

## Agradecimentos

Ao Professor Doutor Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas, meu orientador pela sua orientação, disponibilidade, dedicação e pelas várias sugestões dadas durante esta dissertação.

À Vera Figueiredo, minha namorada por todo o apoio que me deu ao longo de todo o curso, paciência e compreensão.

Aos meus colegas de laboratório Alcides Gonçalves, Carlos Silva e Daniel Santos, pela convivência harmoniosa e divertida, pela ajuda e motivação demonstrada ao longo de todo este trabalho.

A todos meus outros colegas que directa ou indirectamente contribuíram para a conclusão desta tese.

Aos técnicos das oficinas Sr. Carlos, Sr. Joel e Sra. Ângela pelos serviços e simpatia demonstrada.

Aos meus pais Manuel e Maria e irmã Susana por todo o apoio, amor, paciência demonstrada ao longo da minha vida.

A todas as empresas que contribuíram para a conclusão desta tese, com o envio de amostras, uma ajuda bastante importante, contribuindo desta forma para conhecer novos produtos e novas tecnologias.

*“Não há nada bom nem mau a não ser estas duas coisas: a sabedoria que é um bem e a ignorância que é um mal”.*

*Platão*

## Resumo

As actuais preocupações ambientais e económicas suscitam uma procura urgente de alternativas energéticas economicamente mais rentáveis, menos lesivas ao ambiente, que promovam um mercado de energia sustentável, capaz de impulsionar o crescimento económico, reduzir a dependência energética face ao exterior, e assegurar a equidade intergeracional. O objectivo desta dissertação prende-se em demonstrar as potencialidades que a energia eléctrica fotovoltaica acarreta, tais como diminuir a dependência do consumidor face aos fornecedores de energia e a produção eléctrica em locais remotos.

Actualmente as fontes de energia renováveis, em particular a fotovoltaica, não podem ser directamente ligadas aos receptores eléctricos pois estes requerem uma tensão de 230V a uma frequência de 50Hz. Para tal, são necessários circuitos de interface entre a fonte de energia renovável e os receptores eléctricos. A presente dissertação, pretende demonstrar a construção de um sistema electrónico de potência, capaz de fazer o interface entre um pannel solar fotovoltaico de baixa potência e respectivos receptores eléctricos, ou seja, converter a tensão de saída de um pannel fotovoltaico numa tensão alternada monofásica (230V/50Hz), optimizando a potência que o pannel pode fornecer a cada instante.

Foi desenvolvido um sistema, que permite extrair a máxima potência, designado por MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). A extracção do ponto de máxima potência é efectuada através de um conversor de tensão DC/DC designado *Step-Up*, ou seja a tensão de saída é sempre superior à tensão de entrada. Para efectuar o controlo do MPPT utilizou-se o método da Perturbação e Observação. A conversão de tensão contínua para tensão alternada é efectuada por um inversor monofásico de dois níveis em ponte completa. O controlo do sistema é efectuado por um microcontrolador da família PIC e a linguagem de programação utilizada foi a C.

**Palavras-Chave:** Pannel Fotovoltaico, Energia Solar Fotovoltaica, MPPT, Conversor DC/DC, *Step-Up*, PIC18F4431, Inversor monofásico de ponte completa.

## Abstract

The current environmental and economic concerns raise an urgent demand for alternative energy more profitable, less affecting the environment, to promote a sustainable energy market, capable of boosting economic growth, reduce energy dependency, and to ensure intergenerational equity. The objective of this dissertation focus in demonstrating the potential of the photovoltaic energy, such as reducing the dependence of the consumer against energy suppliers and electricity production in remote locations.

Currently the renewable energy sources, in particular the photovoltaic may not be directly linked to the electrical receivers because these require a voltage of 230V and 50Hz. It is therefore essential to develop technology capable of solving this issue. For such, interface circuits between the renewable source and the electrical receivers are necessary. This dissertation intended to demonstrate the construction of a power electronic system able to make the interface between a photovoltaic panel and their electrical receptors, and to convert the output voltage of a photovoltaic panel into (230V/50Hz), optimizing the power that the panel can delivered in each instant.

A system designated by MPPT (Maximum Power Point Tracking) was developed. The extraction of maximum power point is carried out through a DC/DC converter designated Step-up, where output voltage is always higher than the input voltage. The method perturb and observe is used for the control of MPPT. The conversion of DC into AC voltage is carried out by a single phase full-bridge inverter. The control of the entire system is carried out by a PIC microcontroller and the C programming language was used.

**Keywords:** Photovoltaic Panel, Photovoltaic Energy, MPPT, DC/DC Converter, *Step-Up*, PIC18f4431, Single phase full-bridge inverter

## Índice

Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1 Identificação do Problema .....	1
1.2 Motivações.....	5
1.3 Panorama da Energia Solar no Mundo .....	6
1.3.1 Panorama da Energia Solar em Portugal .....	6
1.4 Objectivos do Trabalho.....	8
1.5 Organização da Tese .....	9
Capítulo 2 - Sistema Fotovoltaico.....	11
2.1 Conceito e Resenha Histórica .....	11
2.2 Sistema Fotovoltaico.....	13
2.2.1 Sistemas fotovoltaicos isolados .....	15
2.2.2 Sistemas híbridos .....	16
2.2.3 Sistemas ligados à rede eléctrica.....	17
2.3 Células Fotovoltaicas .....	18
2.3.1 Tipos de Células fotovoltaicas .....	20
2.3.2 Células de silício cristalino .....	21
2.3.3 Células fotovoltaicas de filme de fino .....	22
2.3.4 Outros tipos de células .....	23
2.4 Modelo matemático de uma célula fotovoltaica .....	23
2.5 Curva característica do módulo fotovoltaico .....	29
2.6 Ponto de potência máxima (MPP) .....	31
2.7 Seguidor do ponto de máxima potência (MPPT).....	32
2.8 Aplicações do seguidor do ponto de máxima potência (MPPT).....	33
2.9 Métodos de busca do ponto de máxima potência .....	34
2.9.1 Método da Perturbação e Observação.....	35

2.9.2 Método da Condutância Incremental .....	36
2.9.3 Método da Tensão Constante.....	37
Capítulo 3 – Circuitos Electrónicos de Interface .....	39
3.1 Introdução .....	39
3.2 Conversor de tensão DC/DC.....	39
3.3 Conversor DC/DC Step-Up .....	39
3.3.1 Modo de Condução Contínua .....	40
3.3.2 Limite da condução contínua .....	43
3.3.3 Modo de condução descontínua.....	44
3.3.4 <i>Ripple</i> da tensão de saída .....	47
3.3.5 Cálculo da indutância crítica.....	47
3.3.6 Cálculo da capacidade crítica.....	48
3.3.7 Controlo do <i>Step-Up</i> .....	48
3.4 Transformador.....	49
3.5 Inversor monofásico.....	50
3.5.1 Inversores de ponte completa.....	51
3.5.2 Comando por modulação de largura de impulso .....	52
3.5.3 Comando por PWM Bipolar .....	53
3.5.4 Comando por PWM Unipolar.....	54
3.5.5 Filtro LC.....	56
Capítulo 4 - Simulações .....	57
4.1 Introdução .....	57
4.2 SimPowerSystems.....	57
4.3 Simulação do Conversor de Tensão ( <i>Step-Up</i> ).....	58
4.4 Simulação do Inversor Monofásico .....	61
Capítulo 5 - Implementação .....	63
5.1 Introdução .....	63

5.2 Microcontrolador .....	63
5.3 Semicondutor de potência .....	65
5.4 Placa electrónica de interface do conversor <i>Step-Up</i> .....	66
5.5 Controlo do conversor de tensão <i>Step-Up</i> .....	68
5.6 Placa de controlo do Inversor Monofásico .....	70
5.7 Controlo do inversor monofásico .....	72
Capítulo 6 - Resultados .....	75
6.1 Introdução .....	75
6.2 Ensaio ao pannel solar .....	75
6.3 Ensaio ao conversor de tensão <i>Step-Up</i> .....	78
6.4 Ensaio ao Inversor de Tensão .....	78
Capítulo 7 - Conclusões .....	83
7.1 Conclusões .....	83
7.2 Propostas de trabalho futuro .....	85
REFERÊNCIAS .....	87
ANEXOS .....	91

## Índice de Figuras

Figura 1-1 Evolução mundial do preço dos derivados do petróleo.....	2
Figura 1-2 Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> , cenário de referência 1990-2030.....	3
Figura 1-3 Dependência energética do exterior, em 2003 .....	4
Figura 1-4 Insolação global anual em Portugal .....	7
Figura 2-1 Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado .....	15
Figura 2-2 Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico híbrido .....	16
Figura 2-3 Diagrama de blocos sistema fotovoltaico ligado à rede eléctrica .....	17
Figura 2-4 Cristais de silício .....	18
Figura 2-5 Movimento dos electrões junção P-N .....	19
Figura 2-6 Conversão directa da radiação solar em electricidade .....	20
Figura 2-7 Produção de células fotovoltaicas .....	21
Figura 2-8 Célula Fotovoltaica .....	21
Figura 2-9 Aplicação de painéis de silício amorfo .....	23
Figura 2-10 Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica .....	24
Figura 2-11 Curva $I * U$ .....	25
Figura 2-12 Curvas características módulo fotovoltaico .....	30
Figura 2-13 Curva $I * U$ BP2150S .....	31
Figura 2-14 Ponto de potência máxima .....	32
Figura 2-15 Diagrama de blocos de um MPPT típico .....	33
Figura 2-16 Diagrama de blocos carregamento de baterias .....	33
Figura 2-17 Diagrama de blocos Sistemas ligados á rede e sistemas isolados ....	34
Figura 2-18 Diagrama de blocos Sistema de bombagem de água .....	34
Figura 2-19 Algoritmo Perturba e Observa .....	35
Figura 2-20 Método da condutância incremental .....	37
Figura 3-1 Conversor de tensão <i>Boost</i> .....	40
Figura 3-2 Formas de onda da tensão e corrente no modo contínuo .....	41
Figura 3-3 Estado de funcionamento <i>ON</i> .....	41
Figura 3-4 Estado de funcionamento <i>OFF</i> .....	42
Figura 3-5 Formas de onda do <i>Step-Up</i> no limite da condução contínua .....	43
Figura 3-6 Curvas de IoB com Vo constante.....	44

Figura 3-7 Forma de onda na bobina no modo descontínuo.....	45
Figura 3-8 Curva característica do <i>Step-Up</i> tendo $V_o$ constante.....	46
Figura 3-9 Ripple da tensão de saída no <i>Step-Up</i> .....	47
Figura 3-10 Circuito típico de controlo por PWM.....	49
Figura 3-11 Inversor monofásico em meia ponte.....	51
Figura 3-12 Inversor monofásico em ponte completa.....	51
Figura 3-13 Modulação de largura de impulso modo bipolar.....	53
Figura 3-14 Modulação de largura de impulso modo bipolar.....	54
Figura 3-15 Modulação de largura de impulso modo unipolar.....	54
Figura 3-16 Modulação de largura de impulso modo unipolar.....	55
Figura 4-1 Ambiente Simulink/SimPowerSystems.....	58
Figura 4-2 Modelo simulado em Simulink.....	58
Figura 4-3 Forma de onda da tensão de saída ( $V_o=36V$ )......	59
Figura 4-4 Forma de onda da corrente.....	59
Figura 4-5 Forma de onda da tensão no mosfet.....	60
Figura 4-6 Modelo do inversor monofásico simulado.....	61
Figura 4-7 Formas de onda da tensão e corrente à saída.....	62
Figura 4-8 Formas de onda (moduladora e portadora).....	62
Figura 4-9 Forma de onda da tensão sem filtro.....	62
Figura 5-1 Diagrama dos pinos PIC18F4431.....	63
Figura 5-2 Etapas de programação.....	64
Figura 5-3 PICkit 2.....	65
Figura 5-4 Comparação diversos semicondutores de potência.....	65
Figura 5-5 Esquema eléctrico NTY100N10.....	66
Figura 5-6 Diagrama de blocos da placa de controlo do conversor de tensão.....	67
Figura 5-7 Esquema do acoplador óptico 6N136.....	67
Figura 5-8 Algoritmo de controlo do conversor Step-Up.....	69
Figura 5-9 Diagrama de blocos da placa de controlo inversor monofásico.....	70
Figura 5-10 Circuito drive mosfets NCP511.....	72
Figura 5-11 Modo contador <i>Up/Down</i> .....	73
Figura 5-12 Algoritmo de controlo do inversor monofásico.....	74
Figura 6-1 Curva $I*U$ .....	77
Figura 6-2 Curva da potência.....	77
Figura 6-3 Forma de onda da tensão no mosfet.....	78

Figura 6-4 Forma de onda da tensão de saída .....	78
Figura 6-5 Formas de onda da tensão .....	79
Figura 6-6 Espectro da tensão de saída .....	79
Figura 6-7 Forma de onda da tensão ensaio em carga .....	80
Figura 6-8 Forma de onda da tensão no ensaio .....	81
Figura 7-1 Placa de aquisição de dados .....	96
Figura 7-2 Placa de controlo do inversor .....	97

## Índice de Tabelas

Tabela 2-1 Dados fornecidos pelo fabricante .....	26
Tabela 6-1 Características eléctricas BP2150S .....	75
Tabela 6-2 Resultados experimentais .....	76



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Identificação do Problema

A escassez e o preço de recursos fósseis como o petróleo, o gás natural e o carvão, aliados ao elevado nível das emissões de gases poluentes, o aquecimento global da Terra e os problemas sociais que advêm do não acesso, ou acesso precário à energia eléctrica são elementos de referência do actual cenário energético e ambiental internacional. A complementar com a constante instabilidade dos mercados de recursos fósseis, o aumento galopante do consumo de energia, o agravamento da dependência energética, as recentes e cada vez mais frequentes catástrofes climatéricas, o problema do isolamento de populações desfavorecidas e o clima de instabilidade política dos países produtores de combustíveis fósseis. Todo este cenário requer uma actuação concertada, pensada, rápida e estruturada por parte dos governos, universidades, investigadores e população em geral [1].

De acordo com a Agência de Informação Energética (AIE) dos EUA, no período compreendido de 2005 a 2030 prevê-se um crescimento na ordem dos 71% do consumo de energia a nível mundial. Actualmente, os maiores consumidores energéticos são os países da OCDE, no entanto, os que mais contribuirão para este crescimento são os actuais países em vias de desenvolvimento em especial a China e a Índia. Contudo, países do Médio Oriente, América Latina e países Africanos, terão um papel significativo neste crescimento. O agravamento na procura de energia será acompanhado por um aumento do preço dos combustíveis fósseis [2].

Como pode-se constatar na Figura 1-1, o preço por barril do crude, mais do que duplicou, passando dos 50 dólares por barril para mais de 120 dólares, prevê-se ainda que este comportamento manter-se-á nos próximos anos.

No entanto, devido à crise económica mundial tem-se assistido a uma descida da procura e conseqüentemente no preço. Contudo a Agência de Informação Energética dos EUA prevê que seja pontual esta descida, e que o preço do crude e dos seus derivados tenderão a subir acentuadamente.

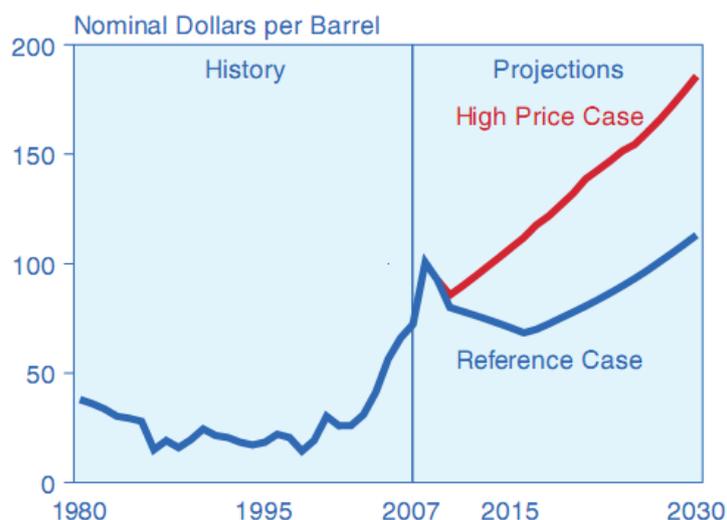


Figura 1-1 Evolução mundial do preço dos derivados do petróleo [3]

Todavia, a situação energética mundial irá continuar a ser dominada pelos combustíveis fósseis, que em 2030 representarão quase 90% do aprovisionamento energético total e o petróleo continuará a ser a principal fonte de energia com 34%. A Comissão Europeia, no seu Relatório “ Energia, tecnologia e política climática: perspectivas mundiais para 2030”, revela que as reservas mundiais de petróleo conhecidas chegam para satisfazer a procura até 2030, contudo aos níveis de consumo espectáveis atingir-se-á um declínio preocupante das mesmas, não garantindo o abastecimento posterior a 2030 [4].

Não menos preocupante é o prognóstico da situação ambiental, a mesma fonte, prevê que em 2030 as emissões mundiais de CO<sub>2</sub>, mais do que duplicarão relativamente ao ano de referência 1990.

Os maiores contribuidores das emissões mundiais CO<sub>2</sub>, são os países não membros da OCDE, uma vez que são os principais consumidores de energia com base em combustíveis fósseis, devido ao acentuado e rápido crescimento económico das novas economias emergentes [3].

Estima-se que os países membros da OCDE vão estabilizar o seu nível de emissões, tal deve-se a uma maior consciencialização e níveis de desenvolvimento destes países [5].

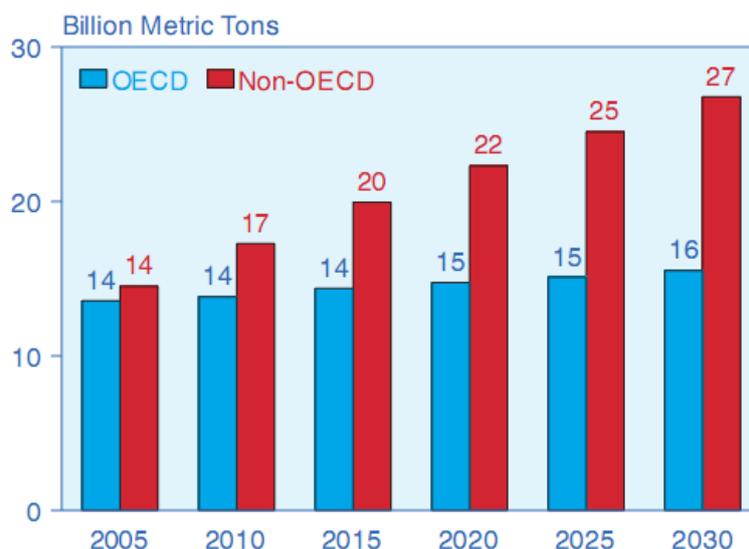


Figura 1-2 Evolução das emissões de CO<sub>2</sub>, cenário de referência 1990-2030 [3]

A distribuição de energia eléctrica não é um bem/serviço de acesso a todos. A população mundial ronda os 6,7 mil milhões de habitantes e, segundo o Prof. Dr. Miguel Brito da Universidade de Lisboa, cerca de 1,6 mil milhões de pessoas ou 24% da população mundial não têm acesso a serviços de energia eléctrica, e aproximadamente 2,6 mil milhões de pessoas, o que corresponde a 39,4%, utilizam sistemas de energia tradicionais, pouco eficientes, demasiado afastados de centrais eléctricas convencionais, o que leva, a preços inoportáveis no acesso e na distribuição eléctrica.

As populações que não têm acesso à rede eléctrica, ou com um acesso deficitário sofrem de problemas de exclusão social, isolamento, subdesenvolvimento e fraca qualidade de vida. Estes problemas afectam transversalmente quer países desenvolvidos quer os países menos desenvolvidos, contudo a definição das prioridades por parte dos países são diferentes. Nos países do terceiro mundo a prioridade é o acesso e a distribuição à rede eléctrica, enquanto os países mais desenvolvidos pretendem reduzir a dependência energética, e com isso a factura, apostando simultaneamente na melhoria das condições ambientais.

Portugal não é alheio a estes problemas. A grande dependência energética em relação aos combustíveis fósseis e, em particular, em relação aos derivados do petróleo, tem consequências muito negativas para o país, nomeadamente o agravamento do défice da balança comercial e efeitos nocivos sobre o meio ambiente que se traduzem em externalidades negativas [5].

Portugal é um dos países com menor eficiência energética da UE gastando 0,88 barris de petróleo por cada mil euros de PIB. O valor médio na União Europeia é de 0,65 barris por cada mil euros e o país mais eficiente é a Dinamarca onde o valor é de 0,41 [3].

De acordo com a Avaliação do desempenho do XVII Governo Constitucional no fim do terceiro ano da Legislatura, Portugal tem assistido a um aumento considerável do consumo de energia eléctrica. Assim, o país tem de recorrer à importação de 85% da energia que consome.

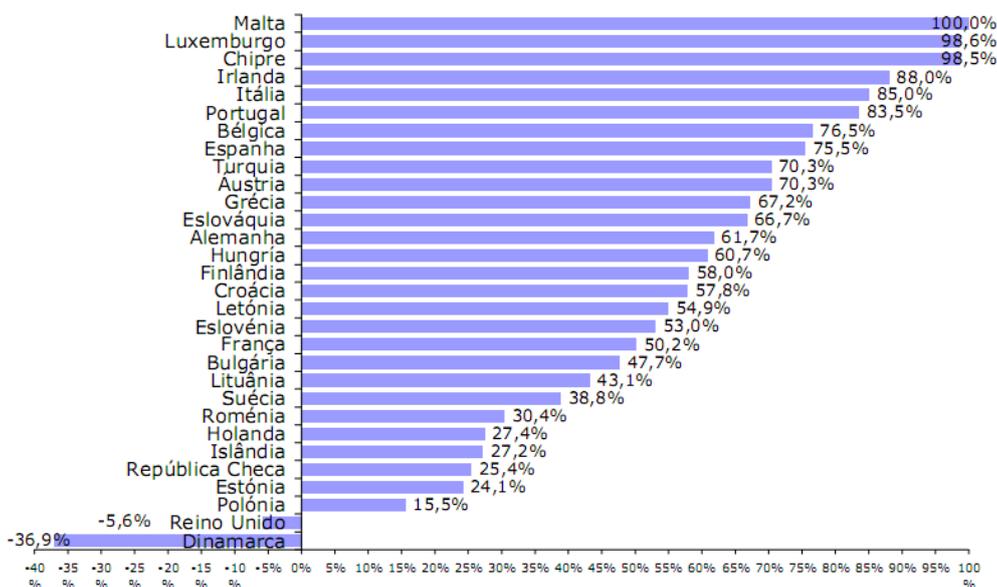


Figura 1-3 Dependência energética do exterior, em 2003 [3]

Todos os factores anteriores têm ganho relevância nos últimos meses, com o crescente aumento dos preços do petróleo, fruto da diminuição das reservas e da especulação. O que contribui para um reanimar da discussão em torno das energias renováveis, estas sim uma aposta de futuro, porque têm impactos ambientais negligenciáveis e, como o próprio nome indica, são renováveis.

