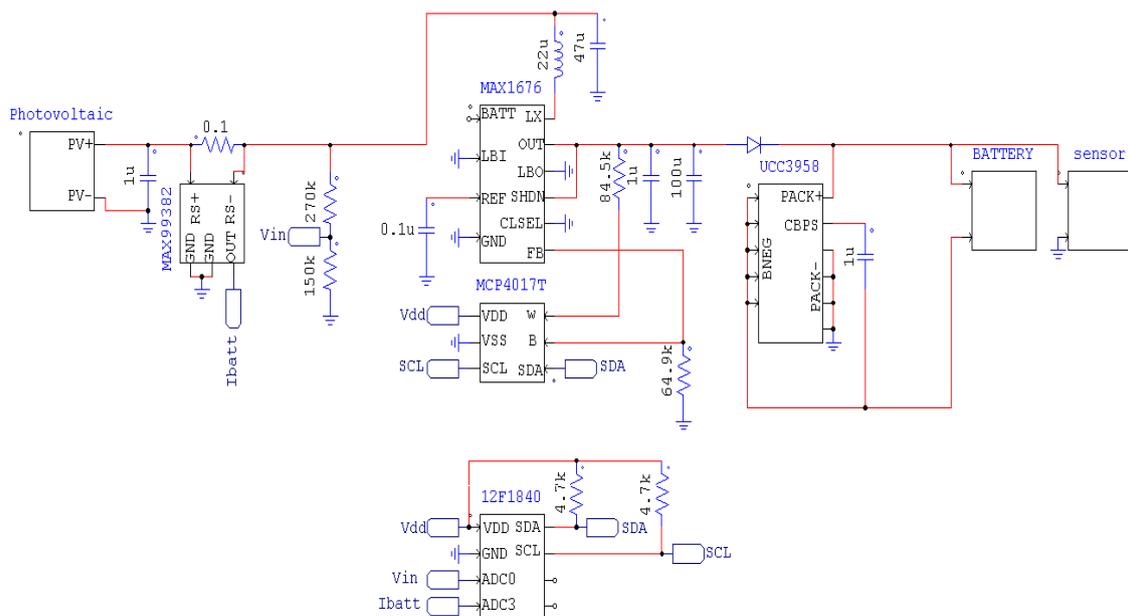


Figura 80 - Circuito MPPT implementado

A utilização do UCC3958 como elemento de protecção da bateria, garante o controlo de subtensões e sobretensões, porém não impede que esta forneça corrente ao conversor, quando o painel se encontra desativo ou com baixa potência. Logo, é necessário a inserção de um diodo em série com o circuito de carregamento que impeça o fornecimento de energia ao conversor através da bateria.



Figura 81 - Protótipo implementado e radiômetro

5.6.1 Seleção do método MPPT

A simulação descrita anteriormente no Capítulo 4 sobre os MPPTs, considerou os métodos de tensão constante e perturba e observa como sendo os mais indicados para sistemas de baixa potência. Considerando apenas os dois métodos, é necessário verificar qual o método que melhor se adequa ao projeto.

Para otimizar a análise, optou-se por utilizar um painel simulado através da colocação de uma fonte dc em série com uma resistência, o que garante que o ponto de máxima potência se situe sempre na metade do valor da tensão em vazio como é perceptível no gráfico da Figura 83.

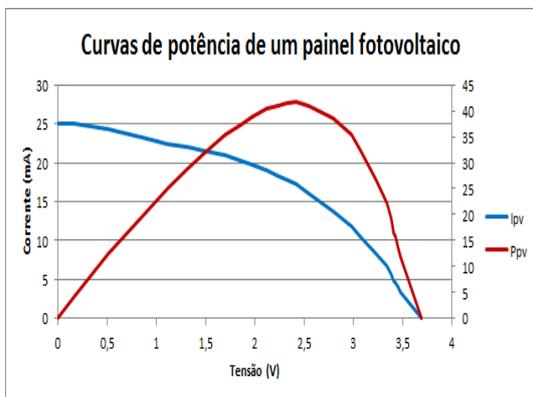


Figura 82 - Curva de potência de um painel fotovoltaico

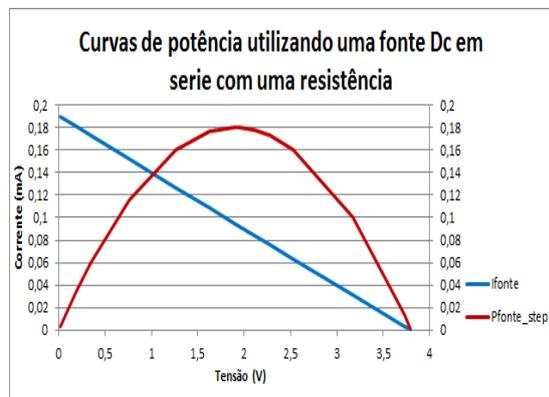


Figura 83 - Curva de potência utilizando fonte dc em serie com uma resistência, para simular o painel fotovoltaico

Utilizando a fonte dc em serie com uma resistência de 10Ω procedeu-se aos ensaios do MPPT, utilizando os dois métodos identificados anteriormente. Os testes efetuados, visavam colocar o painel a funcionar na máxima potência ($V_{in} = 0.5 \cdot V_{oc}$ da fonte) enquanto o conversor alimentava uma carga em paralelo com a bateria. Inicialmente utilizou-se o método perturba e observa para obtenção da máxima potencia, porém rápido se percebeu a dificuldade que este método apresentava em atingir a máxima potência. Nestas condições o painel oscilava entre os 1.09V e os 2.43V.

Efetuuou-se então uma análise ao comportamento do circuito à entrada e à saída do conversor, de modo a determinar os motivos da oscilação.