“As energias renováveis são formas de energia inesgotáveis e ou com elevada capacidade de renovação não poluentes. Caracterizam-se, também, pelo seu carácter endógeno e descentralizado, contribuindo desta forma para a redução das importações de combustíveis, para o aumento da segurança do abastecimento energético e para a criação de riqueza em zonas economicamente deprimidas” [6].

As energias renováveis permitem reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, reduzem a dependência energética da nossa sociedade face aos combustíveis fósseis e

conduzem à investigação em novas tecnologias, que permitem obter uma melhor eficiência energética.

As mesmas podem no seu conjunto solucionar ou minimizar alguns dos problemas mencionados, e ajudar os países a cumprirem as metas impostas pela conjuntura internacional, como é o caso do Protocolo de Quioto. As energias renováveis são fundamentais para o desenvolvimento sustentado.

O protocolo de Quioto é um tratado internacional, com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que provocam o efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações científicas, como causa principal do aquecimento global. Por ele propõe-se um calendário pelo qual os países desenvolvidos têm a obrigação de reduzir a emissão de gases do efeito estufa em, pelo menos, 5,2% em relação aos níveis de 1990 durante o período entre 2008 e 2012. Em virtude da adesão ao Protocolo de Quioto, Portugal para o período de 2008-2012, tem de restringir o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> até 27% relativamente a 1990. Uma vez que esse limite já foi ultrapassado, o nosso país tem de comprar licenças de emissão de CO<sub>2</sub> o que acarreta custos para as empresas e, conseqüentemente, para os consumidores [7].

## 1.2 Motivações

A energia solar fotovoltaica apresenta grandes vantagens a nível económico, ambiental e social para os países que optem por utilizar cada vez mais este tipo de fonte energética em detrimento das fontes de energias convencionais. Portugal encontra-se localizado numa zona geográfica privilegiada para explorar este tipo de recurso. A exploração desta fonte de energia em Portugal começa a dar os primeiros passos, o Governo através da construção de duas grandes centrais fotovoltaicas nomeadamente em Serpa e em Moura, deu o impulso inicial para que o público se familiarize com esta tecnologia e a adopte. No entanto a exploração da energia solar fotovoltaica ainda se encontra numa fase embrionária da sua potencialidade, ou seja, ainda existe um vasto campo de investigação e desenvolvimento (I&D) a percorrer, onde as universidades terão um papel importantíssimo a desempenhar neste campo. Com o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica é possível “levar” energia eléctrica até pontos que de outra forma estavam privados desta, e assim desenvolver toda uma região e uma sociedade.

Actualmente as fontes de energia renováveis, em particular a fotovoltaica não podem ser directamente ligadas aos receptores eléctricos pois estes requerem uma

tensão de 230V a uma frequência de 50Hz e os painéis fotovoltaicos produzem corrente contínua.

É portanto fundamental desenvolver tecnologia capaz transformar corrente continua em corrente alternada. Para tal, é necessário um circuito de interface entre a fonte de energia renovável e os receptores eléctricos. A presente dissertação pretende demonstrar a construção de um sistema electrónico de potência capaz de fazer o interface entre um pannel solar fotovoltaico de baixa potência e respectivos receptores eléctricos.

### **1.3 Panorama da Energia Solar no Mundo**

O Mercado da energia solar encontra-se em constante crescimento. No final de 2007 a capacidade instalada a nível mundial, dos sistemas solar fotovoltaico atingiu o patamar 9,200MW. Comparando com apenas 1,200MW nos finais de 2000, temos que a instalação deste tipo de sistemas a nível global tem vindo a crescer a uma taxa de mais de 35% ao ano. Como consequência deste crescimento, actualmente este mercado está avaliado em mais de 13 mil milhões de euros por ano. O sector fotovoltaico será também o responsável pelo crescimento de economias locais. O número de empregados no sector, a trabalhar no fabrico, instalação e manutenção dos painéis, pode crescer dos actuais 120 mil para 10 milhões no mundo em 2030 [8].

#### **1.3.1 Panorama da Energia Solar em Portugal**

Portugal é um dos países mais ricos da Europa em termos de energia solar. A insolação em Portugal Continental varia entre 1800 e 3100 horas de sol por ano [9].

Privilegiado pela riqueza soalheira, Portugal aguarda que a indústria e a comunidade científica respondam ao desafio de aproveitar o sol para fins energéticos, nomeadamente através da adopção massiva de sistemas fotovoltaicos.

Para aproveitar este recurso estão a ser investidos quase 600 milhões de euros na vertente solar fotovoltaico. Portugal terá de investir 6,4 mil milhões de euros até 2010, o equivalente a mais de 4% do PIB, em recursos para produção de electricidade a partir de energias renováveis, se quiser cumprir as metas previstas no Livro Branco “Energia para o Futuro: Fontes de Energia e Renováveis” [10].

No caso da Directiva 2001/77/CE, Portugal assume o compromisso de produzir em 2010 39% da sua electricidade com origem em fontes de energia renováveis, o

terceiro objectivo mais ambicioso da UE. Tendo em conta a evolução da energia consumida a partir de fontes de energia renováveis, que segundo dados da Direcção Geral de Energia e Geologia, passou de 27,7% (2004) para 36% (2007), o Governo reviu esta meta em 2007 para 45%.

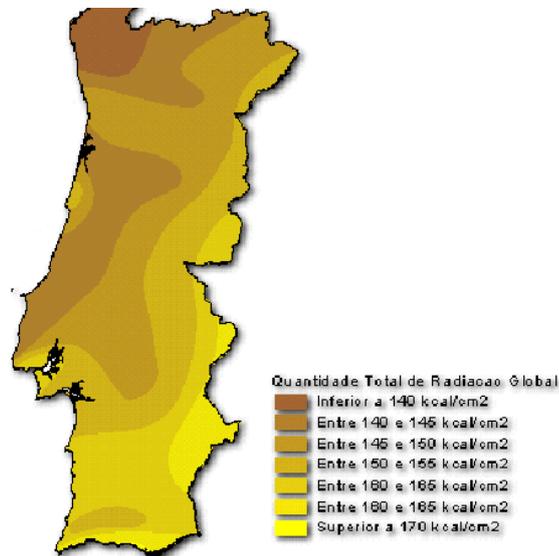


Figura 1-4 Insolação global anual em Portugal [9]

O presidente da Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA) afirmou que o mercado português da energia solar fotovoltaica pode valer 1.000 milhões de euros por ano, se forem instalados 200 MW de potência anualmente, o mesmo prevê que será Portugal um dos países europeus a impulsionar o mercado solar, não obstante ter uma meta fixada de 150 MW até 2010 e ter já atribuído 126 MW. Esse impulso será dado, fundamentalmente, pela microgeração, pequenas centrais de produção de electricidade descentralizadas, em casas privadas e ao nível dos municípios. [11]

#### **Exemplos de microgeração em Portugal:**

- Vale da Rosa: é uma aldeia isolada no concelho de Alcoutim, que é abastecida de energia eléctrica através de uma instalação fotovoltaica autónoma.
- Substituição de geradores diesel na Berlenga por sistemas fotovoltaicos.
- Sinalização marítima (bóias e faróis).
- Electrificação e iluminação pública em Castro Daire.

## 1.4 Objectivos do Trabalho

O objectivo desta dissertação centra-se na concepção prática e teórica de um circuito electrónico de interface, capaz de estabelecer a ponte entre a fonte de energia renovável (fotovoltaica) e os receptores eléctricos (cargas) com o menor encargo económico possível.

Os painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado actualmente apresentam tensões de saída entre 12V a 68V e correntes entre 0,5A e 8A. Estes produzem corrente contínua, e a generalidade das cargas eléctricas disponíveis consomem corrente alternada. Tal implica que, para aproveitar a energia solar fotovoltaica e alimentar a maioria dos equipamentos/edifícios/aplicações comuns, seja necessário converter a corrente contínua em alternada, sendo necessário um circuito electrónico de interface.

Para a concretização do circuito electrónico de interface foram definidos vários objectivos específicos, nomeadamente:

1º. Teste a um painel fotovoltaico BP 2150S com 150W de potência máxima, com o intuito de traçar a curva característica do painel ( $I \times U$ ).

2º. Desenvolvimento de um inversor electrónico de potência capaz de converter a saída do painel num sistema alternado monofásico 230V, 50Hz, maximizando a potência disponibilizada pelo painel.

3º. Implementação de um sistema de controlo e respectivas interfaces.

4º. Teste do sistema completo em diversas condições de operação.

Foram efectuados testes a um painel solar de 150W de forma a traçar a curva característica do mesmo. Numa fase posterior procedeu-se a uma simulação computacional de dois elementos fundamentais neste sistema, nomeadamente do conversor e inversor de tensão, ambos em ambiente *Matlab*.

Relativamente ao conversor de tensão optou-se por utilizar a configuração elevadora de tensão designada por “*Step-Up*”. No que se refere ao inversor de tensão adoptou-se a configuração inversor monofásico de dois níveis em ponte completa.

Finalizadas as simulações implementou-se fisicamente o sistema. Para tal, projectaram-se as cartas electrónicas dos circuitos de potência e de controlo e em simultâneo dimensionou-se e construiu-se as indutâncias para o circuito “*Step-Up*” e filtro LC. Para efectuar o controlo do sistema completo utilizou-se o microcontrolador PIC18F4431. Os resultados obtidos serão discutidos nos capítulos seguintes.

## 1.5 Organização da Tese

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos. O capítulo 1 intitulado “Introdução”, identifica o problema, estabelece os objectivos e revela as motivações. Aborda o panorama actual dos mercados energéticos, e de como isso afecta a economia global, enquanto os combustíveis fósseis forem a principal fonte de energia, assim como, aborda a forte dependência energética de Portugal face aos combustíveis fósseis, e apresenta como possíveis soluções desta dependência as energias renováveis, onde Portugal, é um privilegiado em relação a outros países europeus, devido à sua excelente posição geográfica. Também aborda um importante tema, que é o do fraco acesso à rede eléctrica/ acesso deficitário que atinge uma grande parte da população mundial, em especial dos países em vias de desenvolvimento. Por fim, define os objectivos do trabalho a desenvolver.

O capítulo 2 apresenta-se, como um capítulo de conceitos teóricos, onde se irão abordar os sistemas fotovoltaicos, nomeadamente a constituição destes e tipos de aplicações.

No capítulo 3 são apresentados os circuitos electrónicos de interface. É feita uma análise ao funcionamento do conversor de tensão Step-Up e ao inversor de tensão monofásico. São abordados os vários modos de funcionamento assim como os sistemas de controlo de ambos os circuitos.

O capítulo 4 é o capítulo das simulações computacionais, onde primeiramente é feita uma breve apresentação ao simulador utilizado, e em seguida são apresentadas as simulações efectuadas. Foram simulados um conversor *Step-Up*, e um inversor de tensão monofásico em ponte completa. Onde são apresentadas as principais formas de onda que caracterizam o comportamento dos circuitos.

No capítulo 5 é abordado o tema da implementação, são apresentadas as topologias dos circuitos *Step-Up* e inversor de tensão monofásico que foram escolhidos, assim como os algoritmos de controlo dos mesmos.

O capítulo 6 é o capítulo dos resultados. Neste são apresentadas, e discutidas as medições que foram efectuadas aos circuitos electrónicos implementados, assim como ao ensaio efectuado ao painel solar fotovoltaico.

As conclusões são apresentadas no capítulo 7, para além das conclusões sobre o trabalho efectuado, é também proposto como trabalho futuro um conjunto de inovações, com vista a serem implementadas no trabalho.



## Capítulo 2

### Sistema Fotovoltaico

#### 2.1 Conceito e Resenha Histórica

Devido à sua natureza abstracta, o conceito de energia é um conceito difícil de compreender. A energia aparece de diferentes formas e é de distintos tipos: calor, luz, mecânica, eléctrica, química, nuclear, pode ser transferida ou convertida de uma forma para outra, mas nunca é criada ou destruída.

Numa vertente económica pode afirmar-se: “A energia é o sangue dos sistemas sócio-económicos e, por isso, vital para o progresso, o desenvolvimento e o bem-estar dos cidadãos. Mas isso não significa que consumir mais energia represente, por si mesmo, melhores condições de produção e de conforto, de bem-estar e de qualidade de vida para os cidadãos” [12].

Energia é uma palavra que tem origem no grego “energeia” e que pode-se traduzir por “força em acção”. A primeira fonte de energia utilizada pelos seres humanos foi a sua própria força muscular, no entanto, desde então apareceram diversas formas de aproveitamento de energia, como é exemplo o domínio do fogo, a domesticação de animais, a utilização da força da água. Não menos importante é a utilização do vento, através dos moinhos. A utilização da energia solar existe desde que há memória, quer para aquecimento dos espaços onde vivemos, secagem de produtos agrícolas, secagem de peixe, ou até da própria roupa.

O Sol é o elemento mais importante do nosso sistema solar. A energia solar cria-se no seu interior, onde a temperatura ronda os 15.000.000°C e a pressão é cerca de 340 mil vezes a do ar da terra ao nível do mar, provocando autênticas reacções nucleares. Destas reacções, em que a massa é expulsa em forma de energia e conduzida para a superfície do Sol, resulta a conversão por segundo de 700 milhões de toneladas de hidrogénio. Converter o calor, a radiação e a energia do Sol em energia útil é o um desafio [13].

O termo fotovoltaico deriva da palavra “photo”, originária do grego *phos* que significa luz e do sufixo “voltaic”, relacionado com a diferença de potencial gerada, que advém do nome de Alessandro Volta, um pioneiro no estudo na electricidade. A energia fotovoltaica é a transformação da energia recebida pelo Sol em energia eléctrica, graças

ao Efeito Fotovoltaico a energia contida nos fotões da luz solar pode ser convertida directamente em energia eléctrica [14].

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, uma quantidade avultada de energia ( $1,5 \times 10^{18}$  kWh), o que se traduz em cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia para igual período. A energia fotovoltaica é uma fonte de energia inesgotável e que está democraticamente distribuída por todo o planeta, ao contrário dos combustíveis fósseis que estão concentrado em algumas regiões [15].

O comissário europeu Janez Potocnik define a tecnologia fotovoltaica como a produção da electricidade a partir da luz, ou seja, a energia solar gerada por células fotoeléctricas, capazes de transformar a luz em electricidade.

“A electricidade solar, tradicionalmente chamada energia fotovoltaica, é uma fonte limpa de energia que tem, já hoje, o potencial para contribuir para o desenvolvimento ambientalmente sustentado dos países em desenvolvimento. Pode também contribuir, de uma maneira muito significativa, para os esforços do primeiro mundo no sentido de cumprir os compromissos assumidos em Quioto.” [16].

Os conhecimentos embrionários relacionados com energia fotovoltaica surgem nos anos de 1839 com o físico francês Edmund Becquerel, que descobriu o chamado efeito fotovoltaico num electrólito, através da constatação de que alguns materiais em contacto com luz produziam pequenas quantidades de corrente eléctrica. Só cerca de 34 anos depois em 1873, é que ocorreram desenvolvimentos nesta área, graças a Willoughby Smith que descobriu o mesmo efeito mas num material semiconductor, o selénio. Adams e Day em 1876 construíram a primeira célula fotovoltaica. No entanto, durante as décadas sobrejacentes ocorreram vários progressos nesta área, tendo Albert Einstein em 1920 recebido o prémio Nobel pelos trabalhos desenvolvidos no âmbito do efeito fotoeléctrico.

Na década de 40 e 50 aprofundou-se o método Czochralski, que surgiu em 1918 com o cientista polaco Czochralski. Este permite obter de silício de elevado grau de pureza, sob a forma de lingote monocristalino para fins industriais. Em 1954 os laboratórios Bell desenvolveram a primeira célula fotovoltaica de silício cristalino, onde o rendimento desta rondava 4% a 6%. Ainda em meados da década de 50 ocorreram as primeiras aplicações terrestres da energia fotovoltaica, nomeadamente, iluminação de bóias de navegação e na área das telecomunicações.

Em 1958 a energia fotovoltaica teve um grande impulso tecnológico, uma vez nesta data ocorreram as primeiras aplicações a nível espacial. Esta energia é considerada

bastante promissora a este nível, uma vez que aparece como uma solução inovadora e mais eficiente no abastecimento de energia eléctrica no espaço. São exemplos o Satélite Vanguard-1, posteriormente Explorer-6 e a nave espacial Nimbus.

Na década de 70 com a crise petrolífera assistiu-se ao despoletar de interesses na tecnologia fotovoltaica, como solução para os problemas energéticos existentes. Foram criados vários programas de investigação, que tinham fundamentalmente dois objectivos: aumentar o rendimento da célula fotovoltaica e reduzir o custo de produção. No entanto, o factor impulsionador para o crescimento da energia fotovoltaica inverteu-se na década de 80, com a estabilização dos mercados petrolíferos, a falta de investimento em investigação neste tipo de tecnologia, fez com que esta estagnasse.

Contudo, na mesma década foram dados os primeiros passos experimentais no que concerne às aplicações domésticas. Em meados da década de 90, fruto de catástrofes ambientais, surgiu uma nova consciencialização a nível global que foi, a necessidade de diminuir drasticamente as emissões de gases poluentes para a atmosfera. O conhecimento que a queima dos combustíveis fósseis são uma das principais causas para este fenómeno, tornou urgente encontrar alternativas energéticas amigas do ambiente, as chamadas energias renováveis. A partir dessa altura e até a actualidade a investigação e divulgação em energias renováveis, nomeadamente a energia solar fotovoltaica tem crescido exponencialmente [17].

## **2.2 Sistema Fotovoltaico**

Um sistema fotovoltaico é todo um conjunto de equipamentos necessários para extrair e acomodar a energia eléctrica extraída dos painéis fotovoltaicos. A constituição típica de um sistema fotovoltaico é a seguinte: [18]

- Painéis solares
- Conversor de tensão (DC/DC)
- Baterias
- Inversor de tensão (DC/AC)
- Transformador monofásico

O aproveitamento da energia solar pode-se fazer de duas formas possíveis, através do aproveitamento passivo e através do aproveitamento activo [19].

**Aproveitamento passivo:** este tipo de aproveitamento não requer nenhum dispositivo para captar energia solar, utiliza antes a arquitectura dos edificios. Estes são projectados com grandes janelas orientadas para o sol, aproveitando as radiações solares durante o dia. Outra aplicação pode ser, por exemplo, o sítio onde se coloca a roupa a secar. Este tipo de aproveitamento apresenta inúmeras vantagens, onde se destaca a poupança energética obtida nos edificios onde se aplica este tipo de aproveitamento.

**Aproveitamento activo:** este tipo de aproveitamento do sol possibilita a produção calor ou energia eléctrica. A produção de calor através da energia solar, é possível através do aproveitamento solar térmico, neste caso, o sol é aproveitado para aquecer água potável, piscinas, para auxiliar o aquecimento central, entre outros. A produção de energia eléctrica através da energia solar é denominada por efeito solar fotovoltaico.

Segundo Rui M.G. Castro pode-se dividir as aplicações fotovoltaicas em três grupos distintos:

#### **Aplicações de alta potência**

- Grandes centrais solares fotovoltaicas com potência de algumas dezenas de MW

#### **Aplicações de média potência**

- Electrificação rural: abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, bombagem de água e irrigação, complemento de abastecimento de locais remotos com ou sem rede
- Produção descentralizada ligada à rede

#### **Aplicações de pequena potência**

- Relógios e calculadoras
- Acessórios de veículos automóveis, por exemplo, alimentação de ventoinhas para refrigeração de automóveis estacionados, ou carregamento de baterias em veículos de campismo
- Sinais rodoviários (móveis e estáticos) e parquímetros
- Telefones de emergência, transmissores de TV e de telemóvel

Nesta dissertação as aplicações de média potência vão ser alvo de um estudo mais aprofundado, uma vez que é onde se insere a temática do trabalho a desenvolver. Este

tipo de aplicações divide-se em três grupos, consoante a utilização que se pretende obter para o efeito, que são as seguintes:

### 2.2.1 Sistemas fotovoltaicos isolados

Este tipo de aproveitamento solar é bastante útil e utilizado em regiões remotas, que se encontram afastadas da rede eléctrica, como é o exemplo sistemas de vigilância nas auto-estradas, sistemas de vigilância das matas, entre outros. O pannel fotovoltaico é o principal constituinte deste sistema, sendo o responsável pela transformação da energia solar em energia eléctrica. Como durante a noite não existe radiação solar, há a necessidade de ter-se instalado no sistema um banco de baterias para armazenar energia durante o dia, para a fornecer durante a noite, ou em dias com pouca luminosidade.

É necessário ainda ter instalado um regulador de carga, para monitorizar a carga e descarga correcta das baterias, não permitindo que exista um descarregamento profundo ou sobretensões sobre as baterias. Para além disso deverá impedir que as baterias durante a noite enviem energia para os painéis, danificando-os. Caso existam cargas AC (alternated current) é necessário ter instalado um inversor DC/AC, onde DC (direct current), que transforma a tensão DC proveniente das baterias em tensão AC.

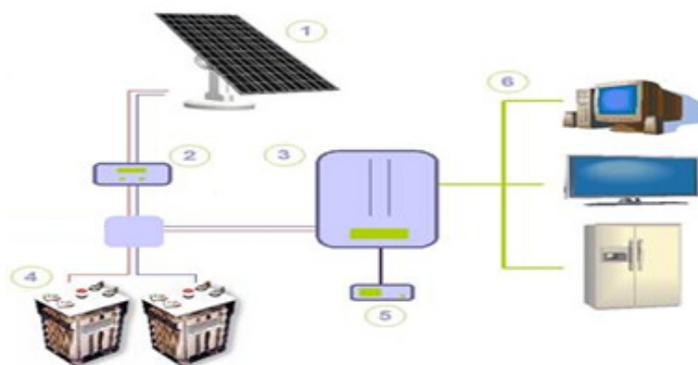


Figura 2-1 Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado [55]

#### Legenda da Figura 2-1:

- 1: Pannel Fotovoltaico
- 2: Regulador de Carga
- 3: Inversor
- 4: Baterias

5: Monitorização do Sistema

6: Equipamento de Consumo Eléctrico

## 2.2.2 Sistemas híbridos

Este tipo de sistema fotovoltaico é normalmente constituído por várias fontes de energia renovável, como sistemas fotovoltaicos e sistemas eólicos. Associadas a estas estão ligadas fontes de produção eléctrica convencional, como sistemas de geração a diesel. Estes sistemas de geração a diesel têm a função de auxiliar a produção eléctrica, para as alturas em que o consumo energético é elevado, ou quando a geração eléctrica a partir das fontes de energia é insuficiente para satisfazer o consumo eléctrico.

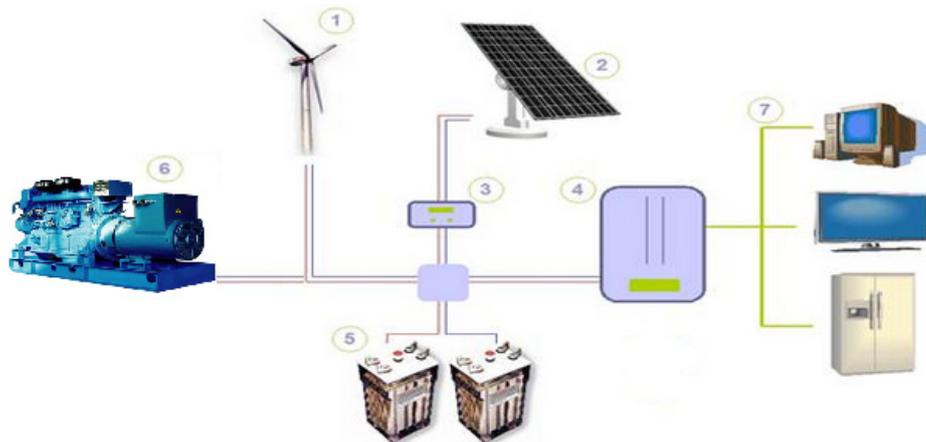


Figura 2-2 Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico híbrido [55]

### Legenda da Figura 2-2:

- 1: Gerador eólico
- 2: Pannel Fotovoltaico
- 3: Regulador de Carga
- 4: Inversor
- 5: Baterias
- 6: Gerador a diesel
- 7: Equipamento de Consumo Eléctrico

### 2.2.3 Sistemas ligados à rede eléctrica

Este tipo de sistema conta actualmente com bastantes utilizadores, devido em grande parte aos incentivos financeiros que têm sido promovidos pelos Governos para quem opte por instalar este tipo de sistema. Uma vez que é possível vender a energia gerada à entidade fornecedora de energia eléctrica, com tarifas bastante atractivas e rentáveis. O principio de funcionamento deste sistema assenta no pressuposto, que a energia gerada ou é consumida pelo utilizador ou é injectada na rede para ser vendida, o que ajuda a amortizar o custo da instalação inicial do sistema. Neste sistema não é necessário instalar um banco de baterias, reduzindo assim o custo final deste.

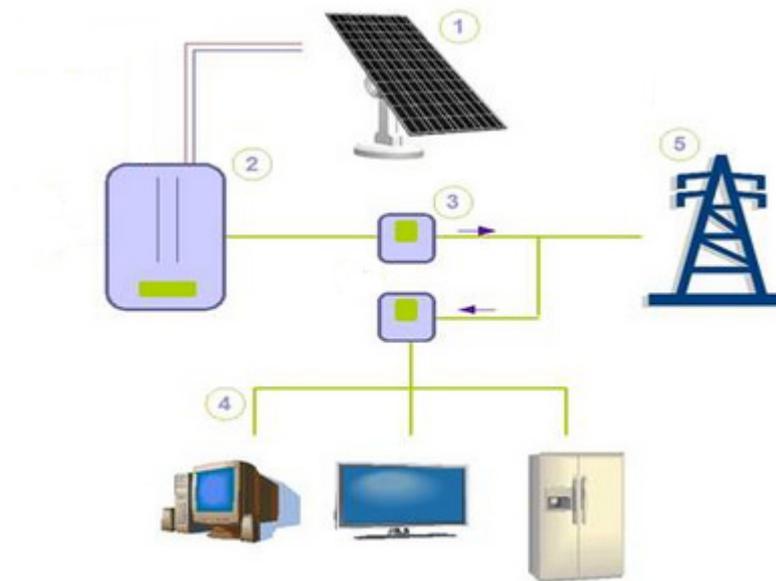


Figura 2-3 Diagrama de blocos sistema fotovoltaico ligado à rede eléctrica [55]

#### Legenda da Figura 2-3:

- 1: Pannel Fotovoltaico
- 2: Inversor
- 3: Contador de energia
- 4: Equipamento de Consumo Eléctrico
- 5: Rede eléctrica

## 2.3 Células Fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é o elemento mais pequeno do sistema fotovoltaico. A função de uma célula consiste em converter directamente a energia solar em electricidade. Grande parte das células fotovoltaicas é constituída por silício, sendo este um semiconductor. O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, representando 27% da sua possível massa. Podemos-lo encontrar na natureza de diversas formas, normalmente como areia, mas nunca como silício puro, na Figura 2-4 pode observar-se cristais de silício [20].



Figura 2-4 Cristais de silício [25]

O átomo de silício contém catorze electrões, tendo na última camada quatro electrões. Estes estão compartilhados por ligações covalentes, e portanto, não têm liberdade de movimentar-se pelo cristal. Sendo assim, o silício cristalino não é um bom condutor de electricidade, por isso é submetido a um processo de dopagem, onde são adicionadas impurezas que vão alterar as propriedades eléctricas deste. Estas impurezas podem pertencer ao grupo III ou V da tabela periódica, de que são exemplo, o boro e o fósforo, respectivamente.

O boro é uma das impurezas normalmente utilizadas para dopar o silício, o átomo do contém três electrões na última camada. Quando o silício é dopado com boro formam-se lacunas devido ao facto, de o átomo ter menos um electrão na banda de valência que o de silício, obtém-se assim um material com défice de electrões, ou seja um semiconductor do tipo P.

O fósforo é outra das impurezas utilizadas para dopar o silício, este pertence ao grupo V da tabela periódica, o átomo de fósforo contém cinco electrões na última

camada. Quando o silício é dopado com fósforo, quatro dos seus electrões são compartilhados, restando apenas um electrão que não faz parte da ligação covalente, mas que ainda assim é atraído pela carga positiva do núcleo do fósforo, obtém-se desta forma um semiconductor do tipo N.

Unindo estas duas camadas obtém-se uma junção P-N, que gera um campo eléctrico, esta junção comporta-se como um díodo e por essa razão é frequentemente representada por um díodo. É este mesmo campo que faz com que os electrões saltem e os disponibiliza ao circuito eléctrico exterior sob a forma de corrente eléctrica. No mesmo instante, as lacunas movem-se na direcção oposta, ou seja para a superfície positiva onde as esperam os electrões para se recombinarem.

Na zona da junção P-N verifica-se que os electrões que se encontram livres no semiconductor do tipo N, combinam-se com as lacunas do semiconductor do tipo P, levando a que exista um excesso de cargas positivas na zona tipo N e um excesso de cargas negativas na zona tipo P.

Quando os electrões deixam a zona tipo N ocorre o surgimento de um excesso de cargas positivas na fronteira junção P-N, da mesma forma ocorre um excesso de cargas negativas na zona tipo P. Este desequilíbrio de cargas que ocorre na fronteira da junção P-N é responsável pelo surgimento de um campo eléctrico que se irá opor ao fluxo dos electrões e lacunas, e assim uma situação de equilíbrio é atingida, ou seja a energia que os electrões dispõem não é suficiente para que estes vençam a barreira de potencial da junção. No silício a energia que um electrão deve adquirir para passar da banda de valência para a banda de condução é 1,12 eV [21].

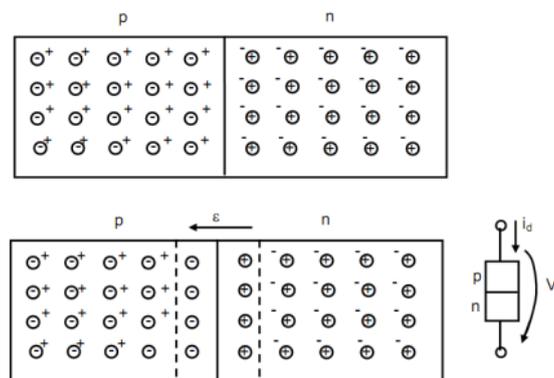


Figura 2-5 Movimento dos electrões junção P-N [22]

No momento em que luz incide sobre a célula fotovoltaica, ocorre um fenómeno muito importante, a barreira de potencial da junção é ultrapassada. A luz é constituída

por fótons. Quando esta incide sobre a célula, alguns fótons vão ser absorvidos na junção P-N, esta situação vai provocar com que os electrões saltem da banda de valência onde se encontram, para a banda de condução tornando-se electrões livres, que vão aparecer na zona abrangida pelo campo eléctrico da junção P-N.

A zona do tipo N vai atrair os electrões livres, uma vez que, esta zona se encontra com uma baixa concentração de cargas negativas, surgindo desta forma lacunas, que virão mais tarde a ser ocupadas por outros electrões dando assim origem a pares electrão-lacuna na zona do tipo P.

Este movimento de electrões é responsável pelo aparecimento de uma corrente da zona do tipo N para a zona do tipo P, utilizando um condutor externo, liga-se a camada positiva à camada negativa e gera-se então uma corrente eléctrica, correspondente ao fluxo de electrões na ligação. Esta corrente vai existir enquanto incidir luz na célula, e será proporcional à intensidade dessa incidência da luz [22].

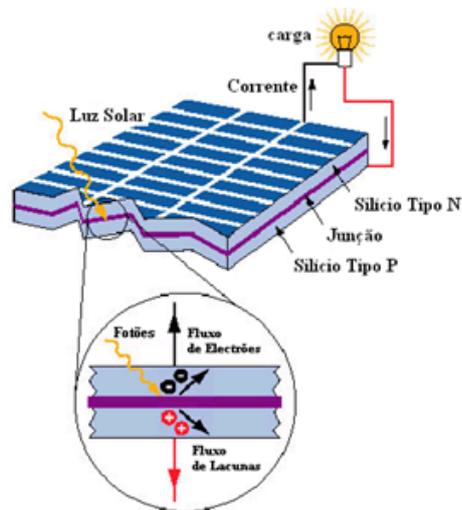


Figura2-6 Conversão directa da radiação solar em electricidade [56]

### 2.3.1 Tipos de Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são a parte mais importante do sistema fotovoltaico, convertendo a energia solar em energia eléctrica. Actualmente podemos encontrar no mercado vários tipos de células. As que têm um maior peso no mercado são as células de silício cristalino, seguidas depois das células de película fina, como se observa na Figura 2-7.

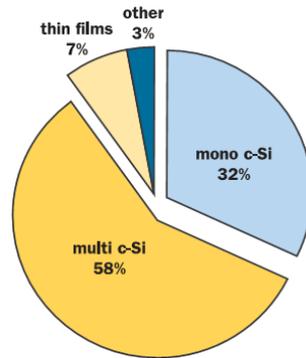


Figura 2-7 Produção de células fotovoltaicas [21]

### 2.3.2 Células de silício cristalino

As células de silício cristalino têm dominado a indústria fotovoltaica desde o início desta. É uma tecnologia bastante conhecida e fiável, não sendo por isso de estranhar que seja líder mundial com cerca de 90% de cota do mercado e com um crescimento estimado nos últimos 5 anos de mais de 50%. Com o seu preço cada vez mais atractivo, devido ao mercado em franco crescimento, que se deve às inúmeras políticas de incentivo à instalação de sistemas fotovoltaicos [21].

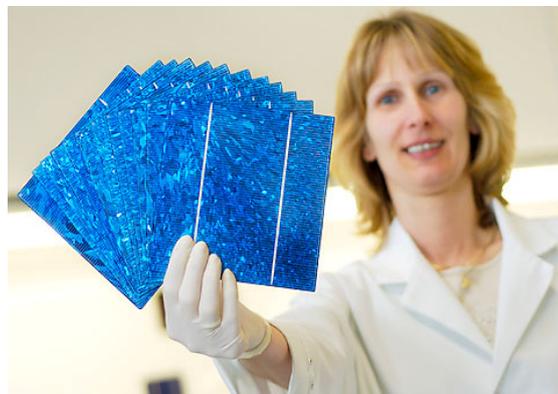


Figura2-8 Célula Fotovoltaica [25]

### Tipo de células

**Células mono-cristalinas:** Estas células possuem um rendimento eléctrico que ronda os 24,7% em laboratório e cerca de 16% em produção industrial. As técnicas utilizadas para a produção deste tipo de células são complexas e caras, devido à grande quantidade de energia consumida durante o seu fabrico, assim como a necessidade de utilizar-se materiais em estado muito puro cerca de 98% a 99% o que reflecte-se no preço final elevado ao consumidor [22].

**Células poli-cristalinas:** Estas células possuem um rendimento eléctrico de cerca de 13%. O processo de fabrico destas não é tão complexo como o das mono-cristalinas, em grande parte, devido ao facto de o silício utilizados nestas células conter imperfeições, resultante do seu processo de fabrico. O custo de produção é inferior ao das células mono-cristalinas, por necessitarem de menos energia durante o seu fabrico, são as células que apresentam uma melhor relação preço/rendimento sendo por isso bastante utilizadas [23].

### 2.3.3 Células fotovoltaicas de filme de fino

As células solares de película fina, são constituídas por finas películas de silício, que justamente pela sua reduzida espessura, utilizam muito menos silício e permitem que o preço final seja muito mais atractivo, do que células de silício cristalino. Além disso o seu processo de fabrico apresenta um baixo consumo de energia. A grande desvantagem das células solares de película fina é que estas têm um baixo rendimento, convertendo entre 8% a 10% da luz solar em electricidade.

Actualmente em ambiente laboratorial já se alcançam cerca de 25% de rendimento. Este último factor aliado ao preço reduzido faz com que este tipo de tecnologia tenha tudo para tornar-se uma das principais tecnologias a serem utilizadas [24].

### Tipo de células

**Células de silício amorfo:** Estas células são construídas por finas camadas de silício. A base de deposição destas camadas é produzida com produtos de baixo preço, como o plástico, vidro entre outros, disto resulta um baixo preço na construção, que se reflecte no preço final das células. Em contrapartida apresentam um rendimento eléctrico bastante reduzido entre 8% a 10%. As células de silício amorfo são películas muito finas, o que possibilita serem utilizadas como material de construção exemplo: telhas em habitações, como se vê na figura 2-9. Desta forma consegue-se obter grandes áreas de exposição solar, e assim combater o baixo rendimento das células [22].



Figura 2-9 Aplicação de painéis de silício amorfo [26]

### 2.3.4 Outros tipos de células

Para além das células fotovoltaicas baseadas em silício, existem outras que aos poucos vão sendo desenvolvidas, estando principalmente a sua utilização confinada a laboratórios ou aplicações especiais. Destas células salientam-se CIS (Copper Indium Deselenid), Cd-Te (Cadmium telluride), Dye-sensitized, GaAs (Gallium arsenide), nano células e Células Orgânicas. Como estas não foram utilizadas, nem se enquadram na presente dissertação, fica aqui apenas uma breve referência a elas.

## 2.4 Modelo matemático de uma célula fotovoltaica

O modelo equivalente de uma célula de silício, pode ser descrito através do circuito eléctrico representado na Figura 2-11 [18] [27]. Este é o modelo mais simples que se pode analisar. Sendo que existem outros modelos mais completos, onde são adicionadas duas resistências ao modelo, uma em serie com a carga e outra em paralelo com o díodo. Com estas duas resistências obtém-se um modelo mais exacto, mas também de análise mais complicada, sendo que foi optado efectuar a análise do modelo sem incluir as duas resistências, uma vez que a complexidade da análise, não é justificada por uma melhoria nos resultados obtidos.

O circuito da Figura 2-10 é constituído por uma fonte de corrente, um díodo e uma carga. A corrente  $I_s$ , representa a corrente eléctrica gerada por um determinado nível de insolação ao atingir a superfície activa da célula. O díodo representa a junção P-N que é atravessada por uma corrente  $I_D$ , que depende da tensão existente nos

terminais da célula. A corrente  $I$  representa a corrente fornecida à carga e a tensão  $V$  representa a tensão aplicada a carga.

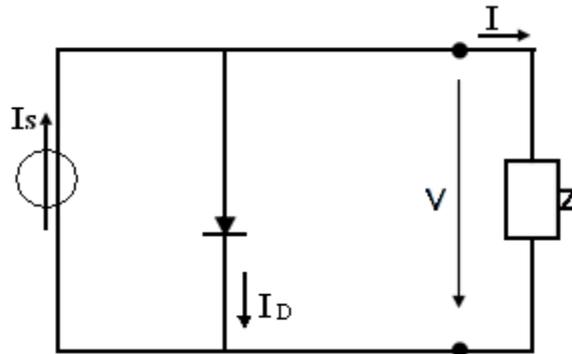


Figura2-10 Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica [27]

A seguinte análise tem como base os artigos de Castro, Rui; “Energias Renováveis e Produção Descentralizada Introdução à Energia Fotovoltaica” [18]; e o artigo de Silva, Marco Faustino; “Impacto da Microgeração Fotovoltaica na Rede de Distribuição utilizando o Trânsito de Energia Trifásico” [27].

Através de uma análise à Figura 2-10 temos que a corrente que atravessa a carga  $Z$  é dada por:

$$I = I_s - I_D \quad (2.1)$$

A corrente no díodo é

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V \cdot q}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

$I_D$  – Corrente que atravessa o díodo;

$I_0$  – Corrente inversa máxima de saturação do díodo;

$V$  – Tensão aos terminais da célula;

$T$  – Temperatura de funcionamento da célula em Kelvin;

$k$  – Constante de Boltzman ( $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ );

$q$  – Carga do electrão ( $q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ );

$m$  – factor de idealidade do díodo (díodo ideal:  $m = 1$ ; díodo real:  $m > 1$ );

A corrente que atravessa a carga fica então combinando (2.1) e (2.2):

$$I = I_s - I_0 \left( e^{\frac{V \cdot q}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Analisando a equação (2.3), verifica-se que se desconhece os parâmetros  $I_s$ ,  $I_0$  e  $m$ , como tal e para se conseguir determinar esses mesmos parâmetros é necessário conhecer os dados que os fabricantes fornecem nas folhas de especificações técnicas, nomeadamente os valores das tensões e correntes na carga nos três principais pontos de funcionamento de uma célula. A Figura 2-11 apresenta a curva da característica eléctrica de uma célula fotovoltaica. Através da análise da curva  $I * U$  é possível visualizar os três principais pontos de funcionamento da célula que são: o circuito aberto, curto-circuito e o ponto de máxima potência:

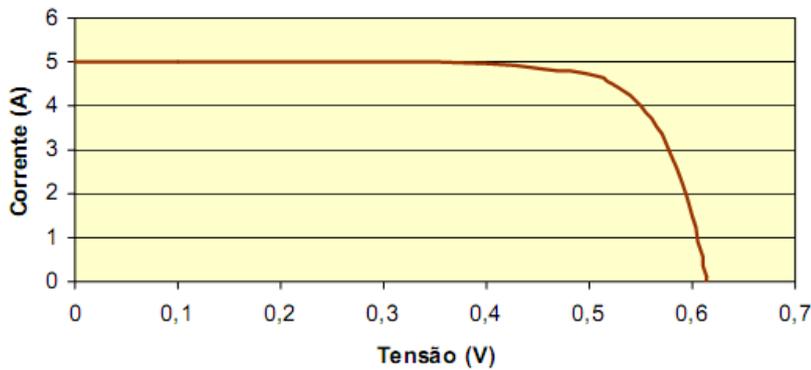


Figura 2-11 Curva  $I * U$  [18]

Os dados presentes na Tabela 2-1 são fornecidos pelos fabricantes para, que seja possível calcular os parâmetros do modelo em estudo. Os dados fornecidos pelos fabricantes, são obtidos através de testes efectuados em condições STC, ou seja,  $1000\text{W/m}^2$  de potência luminosa incidente total, com uma distribuição espectral, conhecida como massa de ar 1.5 (air mass 1.5 ou AM 1.5) e temperatura das células de  $25^\circ\text{C}$ , conseguindo-se assim desta forma uma uniformização nos dados.

Tabela 2-1 Dados fornecidos pelo fabricante

Pontos de Funcionamento	Parâmetros	Simbologia
Curto-Circuito	Intensidade de corrente na carga	$I_{cc}^r$
Circuito-Aberto	Tensão na Carga	$V_{ca}^r$
Ponto de Potência Máxima	Tensão na Carga	$V_{mpp}^r$
	Intensidade de corrente na carga	$I_{mpp}^r$

**Situação de curto-circuito:**

A tensão na carga é zero, e a corrente de curto-circuito,  $I_{cc}$ , é o valor máximo de intensidade de corrente que atravessa a carga. O seu valor é característico da célula, sendo que este é fornecido pelos fabricantes nos dados técnicos da célula para condições padrão de teste (STC ou *standard test condition*), como se observar na Tabela1.

$$V=0 \tag{2.4}$$

$$I_c = I_{cc}^r \tag{2.5}$$

**Situação de circuito-aberto:**

Em circuito-aberto a intensidade de corrente que atravessa a carga é zero, a tensão em vazio  $V_{ca}$  é o maior valor que a tensão toma aos terminais da célula, o seu valor é característico da célula e é fornecido pelo fabricante nas condições STC.

$$V = V_{ca} \tag{2.6}$$

$$I = 0 \tag{2.7}$$

Logo fica:

$$I_0^r = \frac{I_c^r}{\frac{V_{ca}^r * q}{e * m * k * T^r} - 1} = \frac{I_{cc}^r}{\frac{V_{ca}^r * q}{e * m * k * T^r} - 1} \tag{2.8}$$

Podemos simplificar a equação (2.8) assumindo que a função exponencial é muito maior do que um. Assim sendo temos:

$$I_0^r = \frac{I_{cc}^r}{\frac{V_{ca}^r * q}{e * m * k * T^r}} \tag{2.9}$$

Para se conseguir determinar o parâmetro  $m$ , recorre-se às condições de potência máxima da célula fotovoltaica.

**Situação de potência máxima:**

É neste ponto de funcionamento que a célula fornece a carga a máxima potência para um determinado instante de tempo.