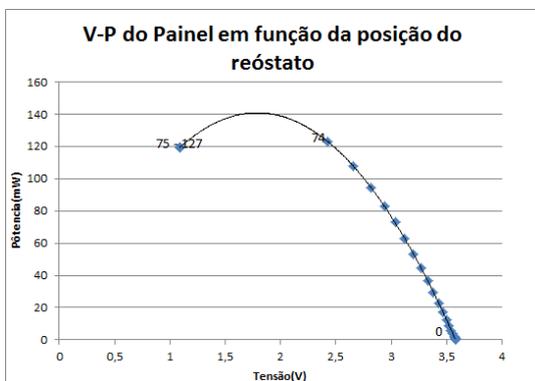


Figura 84 - Potência à entrada do conversor em função da posição do reóstato

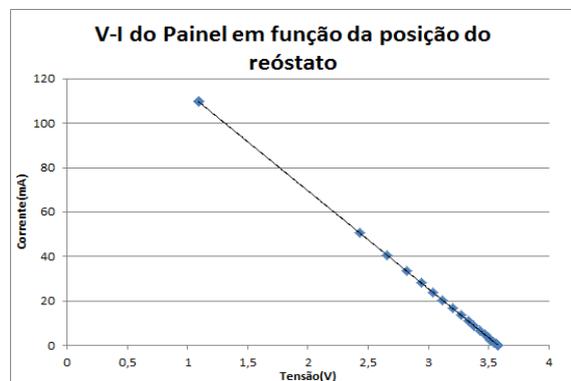


Figura 85 - Corrente à entrada do conversor em função da posição do reóstato

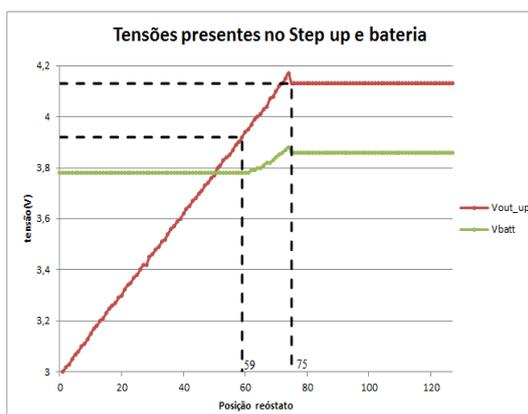


Figura 86 - Variação das tensões à saída do step up e na bateria

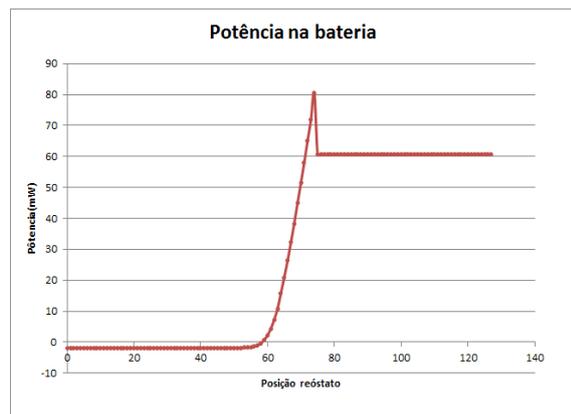


Figura 87 - Potência fornecida à bateria em função da posição do reóstato

A Figura 84 e Figura 85 mostram a corrente e potência fornecidas pelo painel (fonte em serie com resistência) ao conversor, em função da tensão que é alcançada através da variação do reóstato. Nas Figura 86 e Figura 87 é demonstrada a influência do reóstato na tensão e potência da bateria. O simples posicionamento do reóstato provoca uma variação não linear da potência

disponibilizada pelo painel fotovoltaico, como é perceptível na Figura 84, impedindo assim que este se consiga fixar na máxima potência. Obtendo assim dois pontos em torno da máxima potência (1.09V e 2.43V), porém, encontram-se muito distantes da tensão de máxima potência, pelo que um controlo lento não consegue obter resultados satisfatórios. Logo torna-se necessário, elaborar um controlo rápido que comute entre os dois pontos mais próximos, de uma forma eficiente. A utilização de um controlo rápido no perturba e observa apresenta elevados consumos, devido ao numero de cálculos inerentes ao processo, pelo que se torna evidente a inviabilidade do método.

5.6.2 MPPT Tensão Constante

Identificado o problema de processamento, torna-se óbvio a utilização de um algoritmo mais simples, de modo a garantir fiabilidade ao sistema. As qualidades evidenciadas pelo método da tensão constante fazem deste, a melhor solução para o desenvolvimento do protótipo.

A leitura da tensão em vazio pode ser feita através do controlo do conversor, pois pela análise dos gráficos da Figura 85 é possível identificar pontos onde a corrente é praticamente nula. Sempre que a tensão à saída do conversor seja inferior à tensão na bateria, a carga é desligada, colocando o painel a alimentar apenas o step up, o que representa um fornecimento energético por parte deste, praticamente nulo. Os restantes componentes passam a ser alimentados pela bateria como é perceptível na Figura 87.

Sendo este um método, que necessita de um conhecimento prévio do painel fotovoltaico, para determinação da constante de multiplicação, é necessário uma análise das curvas características para poder proceder ao melhor controlo possível.

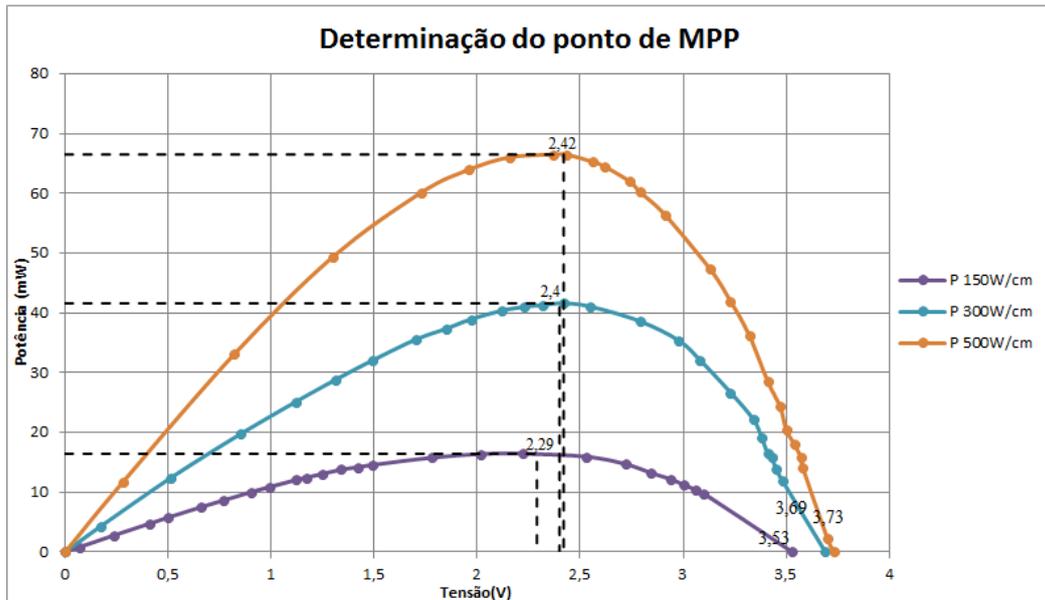


Figura 88 - Definição do ponto de MPP através da tensão em vazio

Vários fabricantes preconizam que a constante de multiplicação do método tensão constante deve ser entre os 0,75 e 0,80, porém, após uma análise cuidada das características do painel, é possível perceber que esse valor deverá ser de 0,65. Na Figura 88 podemos perceber que o valor 0,65 satisfaz toda a gama de radiações, mesmo para radiações baixas onde a potência varia pouco.