Tensão na carga:  $V_{max}^r$

Intensidade de corrente na carga:  $I_{max}^r$

Assim a equação (2.3) fica:

$$I_{max}^r = I_c^r - I_o^r * \left( e^{\frac{V_{max}^r * q}{m * k * T}} - 1 \right) \cong I_{cc}^r - I_o^r * \left( e^{\frac{V_{max}^r * q}{m * k * T}} \right) \quad (2.10)$$

Substituindo o valor de  $I_o^r$  da equação (2.9) na equação (2.10) podemos assim calcular o valor do parâmetro  $m$ .

$$m^r = \frac{V_{max}^r - V_{ca}^r}{\frac{k * T^r}{q} * \ln \left( 1 - \frac{I_{max}^r}{I_{cc}^r} \right)} \quad (2.11)$$

A potência máxima da célula é calculada através de (2.12):

$$P_{max}^r = V_{max}^r * I_{max}^r \quad (2.12)$$

Os parâmetros acima calculados foram determinados em concordância com as condições STC, o que significa que estes parâmetros foram calculados para condições ideais de funcionamento, tanto de temperatura como de radiação incidentes. Na realidade o que acontece é muito diferente, pois as células fotovoltaicas são sujeitas a condições climáticas imprevisíveis. Os parâmetros calculados anteriormente no STC, vão agora ser novamente calculados, excepto o parâmetro  $m$  pois este é considerado constante, para qualquer condição climática, ou seja, para qualquer temperatura e radiação.

**Situação de Curto-Circuito:**

A equação (2.5) fica:

$$V = 0 \quad \rightarrow \quad I_s = I_{cc} \quad (2.13)$$

A equação (2.8) fica:

$$I_0 = \frac{I_s}{\frac{V_{ca} * q}{e * m * k * T} - 1} = \frac{I_{cc}}{\frac{V_{ca} * q}{e * m * k * T} - 1} \quad (2.14)$$

A corrente em curto-circuito é proporcional á radiação solar:

$$I_s = I_{cc} = \frac{G}{G_r} I_{cc}^r \quad (2.15)$$

Para a situação de Circuito-Aberto temos:

$$V = V_{ca} \quad (2.16)$$

$$I = 0 \quad (2.17)$$

$$0 = I_s - I_0 \left( e^{\frac{V}{m * VT}} - 1 \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{I_s}{I_0} = \left( e^{\frac{V}{m * VT}} - 1 \right) \quad (2.19)$$

$$\ln \left( \frac{I_s}{I_0} + 1 \right) = \frac{V_{ca}}{m * VT} \quad (2.20)$$

$$V_{ca} = m * VT * \ln \left( \frac{I_s}{I_0} + 1 \right) \quad (2.21)$$

A corrente inversa de saturação pode ser obtida através das características do material e da temperatura:

$$I_0 = I_0^r * \left( \frac{T}{T^r} \right)^3 e^{\frac{\epsilon * q}{m * k} \left( \frac{1}{T^r} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2.22)$$

Onde:

$m'$  - factor de qualidade equivalente ( $m' = m / N_{sm}$ ),  $N_{sm}$  é o número de células em série.

$\epsilon$  - Band Gap do silício ( $\epsilon = 1,12 \text{ eV}$ )

Através da equação (2.22) é possível calcular a corrente de saturação para qualquer valor de temperatura.

O ponto de máxima potência como já foi referido na equação (2.12) é o ponto onde a célula fornece a máxima potência à sua saída.

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (2.23)$$

De referir que  $V_{max}$  e  $I_{max}$  são a tensão e corrente no ponto de máxima e não a tensão e corrente máxima da célula. Utilizando a equação (2.23) e a equação que rege o circuito equivalente (2.3), obtém-se a equação da potência máxima, para uma determinada temperatura e radiação solar.

$$P_{max} = V_{max} * \left[ I_s - I_0 \left( e^{\frac{V_{max}*q}{m*k*T}} - 1 \right) \right] \quad (2.24)$$

A potência máxima obtém-se derivando a equação (2.24) em ordem a  $V_{max}$ , uma vez que se desconhece o valor dos parâmetros  $P_{max}$  e  $V_{max}$ , para assim desta forma obterem-se os valores dos mesmos parâmetros. Então igualando a derivada a zero e depois de alguns cálculos, fica:

$$e^{\frac{V_{max}*q}{m*k*T}} = \frac{\frac{I_s}{I_0} + 1}{1 + \frac{V_{max}*q}{m*k*T}} \quad (2.25)$$

A equação (2.25) é transcendente, o que significa que é necessário aplicar um método numérico, para a resolver, recorrendo ao método iterativo de Newton é possível então possível determinar o valor  $V_{max}$ . Arranjando a equação (2.25) para facilitar os cálculos e também a percepção da mesma fica a equação (2.26) em que  $V=V_{max}$ .

$$f(V) = \frac{m*k*T}{q} \ln \left( \frac{\frac{I_s}{I_0} + 1}{1 + \frac{V*q}{m*k*T}} \right) - V \quad (2.26)$$

Para o cálculo de  $V_{max}$  é necessário encontrar o valor de  $V=V_{max}$ , quando a função (2.24) for igual a zero. Então derivando (2.26):

$$\frac{df(V)}{dV} = - \left( \frac{1}{1 + \frac{V*q}{m*k*T}} + 1 \right) \quad (2.27)$$

Aplicando agora a (2.27) o método iterativo de Newton:

$$V_{max}^{(k+1)} = V_{max}^{(k)} - f(V_{max}^{(k)}) * \left( \left( \frac{df(V)}{dV} \right)_{V_{max}^{(k)}} \right)^{-1} \quad (2.28)$$

A primeira iteração é efectuada numa estimativa de  $V_{max}^{(0)}$ , como valor de tensão no ponto de máxima potência fornecida pelo fabricante, como primeira estimativa de  $V_{max}$ . Quando por fim se atinge a convergência, fica-se com o valor de tensão no ponto de máxima potência, sendo que assim só falta calcular o valor da potência e da corrente, com base nas equações anteriores.

## 2.5 Curva característica do módulo fotovoltaico

A curva I-V de um módulo fotovoltaico está representada na Figura 2-13, curva azul, depende essencialmente da temperatura, irradiação solar e o material que constitui

as células fotovoltaicas. Esta curva obtêm-se para um determinado instante de tempo, com uma dada temperatura e irradiação solar, mas altera-se constantemente ao longo do dia, dependendo dos parâmetros anteriores. Nesta curva é fornecido o ponto de máxima potência, sendo ainda possível observar a dualidade de comportamento do painel, à esquerda como fonte de corrente e à direita como fonte de tensão [28]. Os fabricantes fornecem essas curvas características dos módulos fotovoltaicos, sendo que os pontos mais importantes dessas curvas são:

- **Vca:** tensão em circuito-aberto
- **Icc:** tensão em curto-circuito
- **Vmpp:** Tensão de máxima potência
- **Impp:** Corrente de máxima potência

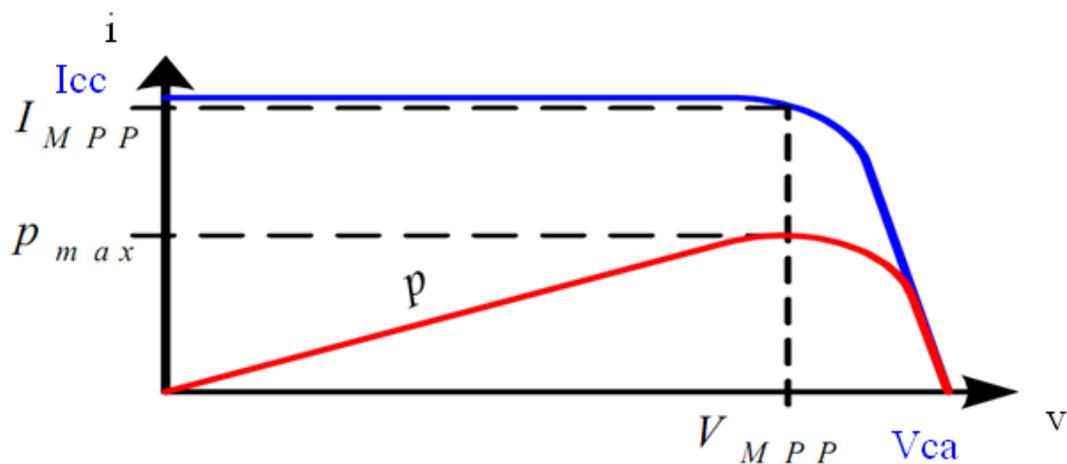


Figura 2-12 Curvas características módulo fotovoltaico [31]

O clima afecta de forma natural a performance e rendimento dos módulos fotovoltaicos. A potência que o módulo gera, é proporcional à quantidade de luz solar que incide sobre o mesmo, por isso nuvens ou poluição atmosférica, vão afectar o rendimento deste.

Assim, para permitir o máximo aproveitamento, os painéis são instalados com uma inclinação e uma direcção pré-determinadas, relativamente à zona em que estes se encontram [29]. Observando a Figura 2-13 é possível concluir que a potência de um módulo fotovoltaico e a temperatura de funcionamento estão interligadas, ou seja, existe uma relação de causa/efeito. O painel debita uma maior potência quando a temperatura é menor. A temperatura é um elemento muito importante, ao contrário do que a maioria das pessoas pensa, os módulos fotovoltaicos geram uma maior potência, quando se

encontram a temperaturas mais baixas. Isto porque as células fotovoltaicas são componentes electrónicos que geram electricidade através da luz e não através do calor, como a maior parte dos aparelhos electrónicos, as células solares funcionam mais eficientemente a temperaturas baixas [30].

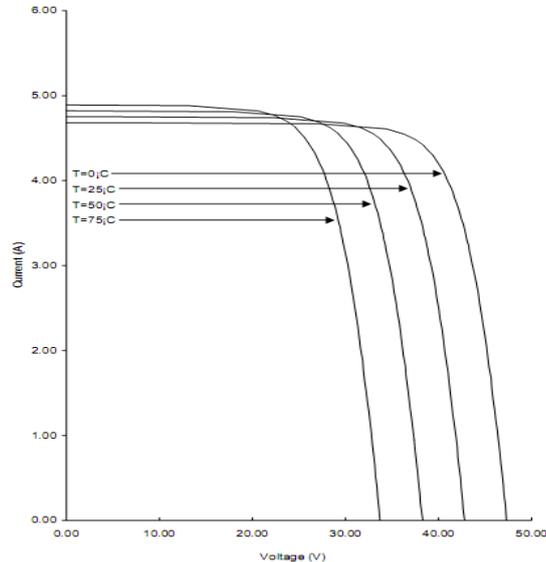


Figura2-13 Curva  $I * U$  BP2150S [32]

## 2.6 Ponto de potência máxima (MPP)

O ponto de potência máxima (MPP-*Maximum Power Point*) de um painel fotovoltaico é o ponto da curva tensão vs corrente de saída do painel, em que se obtém a potência máxima gerada. A curva característica da Figura 2-14 mostra, que existe apenas uma tensão e somente uma corrente, para a qual a potência máxima pode ser extraída.

A potência máxima altera-se com as condições ambientais (temperatura e radiação), idealmente o painel, devia funcionar sempre à potência máxima. Mas tal não acontece, devido a diversos factores: posição do sol, alteração no nível de radiação solar, variações de temperatura, poluição atmosférica e ao próprio envelhecimento. Uma vez que o ponto tende a deslocar-se em função de vários factores, é necessário um sistema para seguir o ponto, de forma a colocar o módulo a funcionar à potência máxima [28].

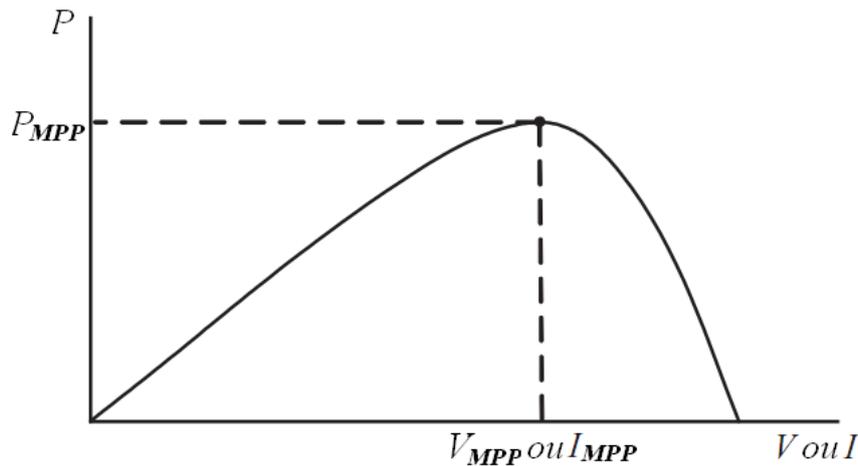


Figura2-14 Ponto de potência máxima [33]

## 2.7 Seguidor do ponto de máxima potência (MPPT)

O seguidor do ponto de máxima potência é comumente designado por MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), este é um sistema electrónico que opera no painel fotovoltaico, para que este, seja capaz produzir a máxima potência num dado instante.

O MPPT não é um sistema mecânico que move fisicamente os painéis, para estes estarem posicionados directamente para o sol, pelo contrário, é um sistema electrónico que altera o ponto de funcionamento electrónico dos painéis, para que estes sejam capazes de fornecer a potência máxima [34].

As principais dificuldades para se conseguir obter o MPP prendem-se com o facto de este não ser constante, ou seja, o ponto está constantemente a alterar-se devido a alterações da temperatura e da radiação, que incidem sobre o painel fotovoltaico. O outro factor é relativo à necessidade de alterar a tensão do painel, para o processo de busca do ponto e ao mesmo tempo, conseguir fornecer uma tensão constante à carga.

Como solução utiliza-se um conversor de tensão DC/DC que funciona como um interface, entre o painel e a carga, ou banco de baterias. Alterando-se o *duty-cycle* do conversor, consegue-se obter a máxima potência à saída do painel

Para se perceber o funcionamento de um MPPT, primeiramente é necessário perceber como funcionam os controladores de carga convencionais. Quando estes controladores carregam uma bateria, eles simplesmente ligam os painéis directamente às baterias. Isto força os painéis a operarem à tensão das baterias, que tipicamente não é a tensão ideal de operação, para a qual os painéis conseguem fornecer a máxima potência.

Logo com este tipo de controladores, não se consegue obter o melhor desempenho por parte dos módulos fotovoltaicos, portanto o MPPT trabalha em conjunto com um conversor DC/DC, tipicamente um conversor do tipo *Buck* ou do tipo *Boost*, como se pode observar na Figura 2-15, e um algoritmo de controlo que permite encontrar e manter o painel no ponto de máxima potência [35].

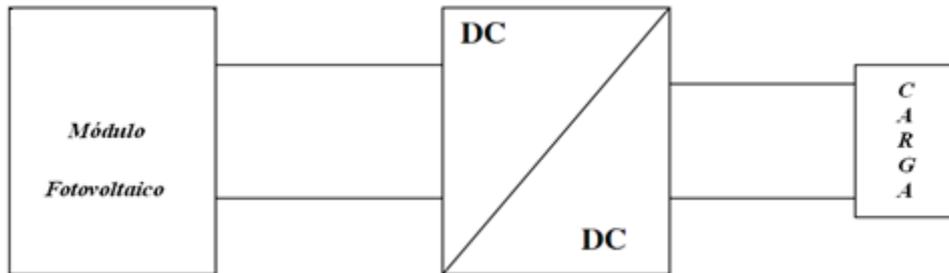


Figura 2-15 Diagrama de blocos de um MPPT típico [36]

## 2.8 Aplicações do seguidor do ponto de máxima potência (MPPT)

Os seguidores do ponto de máxima potência são utilizados maioritariamente em sistemas, onde as fontes de energia não são lineares. Como são exemplos os painéis solares ou geradores eólicos. Os MPPT são utilizados em aplicações solares, tais como carregadores de baterias e sistemas isolados/ligados à rede eléctrica [36].

**Carregamento de baterias:** O MPPT permite controlar o carregamento das baterias típicas, evitando que estas tenham um descarregamento profundo e sobrecargas, prolongando desta forma a vida útil das mesmas. Este controlo é efectuado por um controlador de carga que existe na maioria dos MPPT.

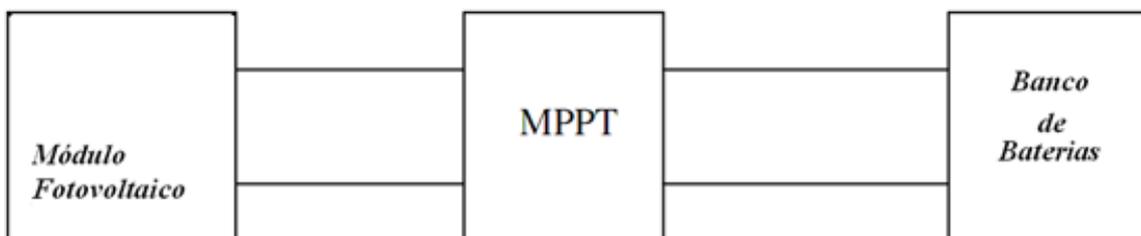


Figura 2-16 Diagrama de blocos carregamento de baterias [36]

**Sistemas ligados à rede e sistemas isolados:** neste tipo de sistemas, o painel solar fornece energia à rede ou às cargas, um conversor DC/DC é utilizado de forma a transformar os níveis de tensão nos desejados. Um outro conversor desta vez DC/AC é utilizado para converter corrente contínua para alternada, de forma a poder-se efectuar a ligação à rede ou alimentar cargas eléctricas, como se observa na Figura 2-17.

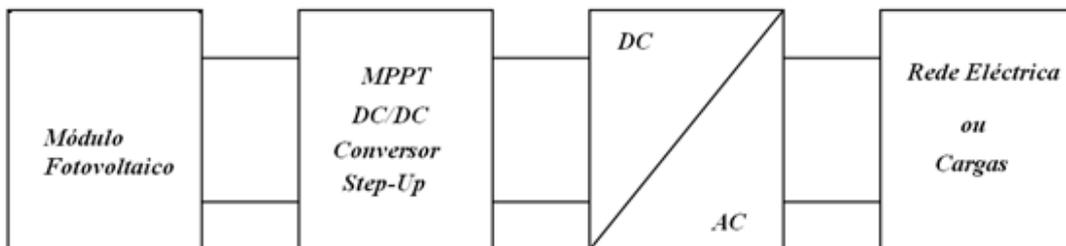


Figura 2-17 Diagrama de blocos Sistemas ligados à rede e sistemas isolados [36]

**Sistemas de bombagem de água:** os painéis fotovoltaicos podem ser usados, para fazerem funcionar motores eléctricos em aplicações agrícolas, que ficam em locais distanciados da rede eléctrica, nomeadamente para bombagem de águas de regadio. Usando-se um MPPT consegue-se obter um aumento no fluxo de água bombeada.

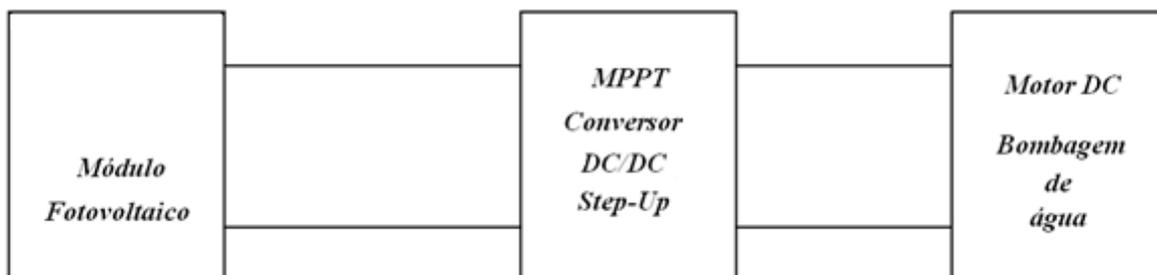


Figura 2-18 Diagrama de blocos Sistema de bombagem de água [36]

## 2.9 Métodos de busca do ponto de máxima potência

Existem actualmente inúmeros artigos técnicos, relativos a técnicas de busca do MPP, em virtude do rápido crescimento da tecnologia fotovoltaica, assim como de toda a tecnologia que lhe está associada. Contudo existem três métodos que estão largamente estudados e aplicados que são: Perturbação e Observação, Incremental da Indutância e Tensão Constante [37].

### 2.9.1 Método da Perturbação e Observação

Este é o método de procura mais utilizado, devido à sua fácil implementação. O método efectua mediações de tensão e de corrente do painel, calculando assim a potência que está a ser gerada. A forma mais básica deste método opera da seguinte forma: o *duty-cycle* do conversor de tensão é alterado, criando uma perturbação na potência de saída do painel. Em seguida esta é medida e guardada, para servir de comparação com o próximo valor medido. Se a potência gerada aumentar depois da alteração do *duty-cycle*, então este vai ser alterado outra vez na mesma direcção. Se pelo contrário a potência gerada pelo painel diminuir, o *duty-cycle* vai ser alterado na direcção oposta, na Figura 2-19 é possível observar um algoritmo típico deste tipo de método.

Este comportamento vai causar com que a potência oscile em torno do ponto de máxima potência. Uma vez atingido este ponto, e para conseguir-se manter baixa a variação de potência, a alteração do *duty-cycle* também é bastante baixa [38].

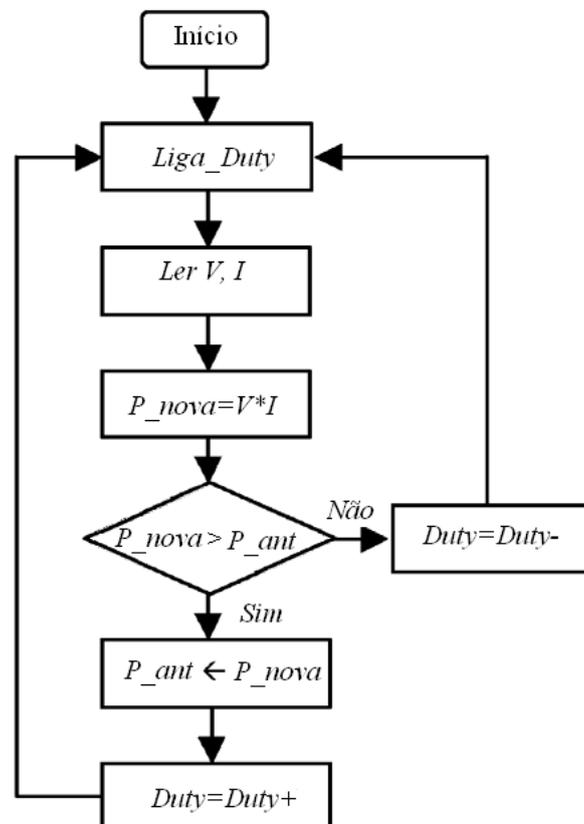


Figura 2-19 Algoritmo Perturba e Observa [39]

## 2.9.2 Método da Condutância Incremental

Este método baseia-se na condutância do painel, ou seja no facto de a derivada da potência de saída do painel, em relação à tensão ser zero no ponto de máxima potência, ou seja, é uma evolução do método da Perturbação e Observação. Este usa a equação da potência  $P = V * I$ , onde P é a potência do painel, V a tensão do painel e I a corrente, derivando a equação anterior em ordem a V e temos:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2.29)$$

Fazendo:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ e } \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.30)$$

Se o ponto de operação está à direita da curva de potência, fica:

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ e } \frac{dI}{dV} < \frac{I}{V} \quad (2.31)$$

Se o ponto de operação está à esquerda da curva de potência:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ e } \frac{dI}{dV} > \frac{I}{V} \quad (2.32)$$

O método vai procurar o ponto da tensão, onde a condutância é igual à condutância incremental ou seja:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.33)$$

Se esta condição não é atingida, a direcção da perturbação tem de ser calculada novamente, usando a relação anterior, se  $\frac{dP}{dV} < 0$  então o MPPT está à direita do ponto de máxima potência, se  $\frac{dP}{dV} > 0$ , o MPPT está à esquerda do ponto de máxima potência. Este método apresenta várias vantagens sobre o método da perturbação e observação, nomeadamente consegue determinar exactamente quando se atinge o ponto de máxima potência, enquanto o outro oscila em torno do ponto de máxima potência. Para além disso, consegue rapidamente atingir o MPP, em condições climatéricas instáveis, com uma precisão bastante superior ao método da perturbação e observação. A desvantagem mais significativa deste método, quando comparado com outros é o seu

grau de complexidade [37]. Na Figura 2-20 está representada o método da condutância incremental.

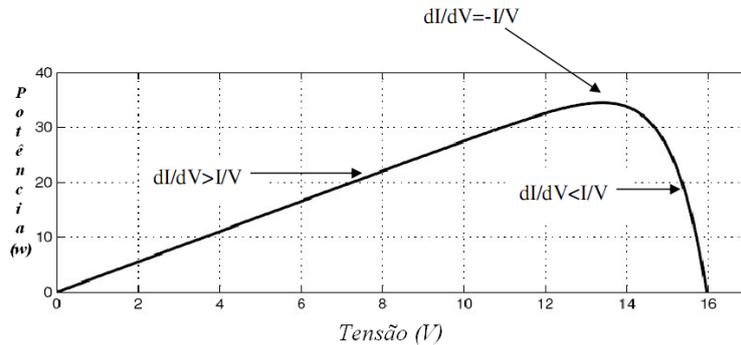


Figura 2-20 Método da condutância incremental [36]

### 2.9.3 Método da Tensão Constante

O principio de funcionamento deste parte do principio que o MPP do módulo fotovoltaico é atingido por volta dos 75% da tensão de circuito aberto do pannel. Então medindo a tensão em circuito aberto, obtém-se uma tensão de referência que vai ser utilizada para colocar o módulo no MPP. Um problema desta técnica é que a tensão em circuito aberto, do módulo, varia com a temperatura. Assim, com o aumento da temperatura a tensão de circuito aberto vai alterar-se ao longo do tempo, sendo necessário por isso efectuar medições constantes desta. Podem por isso, ocorrer situações em que o pannel não esteja realmente a operar próximo MPP. Nestas medições a carga precisa ser desligada do pannel, e portanto a potência nesse instante não vai ser utilizada, perdendo-se eficiência deste modo [37].



## Capítulo 3

### Circuitos Electrónicos de Interface

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo é feita uma análise teórica aos circuitos electrónicos de interface utilizados, nomeadamente ao conversor de tensão DC/DC e ao inversor de tensão monofásico. Em relação ao conversor DC/DC e ao inversor de tensão, foram analisados os modos de funcionamento e os respectivos sistemas de controlo destes.

#### 3.2 Conversor de tensão DC/DC

O conversor de tensão DC/DC é uma fonte comutada, onde se consegue obter uma tensão regulada à saída. No circuito MPPT, o conversor DC/DC é uma parte essencial, pois é através dele que é feita a alteração da tensão do painel. Quando se pretende uma tensão contínua de saída, diferente daquela que é fornecida, pelas baterias e pelos painéis, pode ser utilizado o conversor DC/DC. Este conversor serve tanto para elevar, como para diminuir a tensão. Neste tipo de aplicação é frequente utilizarem-se dois tipos de conversores de tensão, que são o conversor *Step-Down* e o conversor *Step-Up*. Em relação a este último irá ser feita, uma análise em pormenor ao seu funcionamento, uma vez que foi o circuito utilizado. Como já foi antes referido, os controladores de carga ao carregarem uma bateria, simplesmente ligam os painéis directamente às baterias, isto força os módulos a operarem à tensão da bateria, que tipicamente não é a tensão ideal de operação, para a qual os painéis conseguem fornecer a máxima potência. Logo com este tipo de controladores, não se consegue obter o melhor desempenho, por parte dos painéis fotovoltaicos. Por essa razão é imperativo o uso de conversores DC/DC para se obter um sistema eficiente [40].

#### 3.3 Conversor DC/DC Step-Up

A seguinte análise tem como base o livro *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* [43]. O conversor *Step-Up*, também conhecido por conversor *Boost* é uma topologia não isolada, ou seja, a tensão de entrada e a tensão de saída partilham a mesma massa. Este tipo de conversor apresenta uma tensão de saída, igual

ou superior à tensão de entrada. Observando a Figura 3-1 tem-se que o semiconductor de potência  $M$  é normalmente um mosfet de canal  $n$ , a bobina  $L$  em conjunto com o condensador  $C$  formam um filtro à saída, a resistência  $R$  representa a carga. Durante o funcionamento normal do *Step-Up*,  $M$  é repetidamente ligado e desligado, durante o tempo *ON* e o tempo *OFF*, tempo este que é governado pelo circuito de controlo do conversor, tema que irá ser abordado mais à frente.

Quando o  $M$  liga a corrente flui, através o bobina  $L$  desde a fonte de alimentação carregando  $L$ . Ao mesmo tempo a carga recebe energia, através do condensador de saída  $C$ . Quando  $M$  desliga, a corrente flui desde a fonte de energia, através  $L$  e do diodo para assim recarregarem o condensador de saída, e simultaneamente alimentarem a carga. Só depois de o diodo estar em condução, é que o filtro de saída composto por  $L$  e  $C$  é criado. Este filtro vai ser responsável por filtrar a sequência de impulsos e assim produzir a tensão de saída [41].

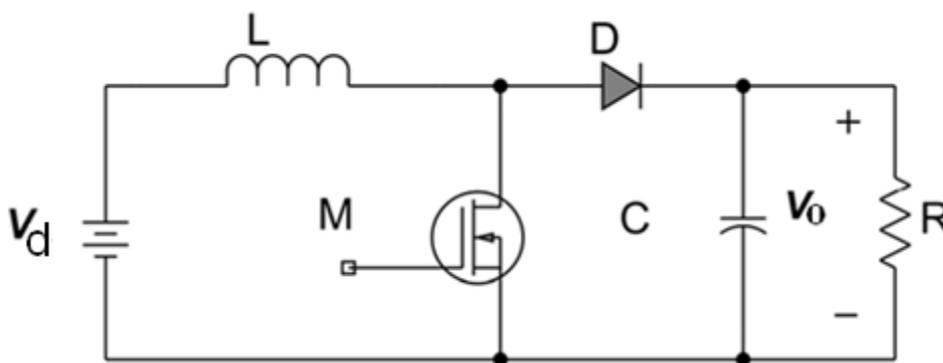


Figura 3-1 Conversor de tensão *Boost* [44]

### 3.3.1 Modo de Condução Contínua

O conversor *Boost* pode operar no modo de condução contínua, ou descontínua. No modo de condução contínuo ( $i_L(t) > 0$ ), a corrente circula continuamente em  $L$ . Na situação de condução contínua o *Step-Up* engloba dois estados por ciclo, o estado *ON* e o *OFF*. No estado *ON*,  $M$  está a conduzir enquanto o diodo não, no estado *OFF*,  $M$  não conduz e o diodo conduz [42].

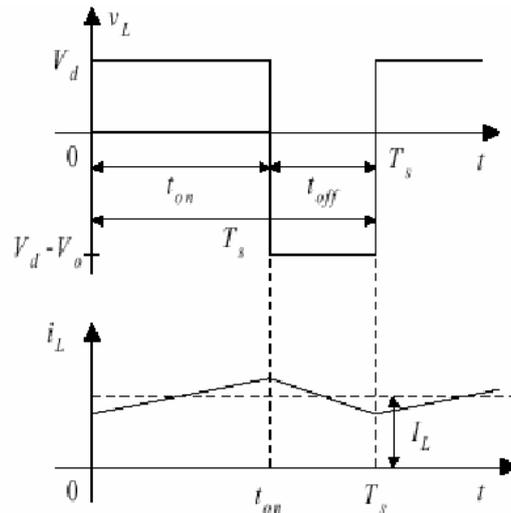


Figura 3-2 Formas de onda da tensão e corrente no modo contínuo [43]

**Estado ON:**

O tempo de duração do estado ON, Figura 3-3, onde  $D$  é o *duty-cycle*  $T_{ON} = D * T_s$ . Durante este estado a tensão fica  $V_p - (V_{DS} + R_L * I_L)$ , onde a carga é alimentada pelo condensador  $C$ .

$$V_L = L * \frac{di_L}{dt} \rightarrow \Delta I_L = \frac{V_L}{L} * \Delta T \quad (3.1)$$

$$\Delta I_L(+)= \frac{V_d - (V_{DS} + R_L * I_L)}{L} * T_{ON} \quad (3.2)$$

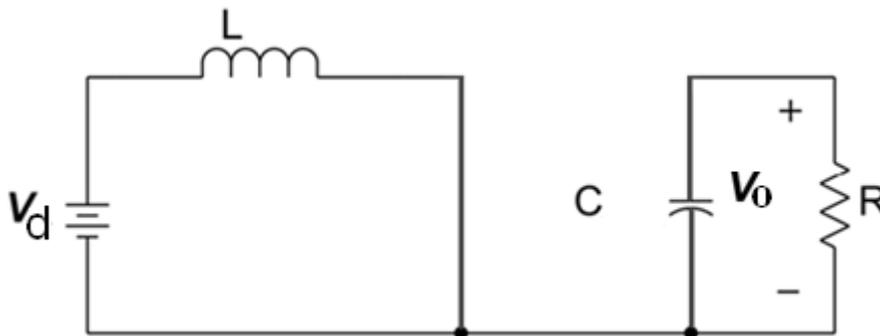


Figura 3-3 Estado de funcionamento ON [44]

**Estado OFF:**

O estado de duração do estado OFF, Figura 3-4, é  $T_{OFF}$  onde:

$$T_{OFF} = (1 - D) * T_s = T_s - (D * T_s) = T_s - T_{ON} \quad (3.3)$$



Figura 3-4 Estado de funcionamento *OFF* [44]

Quando M está desligado, este apresenta uma grande impedância entre a *drain* e a *source*, como tal a corrente deixa de passar por M e começa a fluir pelo diodo. A corrente em L diminui, e a tensão inverte a polaridade até, que o diodo entre em condução. Durante este estado, a tensão em L é constante e é igual a:

$$(V_o + V_D + R L \times I_L) - V_d \quad (3.4)$$

A corrente que flui através de L, decresce durante este período.

$$\Delta I_L(-) = \frac{(V_o + V_D + R L \times I_L) - V_d}{L} * T_{OFF} \quad (3.5)$$

Em regime permanente o aumento da corrente,  $\Delta I_L (+)$  durante o tempo *ON* e o decréscimo da corrente,  $\Delta I_L (-)$  durante o estado *OFF* são iguais. Como tal pode-se obter a relação de tensão do modo de condução contínuo da seguinte forma:

$$V_o = (V_d - R L * I_L) * \left(1 + \frac{T_{ON}}{T_{OFF}}\right) - V_D - V_{DS} * \left(\frac{T_{ON}}{T_{OFF}}\right) \quad (3.6)$$

$$V_o = \frac{V_d - R L * I_L}{1 - D} - V_D - V_{DS} * \frac{D}{1 - D} \quad (3.7)$$

A tensão  $V_o$  pode ser ajustada, uma vez que o *duty-cycle* D varia entre 0% e 100%. Se se considerar  $V_{DS}$ ,  $V_d$  e  $R L$  aproximadamente zero, fica:

$$V_o = \frac{V_d}{1 - D} \quad (3.8)$$

Pode verificar-se, e como já foi mencionado, a tensão de saída  $V_o$  é controlada pelo tempo em que o mosfet de potência se encontra a conduzir *TON*. A relação entre o valor médio da corrente na bobina  $I_L$  versus  $I_d$  e a corrente na saída  $I_o$  é:

O valor médio de VL é zero:

$$Vd * ton + (Vd - V0) * toff = 0 \quad (3.9)$$

Resolvendo:

$$\frac{V0}{Vp} = \frac{Ts}{toff} = \frac{1}{1-D} \quad (3.10)$$

Desprezando as perdas  $Pd = Po$ :

$$Vd * Id = Vo * Io \quad (3.11)$$

Sendo assim a relação entre corrente de entrada e corrente de saída é dada por:

$$\frac{Io}{Id} = 1 - D \quad (3.12)$$

### 3.3.2 Limite da condução contínua

Por definição neste modo, a corrente em L vai a zero durante no final do intervalo off.

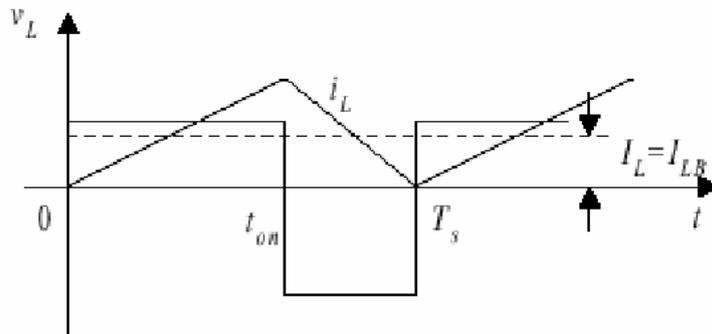


Figura 3-5 Formas de onda do *Step-Up* no limite da condução contínua [43]

O valor médio da corrente na bobine no limite da condução contínua é:

$$ILB = \frac{1}{2} iL, max = \frac{1}{2} \frac{Vd}{L} ton \quad (3.13)$$

$$= \frac{Ts * V0}{2L} D(1 - D), \text{ usando a equação (3.10)} \quad (3.14)$$

A corrente que passa em L, é igual à corrente de entrada, utilizando (3.12) e (3.14), obtemos a corrente média de saída, na situação de limite da condução contínua

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D)^2 \quad (3.15)$$

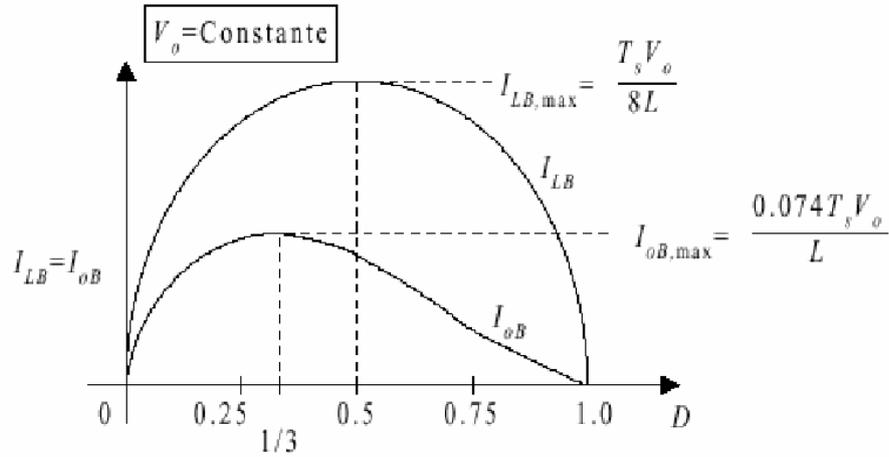


Figura 3-6 Curvas de IoB com Vo constante [43]

A maioria das vezes a tensão de saída do *Step-Up* precisa ser constante. Na Figura 3-6 podemos ver as curvas de IoB com Vo constante, para diversos valores de *duty-cycle*. Mantendo Vo constante e alterando o *duty-cycle*, implica que a tensão de entrada varie. Analisando a Figura 3-6 verifica-se que  $ILB, max$  atinge o máximo quando  $D=0.5$ :

$$ILB, max = \frac{T_s V_o}{8L} \quad (3.16)$$

Os valores máximos de IoB é atingido quando  $D=0,333$  logo:

$$I_{oB} = \frac{2T_s V_o}{27L} = 0,074 \frac{T_s V_o}{L} \quad (3.17)$$

Em termos de valores máximos  $ILB$  e  $I_{oB}$  podem ser expressos como:

$$ILB = 4D(1 - D)ILB, max \quad (3.18)$$

$$I_{oB} = \frac{27}{4} D(1 - D)^2 I_{oB}, max \quad (3.19)$$

Para um determinado valor de *duty-cycle* e Vo constante, se a corrente na carga baixar para além de IoB, o conversor entra no modo de condução descontínua.

### 3.3.3 Modo de condução descontínua

Durante o modo de condução descontínua, a corrente em L é zero durante uma parte do ciclo de trabalho do mosfet. A corrente começa em zero, atinge o seu valor de

pico e retorna a zero ainda durante esse ciclo. Quando a corrente de saída  $I_o$  desce abaixo de um dado valor crítico, a corrente  $I_L$  vai-se anular durante um intervalo de tempo de  $T_s$ . Isto acontece quando a corrente  $I_L$  vai para zero e o ciclo seguinte começa imediatamente a seguir a essa mesma corrente atingir o zero.

No *Step-Up* a corrente  $I_L$  atinge valores menores do que zero, logo acaba por ser zero, devido ao sentido único da corrente no diodo, e mantém-se lá até ao começo do novo ciclo. A Figura 3-7 mostra essa situação.

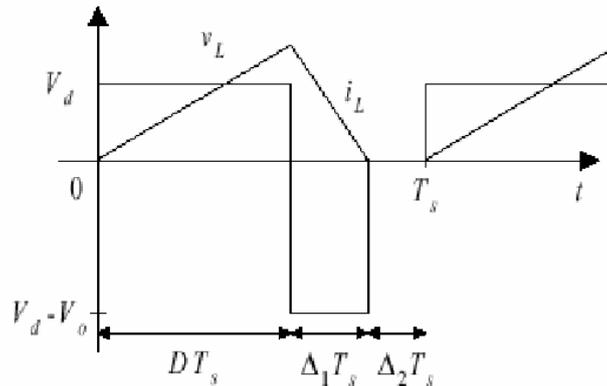


Figura 3-7 Forma de onda na bobina no modo descontínuo [43]

Observando a Figura 3-7:

$$T_{on} = D * T_s \quad (3.20)$$

$$T_{off} = \Delta_1 * T_s \quad (3.21)$$

$$T_s - T_{on} - T_{off} = \Delta_2 * T_s \quad (3.22)$$

A tensão em L fica:

$$V_d * D * T_s + (V_d - V_0) * \Delta_1 * T_s = 0 \quad (3.23)$$

Reorganizando a equação:

$$\frac{V_d}{V_0} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (3.24)$$

e

$$\frac{I_0}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad \text{Se } P_d = P_0 \quad (3.25)$$

O valor médio da corrente de entrada:

$$I_d = \frac{V_d}{2L} * D * T_s (D + \Delta_1) \quad (3.26)$$

O valor médio da corrente de saída utilizando (3.25):

$$I_o = \frac{T_s * V_d}{2L} * D * \Delta 1 \quad (3.27)$$

O duty-cycle em função de Vo e da corrente de carga utilizando as equações (3.24), (3.27) e (3.17):

$$D = \sqrt{\frac{4}{27} \left(\frac{V_o}{V_d}\right) \left(\frac{V_o}{V_d} - 1\right) \frac{I_o}{I_{oB,max}}} \quad (3.28)$$

Em condução descontínua, se Vo não for controlado, em cada período de comutação é transferida para a saída uma potência dada por:

$$\frac{L}{2} iLmax^2 = \frac{(V_d * D * T_s)^2}{2L} \quad (3.29)$$

Se a carga não for capaz de absorver toda esta energia, o nível da tensão à saída Vo vai aumentar até a potência estabilizar. Se a carga diminuir bastante, a subida de Vo poderá levar a uma tensão de saída demasiado elevado, podendo causar a destruição do condensador de saída.

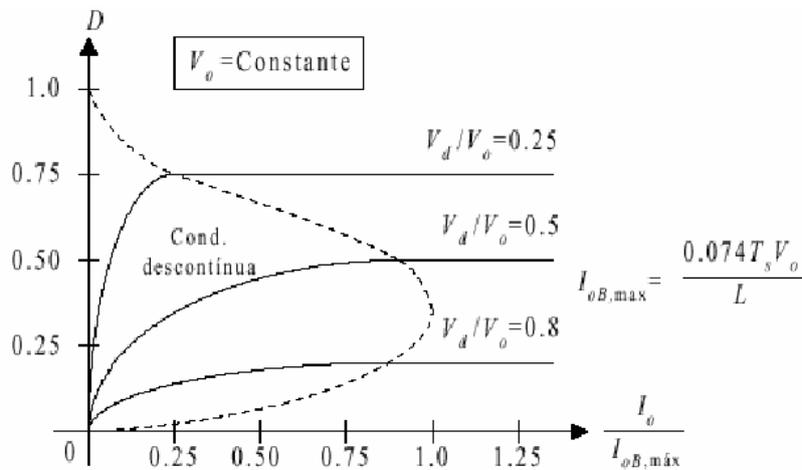


Figura 3-8 Curva característica do Step-Up tendo Vo constante [43]

### 3.3.4 Ripple da tensão de saída

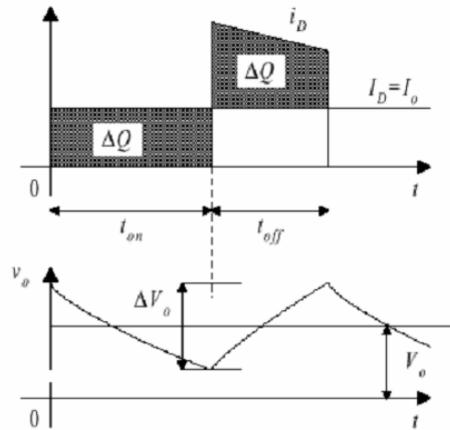


Figura 3-9 Ripple da tensão de saída no *Step-Up* [43]

A ondulação pico a pico  $\Delta V_o$ , Figura 3-9, assumindo a corrente de saída constante, é expressa por:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o \cdot D \cdot T_s}{C} = \frac{V_o \cdot D \cdot T_s}{R \cdot C} \quad (3.30)$$

O valor relativo do *ripple* de saída:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D \cdot T_s}{R \cdot C} \quad (3.31)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D \cdot T_s}{\tau}, \text{ Sendo que } \tau = R \cdot C \quad (3.32)$$

### 3.3.5 Cálculo da indutância crítica

O *Step-Up* pode ser dimensionado para funcionar no modo contínuo, para correntes de carga  $I_o$  acima de um valor, normalmente 5 a 20 % da corrente de carga máxima. O valor mínimo de indutância  $L$ , para se manter no modo contínuo calcula-se, definindo um valor para  $I_o$  crítico com o valor mínimo de  $I_o$ .

$$L_{min} \geq \frac{V_o \cdot T_s}{16 \cdot I_{ocrit}} \quad (3.33)$$

### 3.3.6 Cálculo da capacidade crítica

Para o cálculo do condensador, deve-se considerar a forma de onda da corrente de saída. Admitindo-se a hipótese, que o valor mínimo instantâneo atingido por esta corrente, é maior que a corrente média de saída,  $I_o$ , o condensador carrega-se durante a condução do diodo, fornecendo toda a corrente de saída durante a condução de M.