5.6.3 Resultados

A análise dos componentes em conjunto com os conhecimentos adquiridos através das simulações permitiu concluir todo o processo de extração da máxima potência disponível.

De modo a definir o funcionamento do circuito e principalmente do controlo efetuado, foram realizados diversos testes com recurso à fonte dc e painel fotovoltaico, onde se pretendia verificar a obtenção e fixação do ponto de máxima potência.

A utilização de uma fonte dc permite perceber como reage o método para uma gama ampla de tensões em circuito aberto e verificar assim, a possibilidade de utilizar outros painéis fotovoltaicos com características um pouco diferentes do selecionado. Para obtenção do ponto de máxima potência foi utilizado um fator de multiplicação de 0,5, o que garante sempre a obtenção da máxima potência numa fonte dc linear como a utilizada.

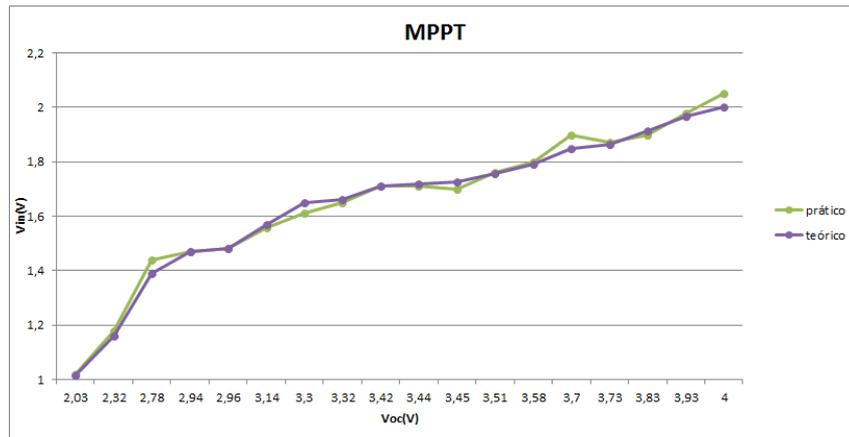


Figura 89 - Teste do MPPT com recurso a fonte DC

A Figura 89 mostra a tensão de entrada em que o circuito MPPT se fixou (V_{in}), em função da tensão em aberto da fonte de tensão utilizada (V_{oc}). Os resultados experimentais e os resultados teóricos esperáveis são apresentados no mesmo gráfico. Note-se que a tensão V_{in} teórica não é exatamente 50% da tensão V_{oc} , devido à resolução do reóstato. A Figura 89 permite perceber a ajustabilidade que o método possui, pois consegue manter-se fiável mesmo a tensões em aberto de 2V, o que significa que o step up passa a ser alimentado com apenas 1V de tensão no ponto de máxima potência.

Após verificação da fiabilidade do método através da fonte dc, devem ser efetuados testes utilizando o painel fotovoltaico (MP3-37), comprovando assim a sua operacionalidade. Conforme foi verificado anteriormente, o painel apresenta uma constante de multiplicidade de 0.65, pelo que, o algoritmo é modificado segundo esta característica. Os testes foram efetuados segundo várias tensões em circuito aberto (variação da radiação e temperatura), de modo a perceber a ajustabilidade do método.

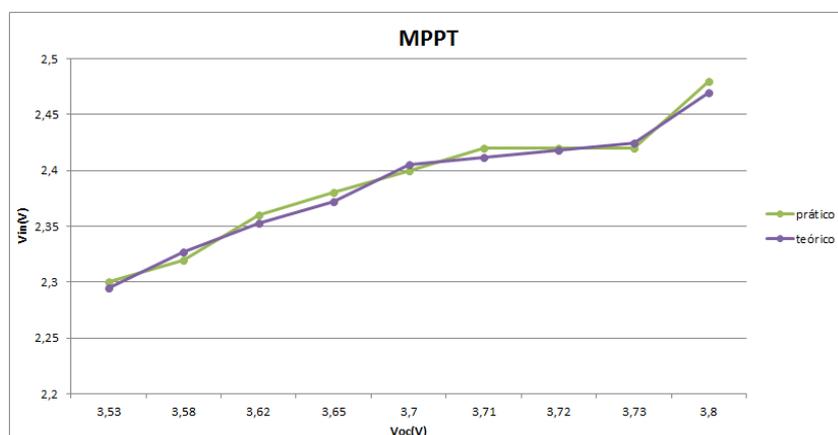


Figura 90 - Teste do MPPT utilizando o painel MP3-37

Na Figura 90 é demonstrada a tensão de entrada teórica e experimental do circuito MPPT, em função da tensão em aberto do painel fotovoltaico (V_{oc}). Conforme seria de esperar, o método consegue verificar as variações de radiação e temperatura através da tensão em aberto e proceder à variação da potência, consoante a tensão de máxima potência. Porém, é possível identificar algumas discrepâncias que se devem a resolução do reóstato.

5.7 Carregador de baterias

A longevidade dos sistemas autónomos prende-se essencialmente com o uso de baterias recarregáveis, logo é necessário introduzir processos de recarga eficientes que possibilitem alongar a sua vida útil. Para tal, é necessário monitorizar periodicamente o estado da bateria, de modo a determinar as necessidades da bateria e evitar que esta se descarregue para valores prejudiciais à sua vida. O circuito de controlo e carregamento de uma bateria incorporando o MPPT é demonstrado na Figura 91.

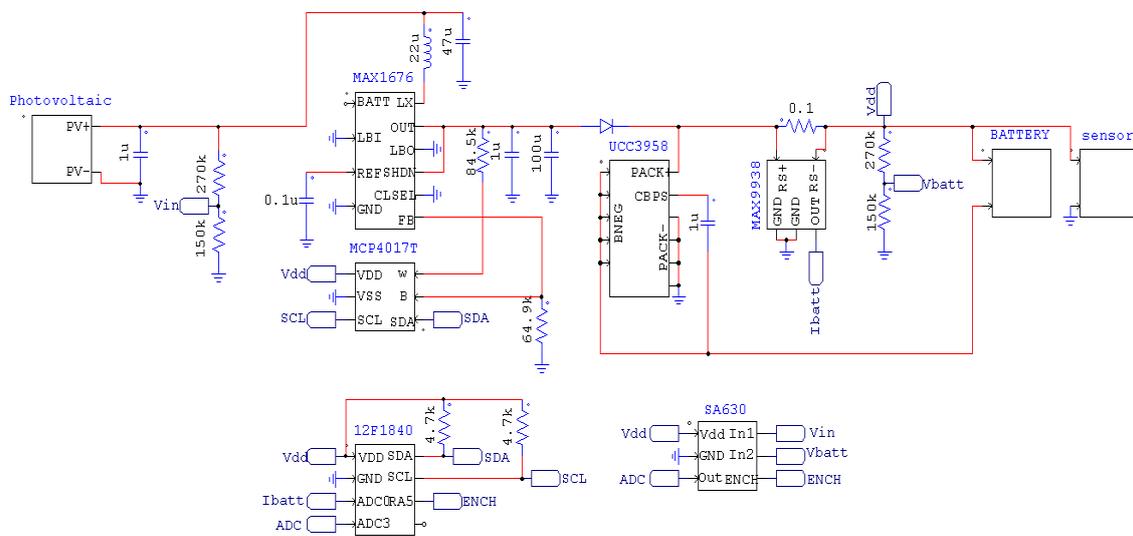


Figura 91 - Circuito de carregamento de uma bateria implementado

A utilização do PIC12LF1840 como microcontrolador apresenta a desvantagem de integrar dois dos seus quatro canais ADC com os portos de comunicação I2C, o que representa uma falta de canais ADC para operar o controlo da bateria e circuito de extração da máxima potência. Como solução optou-se por utilizar um switch comandado pelo microcontrolador, que define qual o sinal a ler e em que momento.

5.7.1 Algoritmo de controlo

O algoritmo deve monitorizar constantemente o estado da bateria e identificar as suas necessidades. Nos sistemas autónomos a bateria está constantemente a ser carregada com a energia proveniente do painel fotovoltaico e excedente para alimentar a carga, porém neste caso não é definido nenhum plano de recarga. O processo de recarga só é ativado quando a tensão nos seus terminais ultrapassar um determinado limite mínimo, de modo a não danificar a bateria.

No caso da bateria PGEB016144 o processo de recarga deve ser ativado sempre que a sua tensão seja inferior a 3V e terminado quando a corrente de carga seja aproximadamente zero.

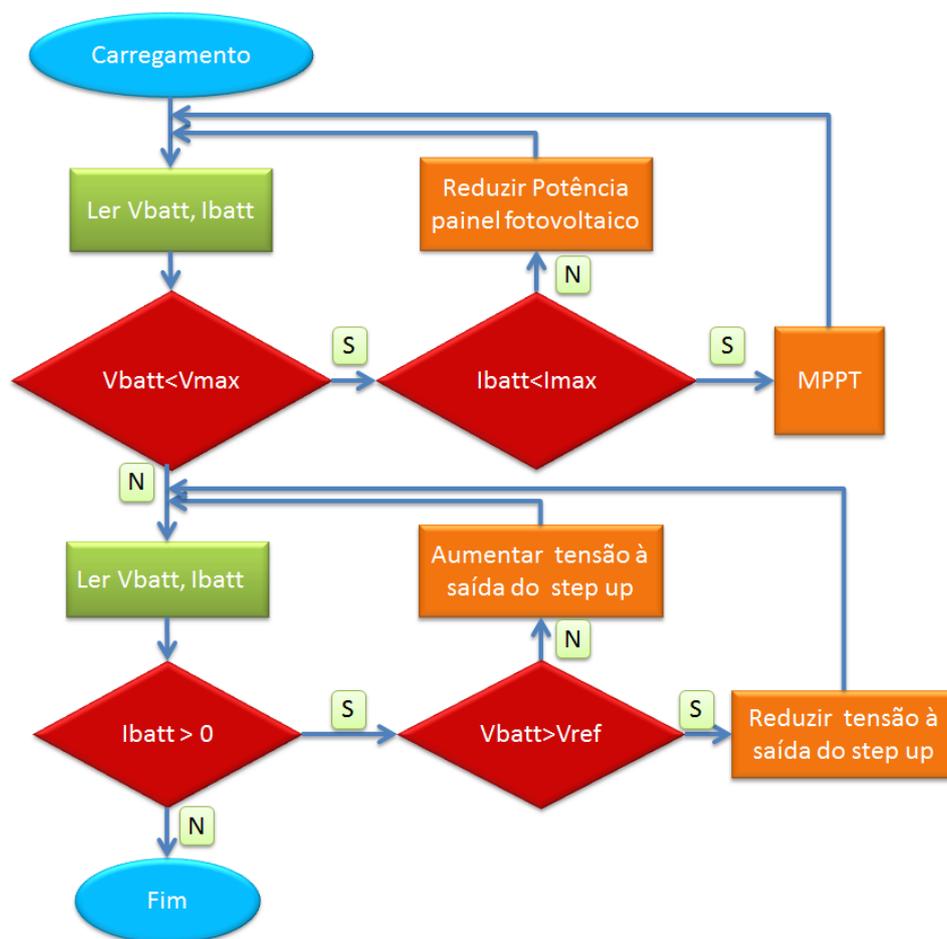


Figura 92 - Algoritmo de carregamento implementado

A utilização do microcontrolador para gerir o carregamento, permite ajustar idealmente todos os parâmetros de carregamento, permitindo assim com o mesmo carregador, carregar várias baterias de polímero de lítio.

A primeira fase consiste em aplicar uma corrente constante (0.1C - 1C) até que a tensão aos terminais da bateria atinga os 4.2V. Após atingir a tensão, estima-se que a bateria esteja carregada 80%, logo é necessário monitorizar a tensão aos seus terminais até que a corrente de recarga desapareça.

5.7.2 Resultados

Após a bateria atingir uma tensão inferior à 3V, o que significa que esta se encontra descarregada, procedeu-se ao carregamento da bateria, tendo em conta o seu plano de carga. A utilização de uma bateria de 200mAh preconizava uma carga de corrente contínua de 200mAh (1C), porem o carregamento apenas foi efetuado com 21mAh devido as características do painel fotovoltaico. Como resultado da utilização de uma corrente contínua de 21mAh (aproximadamente 0.1C) é esperado um plano de carga superior a 10horas. Para não proceder a carregamentos faseados (a radiação de um dia, utilizando o painel MP3-37 não consegue carregar a bateria disponível, de 200mAh) optou-se por utilizar novamente a fonte com a resistência em serie. Na Figura 93 é apresentada as leituras efetuadas durante o carregamento e os resultados do plano de carga são descritos na Figura 94.