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad (3.34)$$

$$C_{min} \geq \frac{i_c * t_{off}}{\Delta v} \quad (3.35)$$

### 3.3.7 Controlo do *Step-Up*

Nos conversores DC-DC, é necessário controlar a tensão de saída para, que esta atinja o valor pretendido. Este tipo de conversor utiliza semicondutores de potência, normalmente mosfets, para que através das comutações destes seja possível transformar um nível de tensão contínua noutra nível de tensão. Controlando a duração dos tempos de comutação *on* e *off* (*duty-cycle*), consegue-se controlar o nível da tensão de saída, para um dado valor da tensão à entrada [45]. Um dos métodos mais utilizados para efectuar este tipo de controlo, é chamado Modulação por Largura de Impulso, com a sigla PWM. Neste método temos uma frequência de comutação fixa, onde o tempo de um período é  $T_s$ . Ajustando-se o tempo de duração de *on* e *off*, consegue-se controlar a tensão de saída. Na Figura 3-10 é ilustrado o circuito típico deste controlo a azul.

O controlo por PWM retira uma amostra da tensão de saída, e subtrai esta a uma tensão de referência ( $V_{ref}$ ).  $V_{ref}$  é o valor de tensão que se pretende ter à saída, sendo que da subtracção resulta um sinal de erro ( $V_{erro}$ ).  $V_{erro}$  é então comparado com um sinal de dente de serra ( $V_{serra}$ ), tendo este um valor máximo conhecido e frequência constante. Esta frequência toma valores na ordem das dezenas até às centenas de kHz, gerando o PWM que irá controlar as comutações do mosfet. Quando  $V_{erro}$  é maior do que o valor da onda dente de serra ( $V_{serra}$ ), o sinal de PWM é alto, ou seja, encontra-se no estado *on*, ou pelo contrário  $V_{erro}$  é menor que  $V_{serra}$ , o sinal encontra-se no estado *off*. Esta constante alteração dos tempos *on* e *off*, ou seja, alteração do *duty-cycle* faz com que a exista uma diminuição do sinal  $V_{erro}$ , completando assim o controlo do conversor [43].

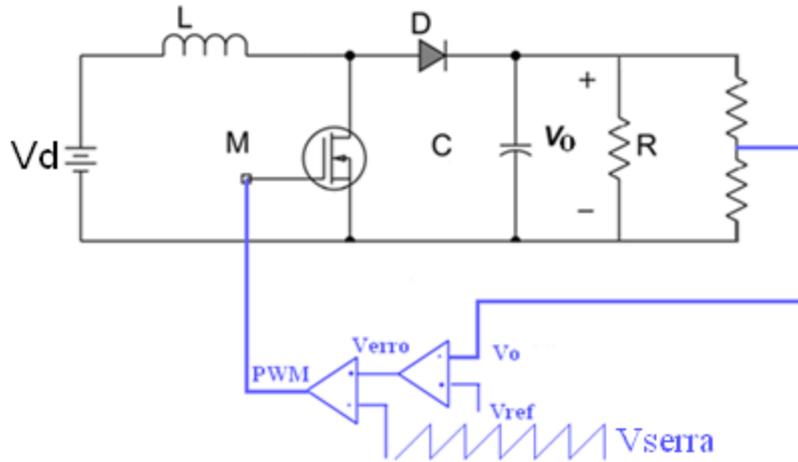


Figura 3-10 Circuito típico de controlo por PWM [44]

### 3.4 Transformador

O transformador é uma máquina de corrente alternada, que transforma uma tensão alternada numa outra também alternada, de valor eficaz normalmente diferente e com a mesma frequência. Quando eleva o nível de tensão, tem o nome de transformador elevador, quando pelo contrário baixa tem o nome de transformador redutor. O interesse prático do transformador reside precisamente nesta elevada capacidade e flexibilidade, em permitir modificar o nível de tensão rapidamente para o valor que desejamos, com um rendimento elevado, isto é, com perdas energéticas mínimas. Os grandes transformadores, ou transformadores de elevada potência, chegam a atingir rendimentos superiores a 99%, faceta que não é atingido por nenhuma outra máquina eléctrica.

Os transformadores são bastante utilizados, no transporte de energia, em linhas de Alta Tensão, onde funcionam como elevadores de tensão; na distribuição de energia para os aglomerados populacionais, em redes de Média Tensão e Baixa Tensão, onde funcionam como redutores de tensão; na alimentação de toda uma diversidade de equipamentos e receptores eléctricos/electrónicos, funcionando como redutores de tensão [46].

O transformador foi utilizado para elevar a tensão à saída do inversor monofásico de tensão, de forma a adequar-se os níveis de tensão necessários para efectuar a ligação às cargas eléctricas que é necessário alimentar. A tensão que se obteve à saída do inversor foi uma tensão alternada sinusoidal de 36 volts de valor

eficaz e com frequência de 48,8Hz. Como o pretendido eram 230 volts, utilizou-se o transformador para elevar-se a tensão para os níveis desejados.

### 3.5 Inversor monofásico

A tensão de saída dos painéis fotovoltaicos é uma tensão contínua. No entanto a tensão da rede é uma tensão alternada com uma frequência de 50Hz. Para adaptar as duas tensões, é necessário aplicar no sistema um dispositivo que converta as características da tensão, esse dispositivo é o inversor de tensão. Este tipo de dispositivo é largamente utilizado na indústria, serviços, habitações, nas mais variadas situações, que vão desde circuitos de *drive* para motores de corrente alternada, fontes de tensão reguladas, UPS, etc. Existem vários tipos de topologia de inversores DC/AC, estes podem ser monofásicos ou trifásicos, e consoante o tipo de alimentação podem ser ainda VSI (*Voltage Source Inverter*) ou CSI (*Current Source Inverter*). A topologia utilizada foi a VSI, onde o principal objectivo destes inversores é produzir uma tensão de saída alternada com uma dada frequência, ambas controladas [47].

Os inversores VSI estão divididos em 3 categorias distintas:

**Inversores de PWM:** neste tipo inversor, a tensão de entrada é contínua e constante em magnitude. O inversor controla a magnitude da tensão de saída assim como a frequência, a forma de onda da tensão de saída desejada é o mais aproximado a uma onda sinusoidal.

**Inversores de onda quadrada:** neste tipo de inversor a tensão de entrada é controlada, com o objectivo de controlar a magnitude da tensão de saída, assim sendo o inversor apenas tem de controlar a frequência da tensão de saída.

**Inversores monofásicos com tensão de cancelamento:** Este tipo de inversor apenas permite topologias monofásicas e não trifásicas. Este tipo de inversor combina as características dos dois inversores referidos anteriormente.

O tipo de inversor utilizado nesta dissertação, foi um inversor monofásico de PWM em ponte completa, como tal irá ser feita uma análise, mais detalhada a este tipo de inversor.

### 3.5.1 Inversores de ponte completa

O estudo que efectuado a este tipo de inversor, assim como as técnicas de controlo, são baseados no livro Power Electronics: Converters, Applications, and Design [43]. A topologia do inversor de tensão escolhida recaiu sobreo inversor monofásico de ponte completa, Figura 3-12. Este inversor tem a particularidade, de ser constituído por 2 inversores monofásicos de meia ponte, Figura 3-11. Escolheu-se o inversor de ponte completa, porque o inversor de meia ponte é utilizado em aplicações de baixa potência, enquanto o de ponte completa é utilizado em aplicações de maior potência.

Este inversor é constituído por dois inversores de meia ponte. Quando se aplica o mesmo valor de tensão contínua, à entrada do inversor de meia ponte e do em ponte completa, obtém-se à saída uma tensão máxima, no inversor de ponte completa, que é dobro da tensão que se obteria no inversor de meia ponte. Sendo assim, para o mesmo nível de potência, a corrente de saída e as correntes nos semicondutores de potência, são metade do valor no inversor em ponte completa, isto é particularmente útil em níveis de potência elevados.

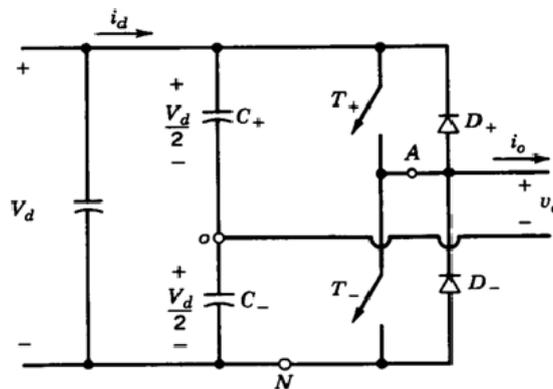


Figura 3-11 Inversor monofásico em meia ponte [43]

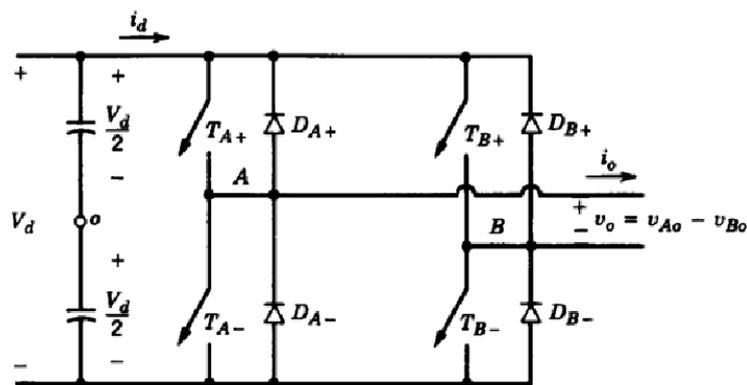


Figura 3-12 Inversor monofásico em ponte completa [43]

### 3.5.2 Comando por modulação de largura de impulso

Para controlar a comutação dos mosfets, que constituem o inversor, foi escolhido o método da modulação de largura de impulso. Este método fornece um sinal alternado de baixa frequência, através da modulação em alta frequência. Permite obter uma onda alternada com conteúdo harmónico conhecido à saída do inversor.

Os sinais de controlo dos mosfets são obtidos através da comparação de um sinal de controlo sinusoidal ( $V_{control}$ ) com uma onda triangular ( $V_{tri}$ ).  $V_{control}$  é sinal com uma frequência  $f_l$ , também chamada de frequência da onda moduladora.  $V_{tri}$  é uma onda triangular, que deve ter uma frequência mínima 20 vezes superior à máxima frequência da onda  $f_l$ , esta onda é também chamada de portadora. A frequência desta onda ( $V_{tri}$ ) vai estabelecer a frequência de comutação  $f_s$ , do inversor.

A tensão à saída do inversor é formada por uma sucessão de ondas rectangulares de amplitude igual à tensão de alimentação e de duração variável. Após efectuar-se a filtragem destas ondas obtém-se, uma sinusóide. Esta não será perfeita, uma vez que contém componentes harmónicos à frequência  $f_l$ .

Define-se como amplitude de modelação a grandeza dada por:

$$ma = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (3.36)$$

A partir da intersecção da onda triangular, com a onda de controlo sinusoidal, vão surgir impulsos com uma duração variável, que terão uma sinusóide como componente fundamental, como se pode observar na Figura 3-13.

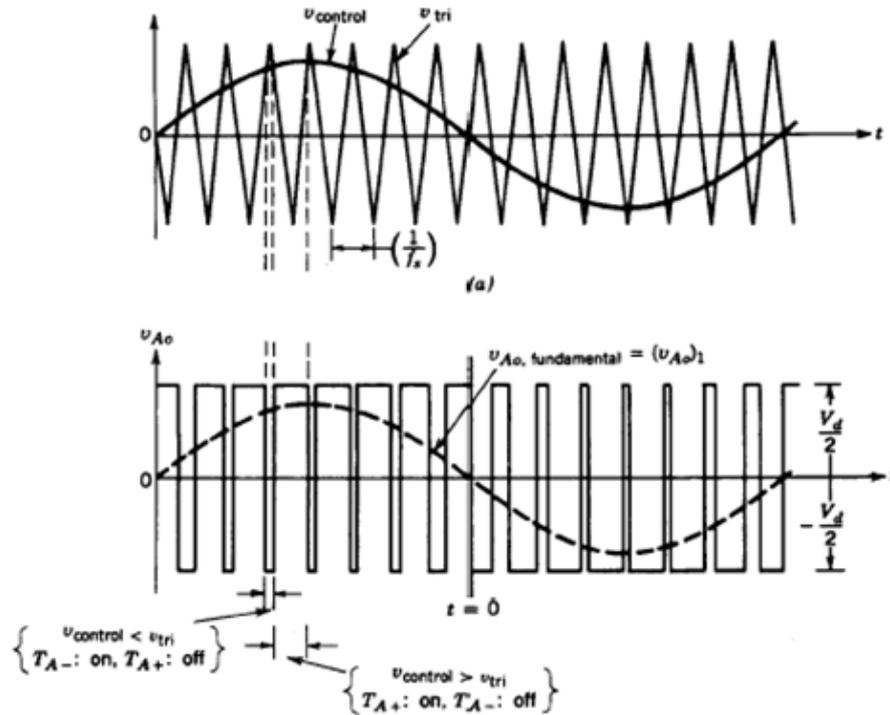


Figura 3-13 Modulação de largura de impulso modo bipolar [43]

A modulação de frequência é dada por:

$$mf = \frac{f_s}{f_1} \quad (3.37)$$

Existem dois tipos de comando por modulação de largura de impulso, que são o unipolar e o bipolar que vão ser discutidos mais à frente.

### 3.5.3 Comando por PWM Bipolar

No PWM bipolar, quando ocorre uma comutação, a tensão de saída varia entre  $+vd$  e  $-vd$ , como se observa na Figura 3-14 Neste tipo de PWM a forma de onda da saída, é idêntica à saída do inversor em meia ponte, ou seja, a forma de onda resulta da comparação entre  $v_{control}$  e  $v_{tri}$ . A saída do braço B, é o inverso da saída do braço A, quando  $T_{A+}$  e  $T_{B-}$  estão ligados,  $VA0 = +\frac{1}{2}vd$  e  $VB0 = -\frac{1}{2}vd$ .

Fica então:

$$VB0(t) = -VA0(t) \quad (3.38)$$

Logo:

$$V_0(t) = V_{A0}(t) - V_{B0}(t) = 2V_{A0}(t) \quad (3.39)$$

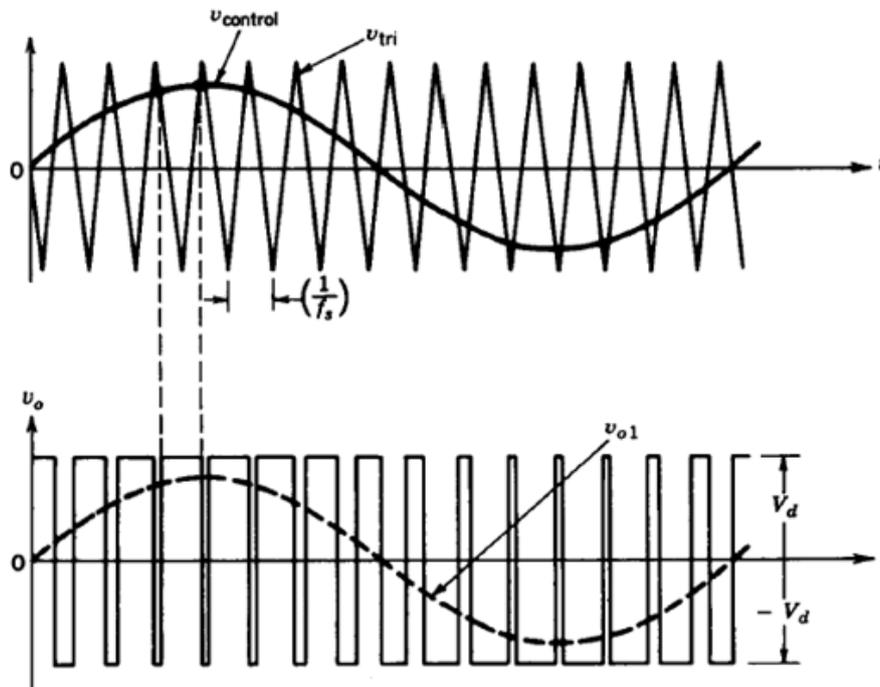


Figura 3-14 Modulação de largura de impulso modo bipolar [43]

### 3.5.4 Comando por PWM Unipolar

No PWM unipolar, quando ocorre uma comutação, a tensão de saída, varia entre, 0 e +  $V_d$  ou entre 0 e -  $V_d$  como se observa Figura 3-16. As comutações, nos braços do inversor em ponte completa, não são feitas em simultâneo, neste os braços são controlados de forma independente, comparando  $v_{tri}$  com  $v_{control}$  e com  $-v_{control}$  como se pode observar na Figura 3-15.

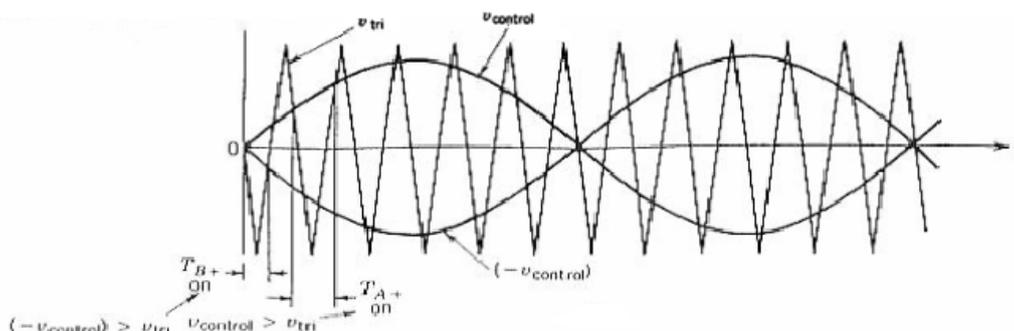


Figura 3-15 Modelação de largura de impulso modo unipolar [43]

Assim vão resultar os seguintes sinais de controlo do braço A:

$$vcontrol > Vtri TA + ligado e VAN = Vd$$

$$vcontrol < Vtri TA - ligado e VAN = 0$$

Da mesma forma os sinais de controlo do braço B vão ser:

$$(-vcontrol) > Vtri TB + ligado e VBN = Vd$$

$$(-vcontrol) < Vtri TB - ligado e VBN = 0$$

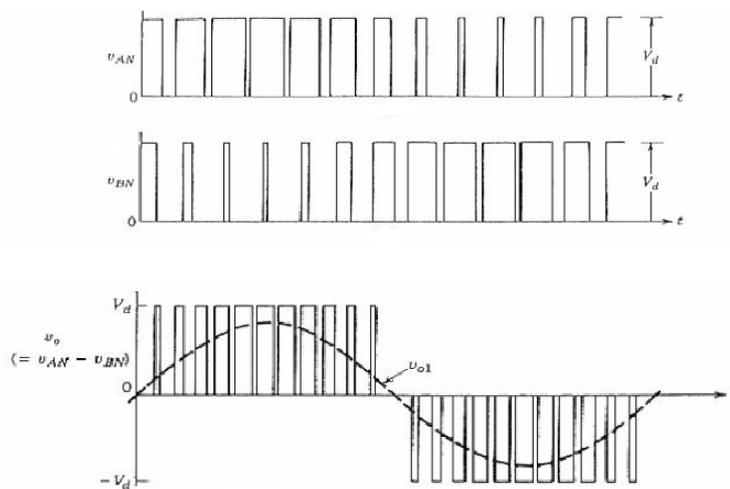


Figura 3-16 Modulação de largura de impulso modo unipolar [43]

As formas de onda da figura anterior, mostram que existem quatro combinações, possíveis de comutação dos mosfets e três níveis possíveis de tensão:

$$TA + e TB - \text{estão ligados: } VAN = Vd, VBN = 0; VO = Vd$$

$$TA - e TB + \text{estão ligados: } VAN = 0, VBN = Vd; VO = -Vd$$

$$TA + e TB + \text{estão ligados: } VAN = Vd, VBN = Vd; VO = 0$$

$$TA - e TB - \text{estão ligados: } VAN = 0, VBN = 0; VO = 0$$

Quando os dois mosfets da parte superior ou inferior são ligados simultaneamente, a tensão à saída é zero.

### 3.5.5 Filtro LC

Como foi visto antes, a forma de onda à saída do inversor monofásico de tensão, é formada por uma sucessão de ondas rectangulares, de amplitude igual à tensão de alimentação. Para se obter uma onda sinusoidal, é necessário aplicar um filtro à saída do inversor, para assim filtrar as componentes harmónicas, provenientes das comutações do inversor, a partir sensivelmente de uma década abaixo, da frequência de comutação.

Sendo que a frequência de comutação do inversor monofásico foi de 10kHz a frequência de corte do filtro é:

$$\omega_0 = 2\pi \times \frac{\text{freq.comutação}}{10} \quad (3.40)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \quad (3.41)$$

No Anexo D tem-se o filtro LC que foi implementado durante esta dissertação.