Figura 93 - Corrente de carga (multímetro da esquerda), Tensão na bateria (multímetro da direita) e controlo de Corrente no reóstato

Na Figura 93 são descritas as leituras do carregador através dos multímetros e atuação no reóstato digital do osciloscópio. Nas duas imagens são apresentadas correntes inferiores a 21mA,

isto acontece devido ao controlo não conseguir estabilizar por completo a corrente, obtendo uma variação máxima de 0.5mA.

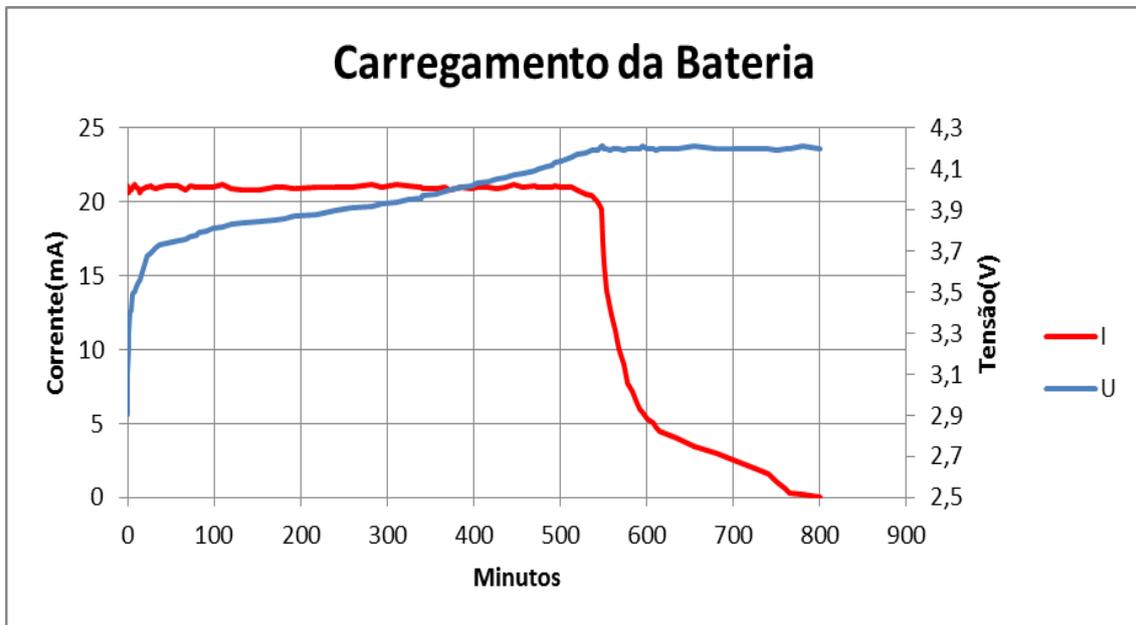


Figura 94 - Carregamento da bateria PGEB016144

Como é perceptível, o step up consegue impor uma corrente de carga constante, contendo apenas oscilações muito reduzidas. Pelo gráfico da Figura 94 é fácil de perceber a evolução da bateria, pois num primeiro instante esta, ressent-se bastante, provocando um aumento de tensão instantâneo até aos 3.4V e de seguida vai progredindo quase linearmente até aos 4.2V. No momento em que esta atinge a tensão máxima o controlo gere apenas a tensão na bateria (4.2V), provocando de imediato uma quebra na corrente consumida, que tende a extinguir-se ao longo que a bateria atingia a plenitude.

O plano de carregamento teve uma duração de sensivelmente 13.5h dividida nas duas etapas de carga, 9h de corrente constante e 4.5h de tensão constante.

5.8 Alimentação de dispositivos eletrónicos

O sistema autónomo proposto contemplava o carregamento da bateria e alimentação de um dispositivo eletrónico (sensor) através do painel fotovoltaico ou bateria consoante as necessidades. Em primeiro lugar, o dispositivo é sempre alimentado pelo painel fotovoltaico e só em casos de necessidade é que a bateria se tornava uma fonte de energia para o dispositivo. Para demonstrar o efeito utilizou-se uma carga variável à saída, e verificou-se as variações das correntes na carga, na

bateria e à saída do step up (Figura 95). Durante todo o processo o sistema operava segundo a extração da máxima potência.

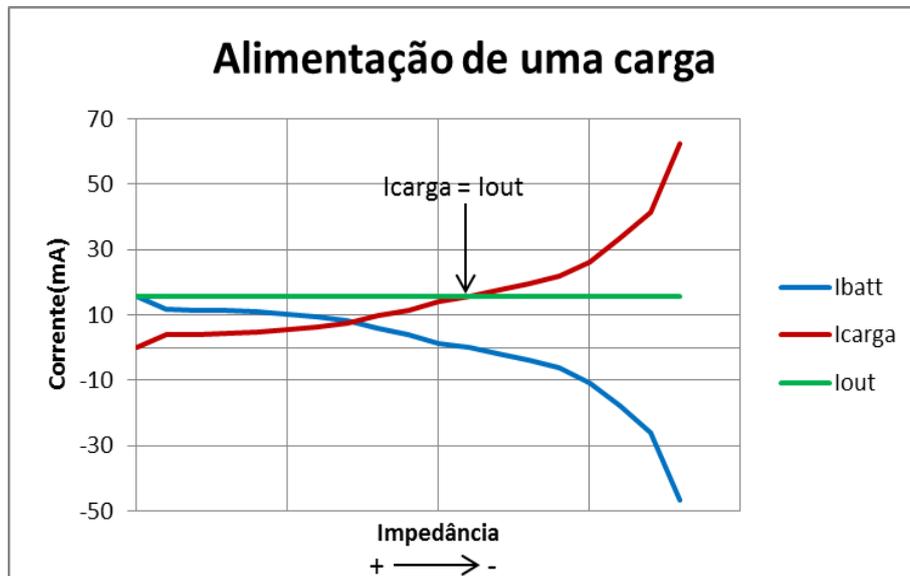


Figura 95 - Alimentação de uma carga através do painel fotovoltaico e da bateria

Enquanto a carga consumia pouca corrente o painel foi capaz de a alimentar e ainda fornecer a bateria como é visível no gráfico. A partir do momento em que a carga pede mais corrente que a que o painel fotovoltaico pode fornecer, a bateria passa também a gerar energia para a carga, fornecendo assim o restante que o painel fotovoltaico não consegue gerar.

5.9 Eficiência

O sucesso de uma aplicação deve ser visto segundo varios pontos, desde a materialização dos objectivos até à eficiencia com que se consegue essa materialização.

A utilização de componentes electrónicos infere sobre o sistema uma quebra de eficiência significativa. Se por um lado existem quebras constantes devido à utilização de diodos, resistências e microcontroladores, a introdução de um chip como step up, alimentado através da corrente de entrada, implica perdas variantes consoante as tensões e correntes de entrada (Figura 96 e Figura 97).

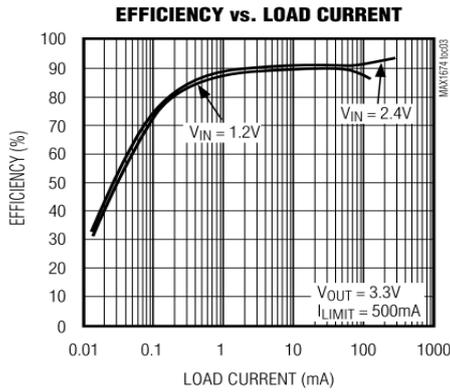


Figura 96 - Eficiência do MAX1676 para uma tensão de saída constante de 3.3V

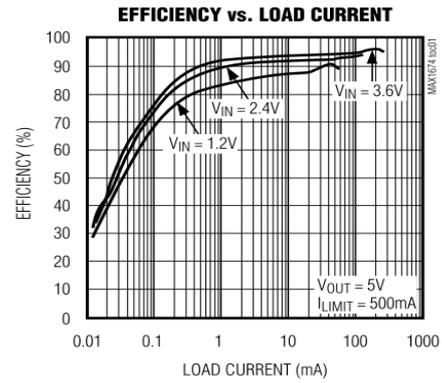


Figura 97 - Eficiência do MAX1676 para uma tensão de saída constante de 5V

Quanto maior for a corrente e tensão de entrada, melhor será o comportamento do conversor. Os gráficos apresentados representam as variações de eficiência para tensões de saída constante, porém a utilização de uma tensão variável como é descrito no subcapítulo 5.5 provocará um decréscimo de eficiência quando comparado com os gráficos apresentados nas Figura 96 e Figura 97.

Para determinar a eficiência do sistema, basta proceder ao carregamento simples da bateria através do painel fotovoltaico e verificar os valores de potência presentes na entrada do conversor e à saída deste.

De modo a quantificar exatamente o seu valor, utilizou-se novamente a fonte dc em série com a resistência. Procedeu-se a um aumento da tensão de saída do conversor desde os 3.92V (tensão da bateria + queda no diodo de proteção) até aos 4.17V (valor máximo permitido pela bateria) e verificou-se o comportamento das tensões e correntes na entrada e saída do conversor. As curvas de eficiência são apresentadas na Figura 98.

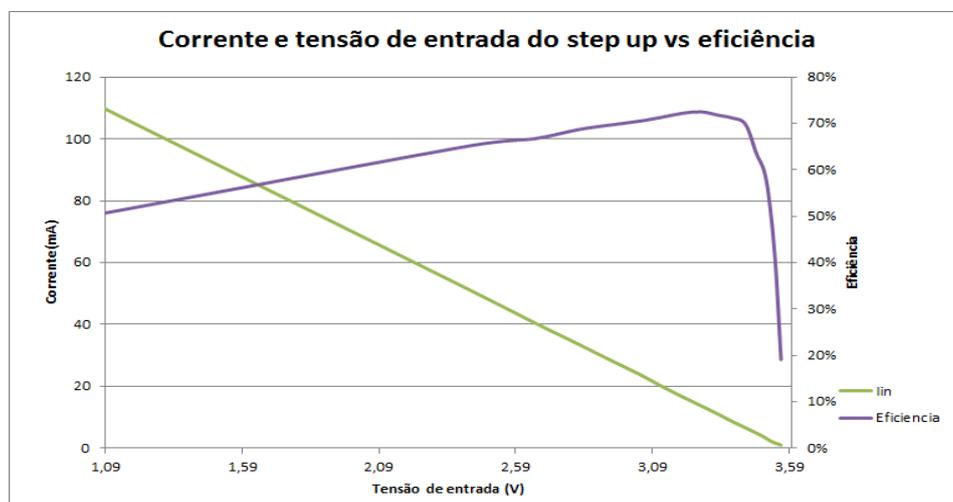


Figura 98 - Eficiência do Step up controlado

Na Figura 98 é representada a corrente de entrada no conversor em função da tensão de entrada e a eficiência alcançada nessas condições. O conversor microcontrolado com todos os sensores em funcionamento consegue obter uma eficiência máxima de 72%. Considerando o regime de máxima potência do painel, ou seja quando este opera perto dos 2,4V de tensão, apenas é conseguida uma eficiência de 66%, o que significa que o sistema não obtém a máxima eficiência quando o painel opera na sua região de máxima potência.

Pela análise dos gráficos das Figura 96 e Figura 97 é possível concluir que o step up provoca um decréscimo de eficiência perto dos 10%, logo as restantes perdas são originárias dos componentes eletrónicos, em particular do microcontrolador e diodo de proteção.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

A tese de Mestrado apresentada tem como objetivo principal, o desenvolvimento de um sistema autónomo para alimentar dispositivos eletrónicos, utilizando a energia fotovoltaica.

Numa primeira fase optou-se por elaborar um estudo introdutório sobre todos os componentes constituintes de um sistema autónomo, nomeadamente, as células fotovoltaicas, as baterias, os conversores dc-dc e circuitos de extração da máxima potência de modo a obter os fundamentos teóricos necessários para proceder a escolha e desenvolvimento destes. A utilização do painel fotovoltaico MP3-37 da PowerFilm com uma tensão nominal de 3V e da bateria PGEb016144 de polímero de lítio da PowerStream com 3,7V de tensão nominal, ambas flexíveis, impôs a utilização de um conversor elevador, optando-se assim pelo step up, devido a sua simplicidade e eficiência.

A segunda fase comportou uma análise detalhada dos diversos métodos de procura da máxima potência, através da simulação computacional. Utilizando o PSIM foi possível comparar os métodos, através da eficiência demonstrada em condições ideais, e perceber as vantagens que os métodos tensão constante e perturba e observa apresentam para sistemas autónomos de baixa potência.