## Capítulo 4

### Simulações

#### 4.1 Introdução

Este capítulo é dedicado a simulações computacionais do sistema em estudo. Actualmente é prática comum utilizar-se ferramentas de simulação, quando se pretende estudar o comportamento de um determinado circuito. Uma das grandes vantagens no uso de ferramentas de simulação, prende-se com o facto de possibilitar o estudo do comportamento de um circuito, assim como prever resultados sem ser necessário implementar um protótipo. Reduz-se assim desta forma o custo, o risco, o tempo de projecto, assim como permite melhorar e aperfeiçoar o mesmo. Outra vantagem prende-se com o facto de possibilitar o estudo do comportamento de um circuito em condições extremas de funcionamento, ou seja, para além dos limites estabelecidos pelo projecto.

Permite também fornecer, uma percepção global do funcionamento e comportamento do sistema real, ou seja, através da análise do sistema simulado, vamos compreender de uma forma mais clara o funcionamento do sistema real. A ferramenta de simulações utilizada foi o *MatLab/Simulink*, mais especificamente a *toolbox* *SimPowerSystem*.

#### 4.2 SimPowerSystems

O *SimPowerSystems* é uma *toolbox*, Figura 4-1, dedicada exclusivamente, à simulação de sistemas de energia/electrónica de potência. Através dela é possível, simular sistemas de corrente contínua e sistemas de corrente alternada. É uma ferramenta de simulação gráfica, ou seja, através da junção de blocos, é possível criar o circuito pretendido, sendo desta forma, bastante fácil e intuitiva a utilização desta. A biblioteca do *SimPowerSystems*, parte de electrónica de potência, apresenta-se bastante completa, estando disponíveis, vários blocos frequentemente utilizados, como é o caso de díodos, IGBTs, mosfets, entre outros. Relativamente à parte de electrónica mais comum, existem entre outros, os blocos de condensadores, bobines, cargas de vários tipos (R, RL, RLC) e fontes de alimentação.

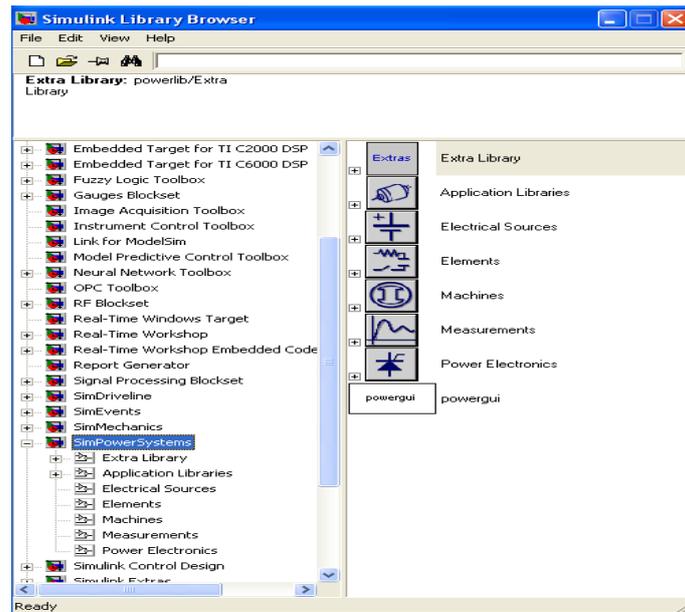


Figura 4-1 Ambiente Simulink/SimPowerSystems

### 4.3 Simulação do Conversor de Tensão (*Step-Up*)

Na Figura 4-2 está representado o modelo do conversor *Step-Up* em Simulink. O conversor foi simulado de forma a permanecer no modo de condução contínua, ou seja, a corrente na bobina nunca é zero.

O modelo é constituído por componentes ideais; uma fonte de tensão contínua, uma bobine, um semicondutor de potência, um diodo, um condensador e uma carga. A fonte à entrada do conversor simula, a tensão do painel fotovoltaico, esta fonte tem uma tensão de 20V contínuos.

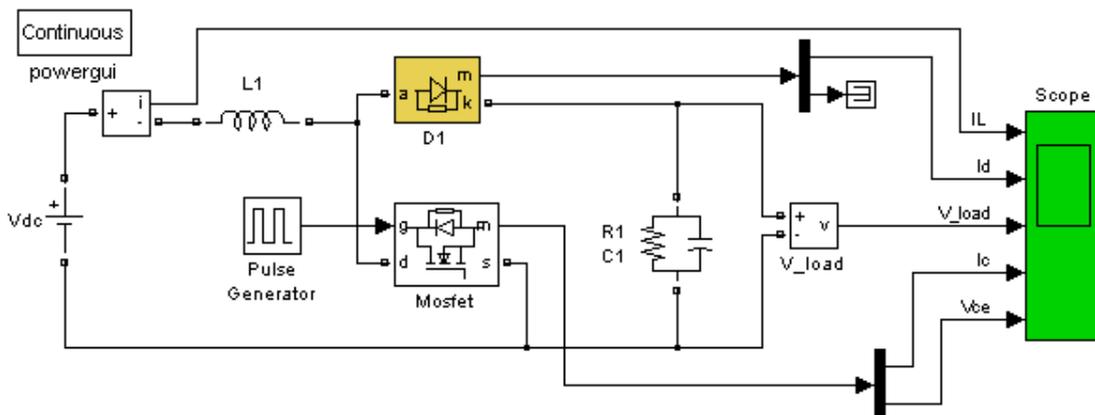


Figura 4-2 Modelo simulado em Simulink

O bloco do PWM está configurado, para gerar uma frequência de 40kHz, com um *duty-cycle* de 47%. A bobina tem um valor de  $126\mu\text{H}$ , o diodo apresenta uma queda de tensão de  $0,7\text{V}$  e filtro de saída é constituído por um circuito paralelo RC, onde a resistência toma o valor de  $20\Omega$  e o condensador é de  $150\mu\text{F}$ .

Utilizou-se o bloco *Scope*, que permite visualizar vários sinais em simultâneo. Desta forma, foram efectuadas leituras nas principais formas de onda, deste conversor. Como se pode observar nas Figuras 4-3 a 4-5.

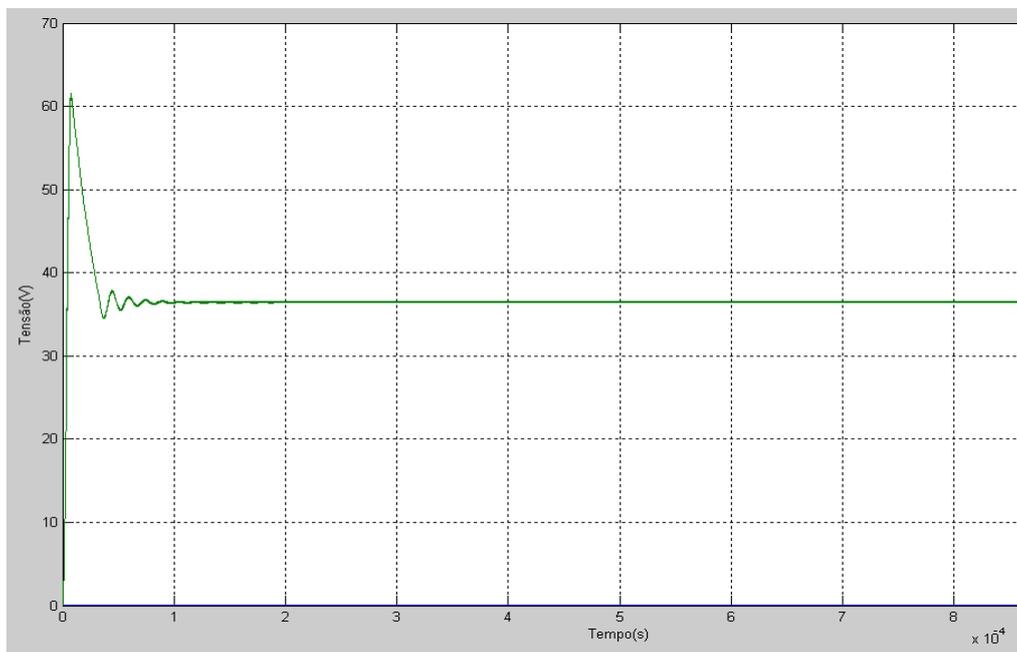


Figura 4-3 Forma de onda da tensão de saída ( $V_o=36\text{V}$ )

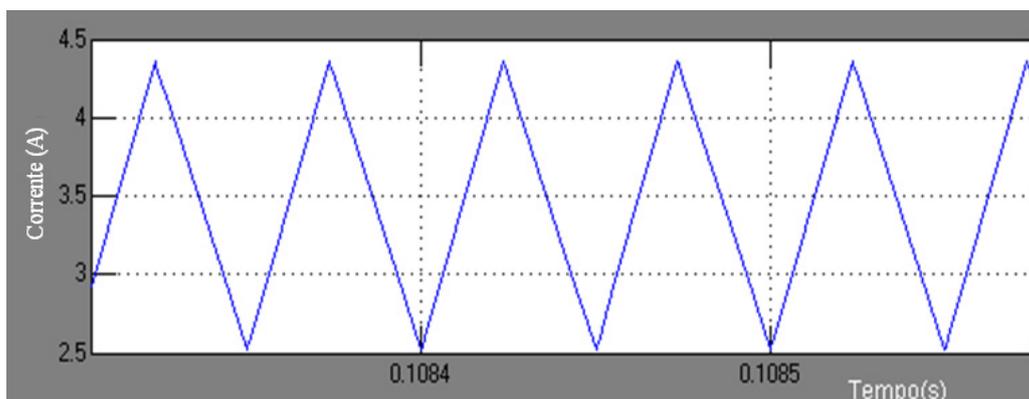


Figura 4-4 Forma de onda da corrente

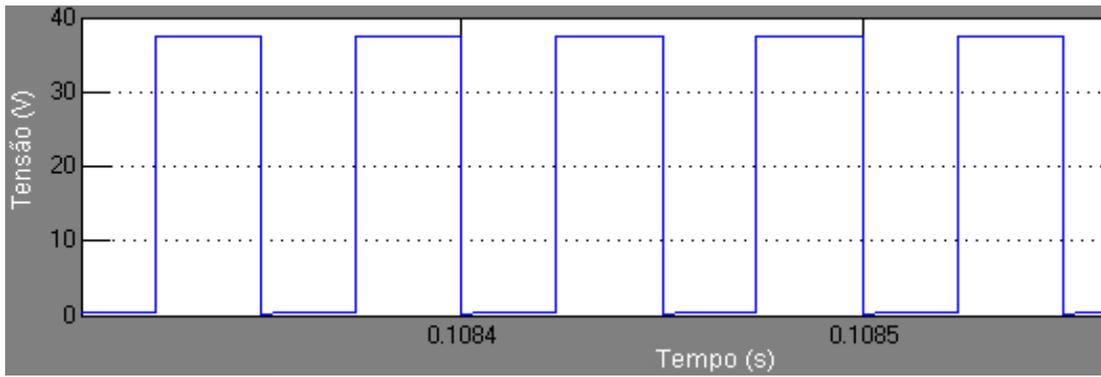


Figura 4-5 Forma de onda da tensão no mosfet

Nas figuras anteriores, estão representadas as principais formas de onda, que permitem compreender o funcionamento do conversor *Step-Up*. Na Figura 4-3 pode ver-se a forma de onda da tensão de saída, verificando-se que nos primeiros instantes, ocorre um pico de tensão, que ultrapassa os 60V, mas passado este curto intervalo de tempo a tensão vai estabilizar em torno dos 36V, e assim continua ao longo do tempo.

Na Figura 4-4 observa-se a forma de onda da corrente, que atravessa a bobina. Como se pode verificar, apresenta as características do modo de condução contínua, ou seja, a corrente nunca é zero, e apresenta valor médio igual a próximo de 1,8A. A Figura 4-5 representa a forma de onda da tensão no mosfet, esta tensão apresenta uma frequência de 40kHz.

## 4.4 Simulação do Inversor Monofásico

Na Figura 4-6 está representado o modelo do inversor monofásico simulado. O modelo é formado pelo inversor e pelo sistema de controlo deste. O sistema de controlo baseia o seu funcionamento no PWM bipolar, como mostra a Figura 4-9. O sistema de controlo do inversor funciona da seguinte forma: o bloco *Sine Wave* é onde se cria a sinusóide à frequência de 50 Hz, sendo que esta vai servir de onda de referência. No bloco *Repeating Sequence* é criada a onda triangular, com uma frequência de 10kHz. Em seguida, estes dois sinais vão ser comparados no bloco *Relational Operator*. Vai ser comparado quando é que o valor da onda sinusoidal é menor do que o valor da onda triangular, como mostra a Figura 4-8. A partir desta comparação, vão surgir impulsos com uma duração variável, Figura 4-9. Estes impulsos vão ser os responsáveis pela comutação dos mosfets do inversor. À saída do inversor vão surgir impulsos resultantes das comutações, com uma amplitude igual à da fonte de tensão contínua. Estes impulsos depois de filtrados, pelo filtro de saída, vão assemelhar-se a uma onda sinusoidal, devido à sua componente fundamental ser uma sinusóide, como se pode observar na Figura 4-7, a azul tem-se a forma de onda da tensão e a verde a forma de onda da corrente, sendo que se simulou o comportamento do inversor com uma carga resistiva.

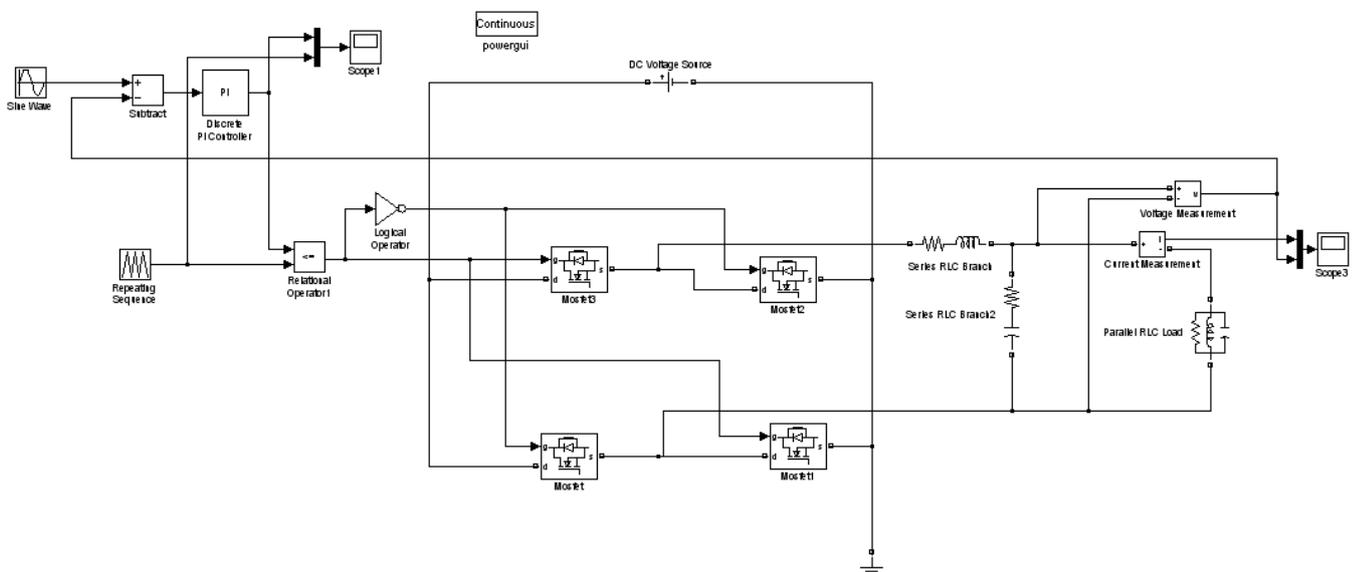


Figura 4-6 Modelo do inversor monofásico simulado

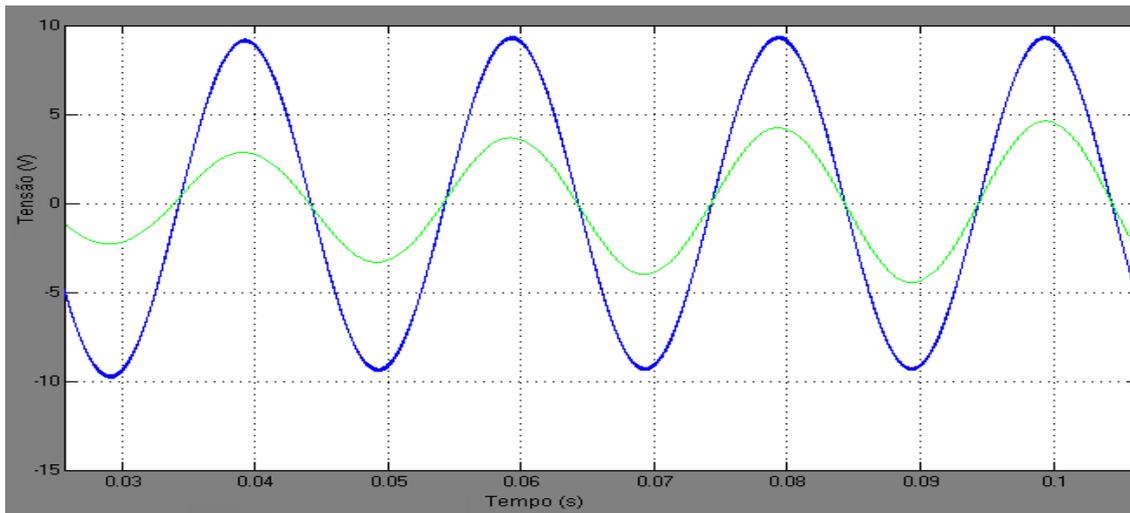


Figura 4-7 Formas de onda da tensão e corrente à saída

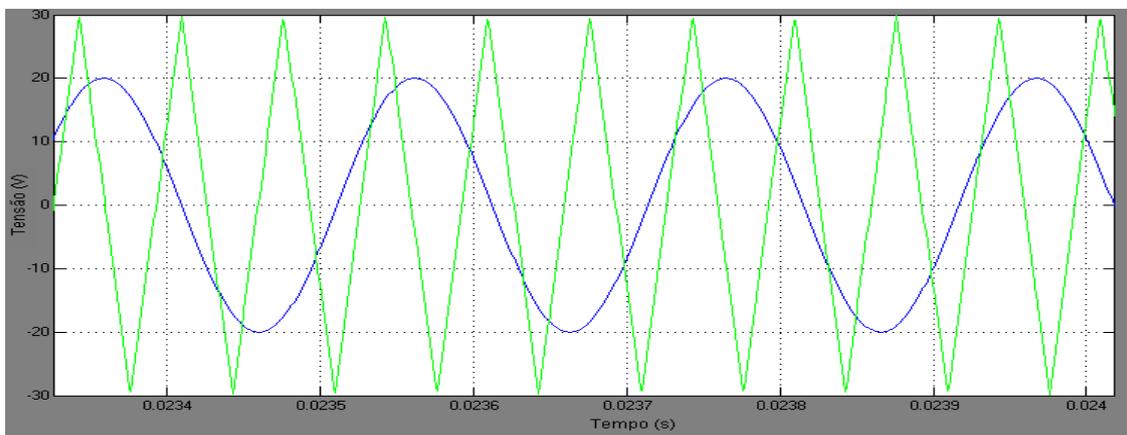


Figura 4-8 Formas de onda (moduladora e portadora)

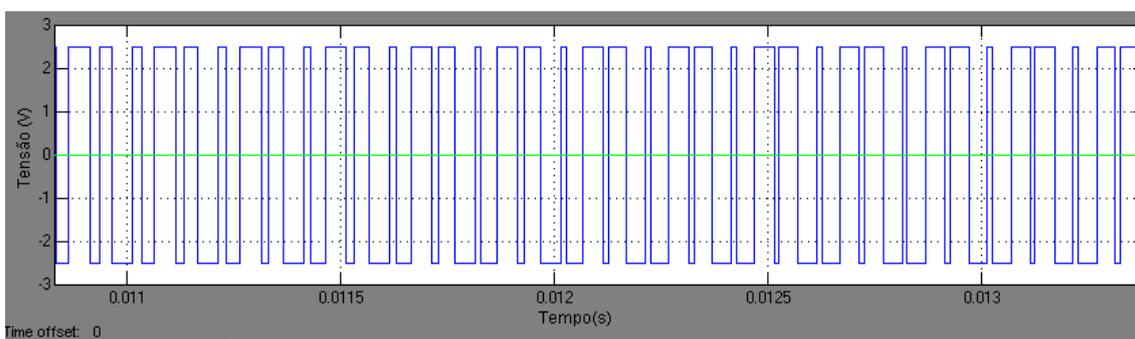


Figura 4-9 Forma de onda da tensão sem filtro

## Capítulo 5

### Implementação

#### 5.1 Introdução

Neste capítulo, vão ser apresentados os circuitos que constituem este trabalho. Também é feito neste capítulo, uma descrição do microcontrolador utilizado, assim como, o ambiente de programação e compilador utilizados. Neste capítulo da implementação, vão ser explicados os motivos que levaram à adopção e aplicação dos métodos de controlo e utilização das diferentes topologias, utilizadas nos circuitos.

#### 5.2 Microcontrolador

O controlo do conversor *Step-Up*, como do inversor monofásico é efectuado através de um microcontrolador da família PIC, mais especificamente o PIC18F4431. A escolha deste microcontrolador, recaiu no facto de este em particular, ser dotado de um módulo ADC, capaz de recolher 200 mil amostras por segundo e portos PWM extremamente rápidos, quando comparados com outros existentes no mercado. Na Figura 5-1 vê-se o diagrama dos pinos do PIC18F4431, onde é fácil localizar os portos do ADC e PWM.

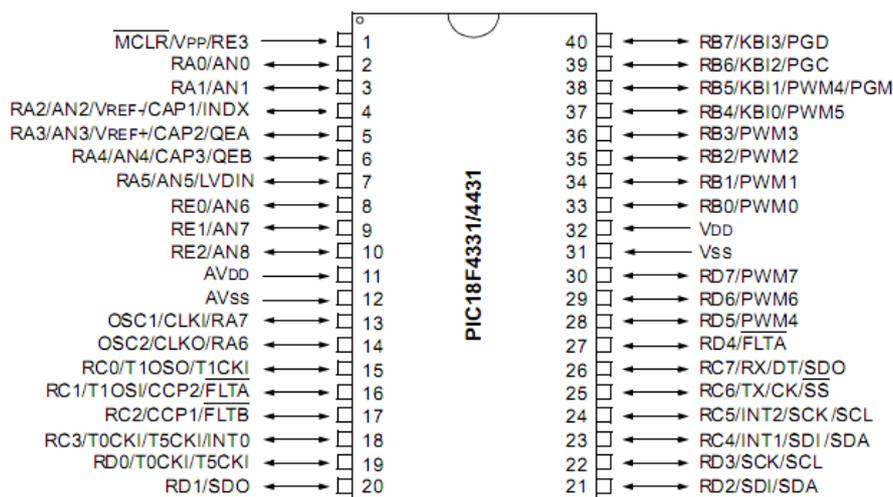


Figura 5-1 Diagrama dos pinos PIC18F4431 [48]

Estes microcontroladores são distribuídos de forma gratuita aos estudantes e investigadores. Como o controlo do *Step-Up* e inversor monofásico, baseiam-se

essencialmente em, realizar leituras analógicas e gerar PWM, esta foi a escolha mais correcta, visto que o PIC18F4431 é um microcontrolador bastante versátil.