A terceira e última fase constituiu na implementação do protótipo, atendendo sempre à flexibilidade e dimensão deste. A utilização do método tensão constante, na procura da máxima potência revelou-se ser o mais indicado, devido ao menor consumo energético ao nível de processamento e à utilização de um único sensor afeto ao MPPT. Apesar de muitos autores preconizarem a utilização de um fator de multiplicação entre os 0,75 e 0,8, os testes efetuados ao painel fotovoltaico adquiridos comprovaram a necessidade de utilizar um fator de 0,65, isto é, a tensão do painel no ponto de máxima potência é 65% da tensão em vazio. No que diz respeito ao carregamento da bateria, este foi alcançado utilizando o algoritmo de carga, corrente constante (só varia caso as condições de luminosidade proporcionem menos corrente) seguido de tensão constante (se a potência disponível o permitir), em sintonia com o MPPT. O carregamento da bateria, utilizando uma corrente constante de 21mA (0.1C) foi conseguido após um período de

carga de 13 horas. A utilização de um período de carga longo, sugere que a capacidade da bateria é demasiado grande para a potência que o painel fotovoltaico disponibiliza, por isso, num processo comercial a utilização de uma bateria com menor capacidade torna-se mais adequado.

No desenvolvimento do sistema autónomo considerou-se o uso da energia fotovoltaica como fonte primária, proporcionando assim alimentar o dispositivo eletrónico através do painel, em vez de a utilizar única e exclusivamente para carregar a bateria, como a maioria dos sistemas autónomos. Este procedimento apresenta um aumento de eficiência a longo prazo, pois, proporciona menor desgaste da bateria e como tal intervalos de carregamento maiores.

O uso de um controlo digital proporcionou a utilização de um MPPT real, permitindo assim, extrair a cada momento a máxima potência disponível, porém, com perdas de eficiência assinaláveis. Obteve-se uma eficiência máxima de 72%, no entanto, no ponto de máxima potencia apenas é atingida uma eficiência de 66%. Assim sendo, o uso de microcontroladores e por consequente MPPT real, em sistemas autónomos de baixa potência, não se apresenta como a melhor solução, sendo preferível recorrer a sistemas analógicos / digitais dedicados para proceder ao gerenciamento da energia.

Feita uma apreciação global, é possível concluir que todos os objetivos foram alcançados com sucesso, culminado assim no desenvolvimento de um sistema autónomo de alimentação de dispositivos eletrónicos.

6.2 Propostas de trabalho futuro

Apesar do sistema autónomo desenvolvido funcionar na sua plenitude, considera-se que, existem alguns aspetos que poderiam ser melhorados, potencializando ainda mais o sistema autónomo desenvolvido. Como tal são apresentadas algumas propostas que visam incrementar as qualidades do protótipo desenvolvido.

- Utilização de um microcontrolador com maior eficiência, que possa incluir a aplicação, além do sistema de gestão de energia. A título de exemplo é sugerido a integração do SI1000 da Silicon Labs.
- Substituição da bateria por outra com menor capacidade, minimizando o tempo de carga.
- Integração dos módulos existentes (painel fotovoltaico, bateria e circuito eletrónico) num único substrato flexível.
- Utilizar um conversor ajustável através do duty cycle em vez da tensão de saída.

Referências Bibliográficas

- [1] E. Becquerel, “Memoires sur les effets electriques produits sous l’influence des rayons,” *Comptes Rendues*, vol. 9, p. 561, 1839.
- [2] R. . Adams, W.G. and Day, “The action of light on selenium,” *Proceedings of the Royal Society*, vol. A25, p. 113, 1877.
- [3] “History of Solar Panels and Photovoltaic Phenomena,” 2011. [Online]. Available: <http://www.solar-energy-advantages-blog.com/solar-wind-power/newsworthy/history-of-solar-panels-and-photovoltaic-phenomena>. [Accessed: 02-Jun-2012].
- [4] and G. L. P. D. M. Chapin, C. S. Fuller, “A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power,” *Journal of Applied Physics*, vol. 25, pp. 676-677, 1954.
- [5] G. L. Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, “Solar Energy Converting Apparatus,” *Patent US2780765*, 1957.
- [6] M. B. Prince, “Silicons Solar Energy Converters,” *Journal of Applied Physics*, vol. 26, pp. 534-540, 1955.
- [7] M. M. Koltun, “History of solar cell development in the Soviet space program and the terrestrial potential for this technology,” *Solar Energy Materials and Solar cells*, vol. 44, pp. 293-317, 1996.
- [8] J. H. Mandelkorn, J. and Lamneck, “Simplified fabrication of back surface electric filed silicon cell and novel characteristics of such cells,” *Proceedings 9th IEEE PSC, Silver Spring*, p. 66, 1972.
- [9] M. A. et al. Green, “Improvements in silicon solar cell efficiency,” *Proceedings 18th IEEE PVSC*, p. 39, 1985.
- [10] R. A. et al. Sinton, “Silicon point contact concentrator solar cells,” *Proceedings 18th IEEE PVSC*, p. 61, 1985.
- [11] F. Biccari, “CdTe solar cells Cadmium telluride (CdTe),” 2012.
- [12] L. P. Everton Silva, Gustavo Pétris, “TUTORIAL DE CÉLULA SOLAR,” 2008.
- [13] “Research Cell Efficiency Records,” 2012. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/ncpv/>.
- [14] A. Volta, “On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds,” *Philosophical Magazine*, pp. 289-311, 1800.
- [15] L. Galvani, “De viribus electricitatis in motu musculari commentarius,” *Health Sciences*, p. 152, 1791.

- [16] “Who Invented Batteries?,” *The Gemini Geek*. [Online]. Available: <http://www.thegeminigeek.com/who-invented-batteries/>. [Accessed: 05-May-2012].
- [17] “Gaston Planté (1834-1889),” *Corrosion Doctors*. [Online]. Available: <http://www.corrosion-doctors.org/Biographies/PlantelBio.htm>. [Accessed: 05-May-2012].
- [18] “Georges Leclanché (1839-1882),” *Corrosion Doctors*. [Online]. Available: <http://corrosion-doctors.org/Biographies/LeclancheBio.htm>. [Accessed: 05-May-2012].
- [19] Isidor Buchmann, “Batteries in a portable world,” *Cadex Electronics Inc.*, 1997.
- [20] Carl Gassner, “Galvanic Battery,” 1887.
- [21] “The history of the battery,” *Battery Association of Japan*, 2010. [Online]. Available: <http://www.baj.or.jp/e/knowledge/history03.html>. [Accessed: 06-May-2012].
- [22] T. M. Pires, Marco Túlio, “A evolução das baterias,” *Veja*. [Online]. Available: <http://veja.abril.com.br/infograficos/historia-das-baterias/>. [Accessed: 02-Apr-2012].
- [23] L. Lopes, “Evolução dos materiais poliméricos,” *1º Semana de Polímeros (IMA/UFRJ)*, 2007.
- [24] C. Corporation, “EnerChip™ Smart Solid State Batteries,” *Cymbet Corporation*, 2009. [Online]. Available: <http://www.cymbet.com/products/enerchip-solid-state-batteries.php>. [Accessed: 01-Apr-2012].
- [25] “Manual das Baterias Recarregáveis , Pilhas e Carregadores,” *Sta Electronica*.
- [26] “How Lead Acid Batteries Work,” *von Wentzel*, 2008. [Online]. Available: <http://www.vonwentzel.net/Battery/00.Glossary/index.html>. [Accessed: 01-Mar-2012].
- [27] F. S. João Costa, Adriana Amorim, José Ferreira, André Gonçalves, Tiago Gomes, “Tecnologias de Baterias,” *Energias Renováveis*, 2010.
- [28] L. N. F. D. QUEIROGA, “Célula de Níquel e Cádmió,” *SEMINÁRIO DE FÍSICO QUÍMICA II*, 2009.
- [29] R. Pedro, “Baterias: Tecnologias, aplicações e características,” *SEKC: Smart Electric KartCross*, 2010. [Online]. Available: <http://electrickartcross.blogspot.pt/2010/11/baterias-tecnologias-aplicacoes-e.html>. [Accessed: 17-Feb-2012].
- [30] “Experimental Rechargeable Batteries,” *Battery University*, 2011. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries. [Accessed: 20-May-2012].
- [31] “Batteries for Mobile Robots,” *FU-Fighters*. [Online]. Available: <http://robocup.mi.fu-berlin.de/buch/chap6/ComparisonBattery.html>. [Accessed: 20-Jan-2012].
- [32] P. Fiorini, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Vullers, “Micropower energy scavenging,” *ESSDERC 2008 - 38th European Solid-State Device Research Conference*, pp. 4-9, 2008.

- [33] Coalesenses, "iSense Solar Power Harvesting System User Guide," .
- [34] G. Chen et al., "Millimeter-scale nearly perpetual sensor system with stacked battery and solar cells," *2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, pp. 288-289, Feb. 2010.
- [35] "Solar & Alternative Energy," 2010. [Online]. Available: <http://spie.org/x40036.xml>. [Accessed: 04-May-2012].
- [36] G. Chen et al., "17.6 A Cubic-Millimeter Energy-Autonomous Wireless Intraocular Pressure Monitor," pp. 138-139, 2011.
- [37] J. M. S. Gomes, "Power-Film: Um filme flexível autónomo para alimentar dispositivos elétricos," 2012.
- [38] S. Labs, "Energy Harvesting Reference Design User's Guide," no. 200 lx. pp. 1-12, 2011.
- [39] T. Instruments, "eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting Development Tool," 2009.
- [40] C. Corporation, "EnerChip™ EH CBC5300," pp. 1-11, 2009.
- [41] L. S. Pereira, "Dopagem Eletrônica," 2010. [Online]. Available: <http://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>. [Accessed: 17-Nov-2011].
- [42] A. F. . A. F. . D. N. A. . L. A. M. L. and S. M, "Parameters Estimation for A Model of Photovoltaic Panels," in *in XIX IMEKO World Congress of Fundamental and Applied Metrology*, 2009.
- [43] N. H. and L. Sbita, "A New DTC-SPMSM Drive Scheme for PV Pumping System," *International Journal of Systems Control*, vol. 1, pp. 113-121, 2010.
- [44] "Modelo equivalente." [Online]. Available: <http://sites-final.uclouvain.be/e-lee/PO/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Modele.htm>. [Accessed: 20-Apr-2012].
- [45] J. Imhoff, "Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos," 2007.
- [46] F. L. K. C. Luís Roriz, João Rosendo, *Energia solar em edifícios*. 2010.
- [47] P. Patrício, "Rendimentos termodinâmicos das células fotovoltaicas," 2006.
- [48] P. J. D. S. BONIFÁCIO, "Seguidor fotovoltaico: uma variação do P & O - simulação e prototipagem," 2010.
- [49] J. S. Date, "What is Luminous intensity?," *Ledke Technology*, 2010. [Online]. Available: <http://www.ledke.com/news/What-is-Luminous-intensity-Definition.html>. [Accessed: 07-Sep-2012].

- [50] M. Assun, “Seguidor de Potência Máxima para Sistema Fotovoltaico com Conversor Matricial,” 2011.
- [51] A. Noemaun, C. Chan, and E. F. Schubert, “absorption coefficient,” pp. 1-4.
- [52] N. Bocchi, L. Carlos, and S. Regina, “Pilhas e Baterias: Funcionamento e impacto ambiental,” 2000.
- [53] “Equilíbrio de Oxidação–Redução,” *Química 12^a ano*, pp. 1-4.
- [54] R. A. S. Gomes, “Batista Fabrico e Caraterização de Baterias Recarregáveis de Lítio em Estado Sólido,” 2011.
- [55] J. P. Q. Rodrigues, “Gestão inteligente da carga das baterias de um robô futebolista,” 2011.
- [56] “Realizing the World’s First Electrolytic Solution Performance in Solid Form at Room Temperature for Use in Batteries,” *Spring8*, 2009. [Online]. Available: http://www.spring8.or.jp/en/news_publications/press_release/2009/090518. [Accessed: 02-Jun-2012].
- [57] L. G. Rodrigues, “Estudo e desenvolvimento de um conversor ds-dc de topologia buck para aplicação aeroespacial,” 2007.
- [58] W. R. Ned Mohan, Tore Undeland, *Power Electronics - Converters, Applications and Design*. .
- [59] J. M. D. Costa, “Electrónica de potência II,” no. Capítulo 2, pp. 42-100, 2000.
- [60] L. GENERAL ELECTRONICS BATTERY CO., “Product Specification for Polymer Lithium-ion Battery,” pp. 1-7, 2007.
- [61] PowerStream, “Ultrathin Rechargeable Lithium Polymer Batteries from PowerStream.” [Online]. Available: <http://www.powerstream.com/thin-lithium-ion.htm>. [Accessed: 05-Oct-2011].
- [62] B. Diagram, “Single Cell Lithium-Ion Battery Protection Circuit,” pp. 1-8.
- [63] “Thin, Flexible Solar Panels ‘Keeping the power on with PowerFilm’.”[Online]. Available: <http://www.powerfilmsolar.com/products/oem/mp3-37>. [Accessed: 20-Dec-2011].
- [64] M. T. Inc, *datasheet Pic12(L)F1840*, vol. 12, no. L. 2011.