A programação do PIC foi efectuada em linguagem C, devido a esta ser uma linguagem de alto nível, e bastante aplicada no meio académico. O ambiente de programação utilizado foi o MPLAB IDE V8.0, e o compilador de C foi o C18 Student Edition. Ambas as ferramentas são distribuídas, de forma gratuita pela empresa Microchip.

Para enviar o código do compilador para o micro, é necessário um dispositivo, que permita escrever este na memória do microcontrolador, possibilitando assim, que este funcione autonomamente. O microcontrolador no seu funcionamento, não utiliza as instruções tal como foram escritas no programa em C, mas sim o respectivo *opcode*. Na Figura 5-2 vê-se o diagrama de bloco que descreve as várias etapas da programação de um microcontrolador.

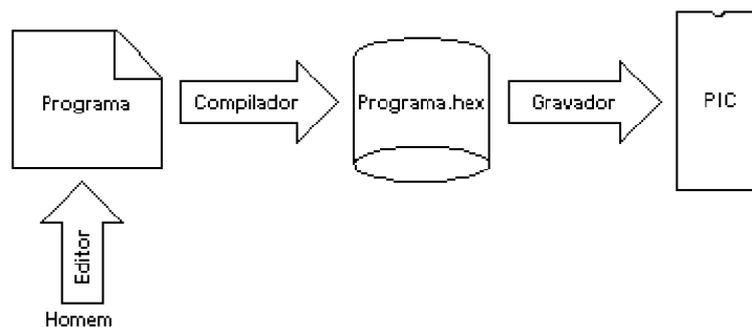


Figura 5-2 Etapas de programação [49]

Existem no mercado, vários gravadores para os PIC, o escolhido foi o PICkit2 da Microchip, este é de baixo custo e de fácil utilização, permitindo a gravação dos microcontroladores, sem os retirar do circuito (*ICSP - In-Circuit Serial Programmer*). O PicKit2 funciona integrado no ambiente de desenvolvimento MPLAB, e é ligado ao PC através da porta USB, na figura 5-3 tem-se o aspecto físico do programador utilizado [48].



Figura 5-3 PICkit 2

### 5.3 Semicondutor de potência

O mosfet é um dos componentes fundamentais, devido a ter sido utilizado em vários dos circuitos que foram utilizados nesta dissertação. A escolha do mosfet, em relação aos outros semicondutores de potência, disponíveis no mercado recaiu sobre os limites de tensão e de corrente deste. Os mosfets possuem uma faixa de valores de potência que se adaptam perfeitamente ao trabalho desenvolvido, quando comparados com os transístores bipolares e o IGBTs. A escolha dos mosfets deveu-se ao facto de os fabricantes de semicondutores, os disponibilizarem de forma gratuita a estudantes e investigadores, enquanto cobram pelos IGBTs e transístores bipolares

Outro factor a ter em atenção, aquando da escolha de semicondutores de potência, prende-se com as perdas no componente devido às comutações. O mosfet apresenta uma melhor performance, para frequências superiores a 40kHz, sendo que para frequências inferiores a estas, tanto o IGBT como o transístor bipolar obtêm um comportamento satisfatório, como se tem na Figura 5-4 [50].

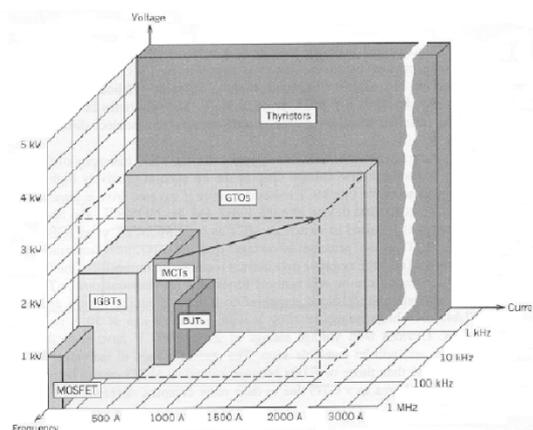


Figura 5-4 Comparação diversos semicondutores de potência [43]

O mosfet escolhido, foi o NTY100N10 (100V/123A) do fabricante On Semiconductor, este é um mosfet de potência de canal n. A vantagem em utilizar um mosfet de canal n, reside no facto de este apresentar um baixo valor de RDS (ON), quando comparado com o de canal p. Este mosfet está indicado para aplicações de controlo de motores por PWM, para ser utilizado em conversores de tensão e fontes de alimentação. Na Figura 5-5 está representado o esquema eléctrico do NTY100N10.

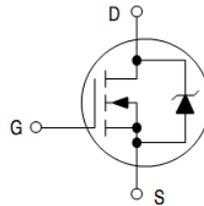


Figura 5-5 Esquema eléctrico NTY100N10 [51]

## 5.4 Placa electrónica de interface do conversor *Step-Up*

Foi desenvolvida uma placa electrónica, em ambiente UtilBoard, que permitiu adquirir os dados relativos ao conversor de tensão, nomeadamente tensão de saída, e efectuar o controlo do mesmo, controlando o *duty-cycle* do conversor.

A placa desenvolvida foi elaborada para ser robusta e simples. Uma das principais preocupações foi a de isolar o microcontrolador de ruídos externos, provenientes das comutações do mosfet do conversor. Para esse efeito foi adicionado um acoplador óptico, que efectua o isolamento do sinal, que sai do microcontrolador e que entra na *gate* do mosfet. Foi também, colocado um condensador na entrada de alimentação do microcontrolador, para filtrar a tensão de entrada, uma vez que este é bastante sensível, a variações de tensão de entrada. A tensão máxima que o porto do ADC admite é 5,5V, por isso foi necessário dimensionar um divisor de tensão, uma vez que a tensão á saída do conversor, ronda os 36V. O diagrama de blocos do circuito final desenvolvido encontra-se na Figura 5-6, enquanto no Anexo C encontra-se o esquema eléctrico da placa desenvolvida e no Anexo G encontra-se o circuito implementado.

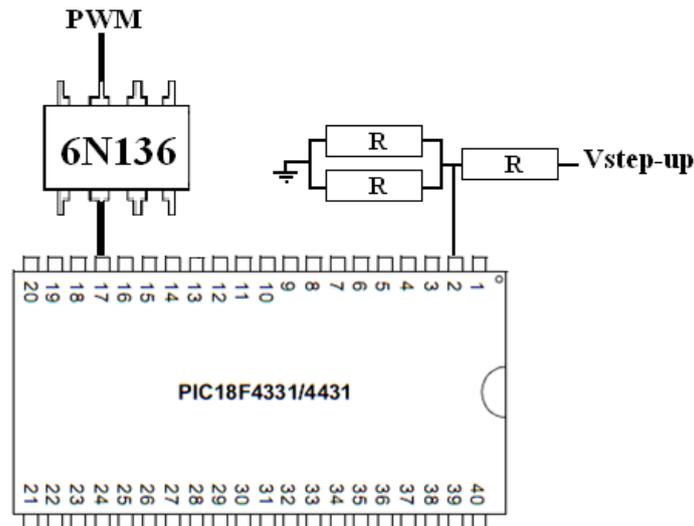


Figura 5-6 Diagrama de blocos da placa de controlo do conversor de tensão

### Acoplador Óptico

Acopladores ópticos são componentes electrónicos, que permitem a transferência de um sinal de controlo, de um circuito para outro, sem a necessidade de acoplamento eléctrico. Este sinal é transferido por um feixe de luz, gerado por um led emissor, e é recebido por um transistor fotodetector. Como não existe contacto físico entre o emissor e o receptor, existe um isolamento entre os dois componentes.

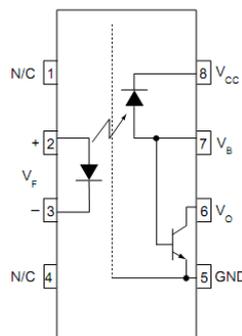


Figura 5-7 Esquema do acoplador óptico 6N136 [52]

O acoplador óptico foi utilizado, para fazer o isolamento entre o microcontrolador e o conversor *Step-Up*, encontra-se representado na Figura 5-7. O conversor funciona através de impulsos de alta frequência, que são aplicados ao mosfet. Estes impulsos de controlo do conversor, por sua vez têm de passar através do acoplador óptico, sendo que, uma das mais importantes características, quando se escolhe um acoplador óptico, é o seu tempo de reacção. Este é o tempo de subida e o tempo de descida que o acoplador apresenta quando é atravessado por um sinal. Caso estes tempos sejam

demasiado lentos, o sinal que se pretende isolar vai perder informação, que pode causar o mau funcionamento de todo o sistema.

## 5.5 Controlo do conversor de tensão *Step-Up*

Como já foi referido, a principal técnica de controlo do conversor *Step-Up* é a técnica por modelação por largura de impulso, como tal esta foi adoptada para efectuar o controlo do *Step-Up* implementado. Ao invés de implementar-se o circuito físico de controlo que foi anteriormente apresentado na Figura 3-10, optou-se por efectuar este controlo através da programação de um microcontrolador. Foi desenvolvido um algoritmo que permitisse estabelecer o comportamento do controlo.

O algoritmo desenvolvido está representado na Figura 5-8. Foram adicionados a este excertos do código efectuado, dando assim uma perspectiva mais abrangente ao algoritmo. A versão final do código implementado encontra-se nos anexos, como o nome de *step.c*. Este algoritmo é bastante simples, primeiramente foram definidos os parâmetros iniciais, que vão reger o controlo do *Step-Up*, ou seja, foi definida uma tensão de referência. Esta tensão é um valor numérico, que vai ser subtraído ao valor da tensão que é lido pelo ADC à saída do conversor, e a partir dessa subtracção vai ser estabelecido um valor de erro. Consoante este valor seja maior ou menor que zero, o *duty-cycle* do conversor é alterado, efectuando-se assim o controlo da tensão de saída.

São configurados os registos do módulo do ADC e PWM. No módulo do ADC é configurado o pino de leitura e o tipo de leitura a ser efectuada. No módulo do PWM é definida a frequência de comutação do mosfet, é definido o valor inicial do *duty-cycle* e é definida a porta de saída do PWM. Depois de definidos estes parâmetros, são chamadas as funções do ADC e do PWM, é efectuada a leitura e conversão da tensão de saída lida pelo ADC e é ainda calculado o valor de erro.

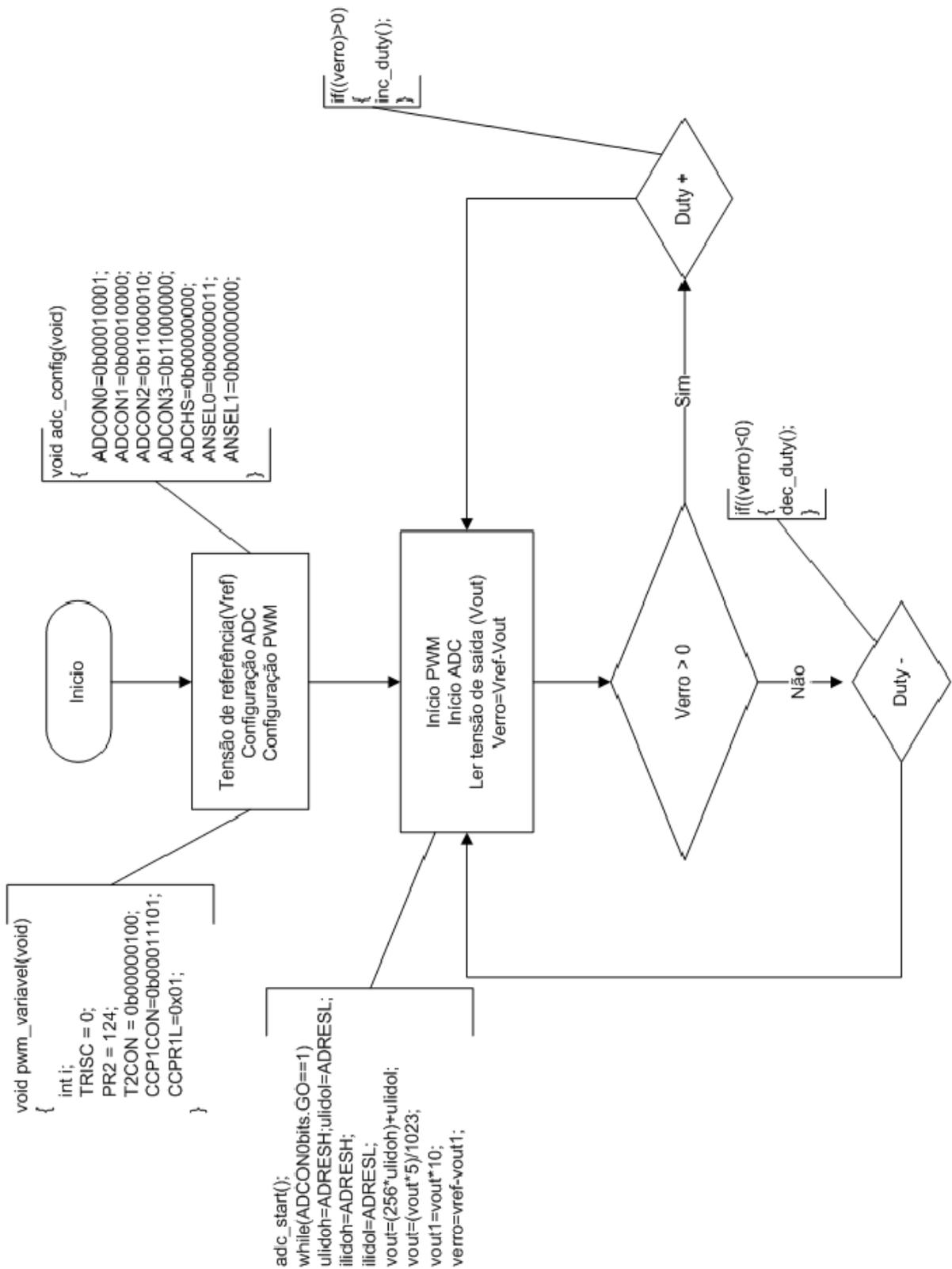


Figura 5-8 Algoritmo de controlo do conversor Step-Up

## 5.6 Placa de controlo do Inversor Monofásico

Na placa de controlo do inversor monofásico os principais componentes utilizados, foram o microcontrolador 18F4431, circuito acoplador óptico 6N136 e o circuito de drive NCP511. Esta placa foi desenvolvida, para controlar o inversor monofásico em ponte completa, sendo por isso, necessário acondicionar os os vários sinais de controlo. Na Figura 5-9 tem-se o diagrama de blocos da placa de controlo, na qual tem-se dois acopladores ópticos que efectuam o isolamento de ruídos e dois circuitos de drive que efectuam a correcta activação dos mosfets. No Anexo D encontra-se a placa electrónica desenvolvida e no Anexo H tem-se a placa de controlo implementada.

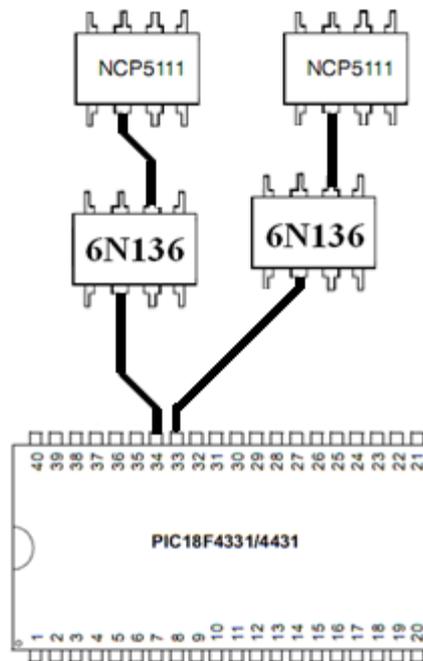


Figura 5-9 Diagrama de blocos da placa de controlo inversor monofásico

### Circuito de drive:

Para um mosfet entrar em funcionamento, a tensão da *gate* tem de ser superior à tensão da *source*. Uma característica do mosfet de potência, é este apresentar uma capacidade, entre a *gate* e os outros terminais. Esta capacidade tem um efeito prejudicial no funcionamento do mosfet, ou seja, quando um impulso de comando chega à *gate*, este vai primeiro carregar a capacidade, antes que a tensão na *gate* atinja o nível

necessário, para o mosfet entrar em condução. Para solucionar este problema recorre-se, frequentemente à inserção de um circuito *drive*.

O circuito de *drive* é necessário, uma vez que o nível de tensão, à saída do microcontrolador não ultrapassa os 5V. O mosfet não consegue entrar em condução, com tais níveis de tensão, assim a principal função deste circuito, é a de converter o sinal de controlo, proveniente do microcontrolador, num sinal que permita ao mosfet entrar em funcionamento. Estes circuitos conseguem isso, principalmente através de duas abordagens, na primeira o circuito de *drive* fornece uma determinada quantidade de corrente, num breve instante de tempo, para que a capacidade que existe entre a *gate* e os outros terminais, seja rapidamente carregada, esta quantidade de corrente chega por vezes, a atingir valores da ordem dos amperes. A segunda abordagem consiste no fornecimento, de níveis de tensão adequados, para a entrada em funcionamento do mosfet.

Neste trabalho foi utilizado o circuito de drive NCP5111 da On Semiconductor, para accionamento dos mosfet do inversor de tensão. Este *drive* tem a particularidade, de ser desenhado especificamente, para inversores com a configuração em meia ponte, onde utiliza a técnica *bootstrap*, para permitir o correcto funcionamento, da parte alta da configuração em meia ponte, como se pode observar na Figura 5-10. O circuito *bootstrap* é constituído, essencialmente por um díodo e por um condensador, com um valor de capacidade bastante superior ao condensador existente entre a *gate* e a *source* do mosfet, Para que desta forma, os dois condensadores quando são ligados, a energia utilizada para carregar o condensador de menor valor seja desprezável, face à energia contida no condensador de maior capacidade.

A configuração do inversor em meia ponte, tem a particularidade, de a parte alta da montagem, encontrar-se com massa flutuante, enquanto na parte baixa a *source* está ligada à massa. Esta situação leva a um incorrecto funcionamento do mosfet. Para solucionar este problema, o circuito de *drive* tem um pino (*Bridge*), que estabelece um ponto de referência, para o mosfet da parte alta, permitindo assim o correcto funcionamento do inversor [53].

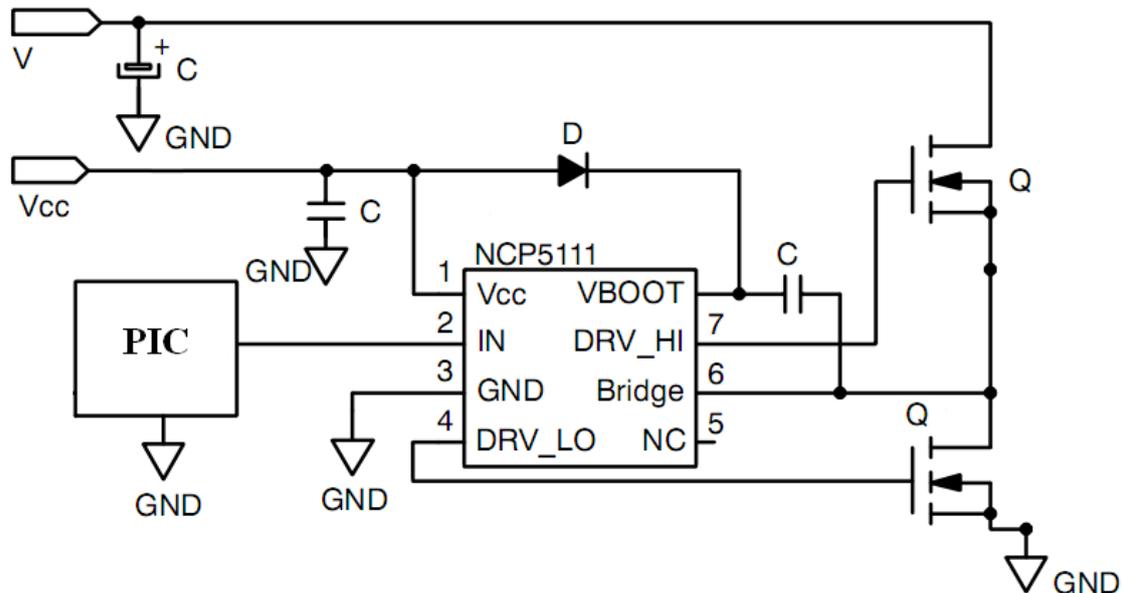


Figura 5-10 Circuito drive mosfets NCP511 [51]

## 5.7 Controlo do inversor monofásico

Para se conseguir sintetizar uma onda de tensão sinusoidal, com uma frequência de 50Hz, à saída do inversor de tensão monofásico, foi utilizado o PIC18f4431. Foi calculada uma tabela de senos com 200 valores, ou seja, com estes valores é possível sintetizar uma onda bastante próxima a uma sinusóide. Para se conseguir sintetizar a onda, foi necessário recorrer aos registos do módulo PWM do microcontrolador. Foram utilizados os seguintes registos: PTCON0, PTCON1, PWMCON0, PWMCON1, DTCON, OVDCOND, OVDCONS, PTPERL, PTPERH.

Os registos PTCON0 e PTCON1, são os registos de controlo do tempo do PWM, onde se efectua as escolhas sobre o modo e controlo dos tempos do PWM de saída, foi seleccionado o modo contador Up/Down. Os registos PWMCON0 e PWMCON1, são os registos de controlo do PWM, onde foi seleccionado o modo de operação complementar dos pinos PWM0 e PWM1. O registo DTCON é o registo de controlo do *Dead-Time*. Os registos PTPERL e PTPERH são os registos onde se define a frequência do PWM.

O controlo do inversor monofásico é efectuado da seguinte forma: a tabela de 200 valores de senos é inicializada, após isto, é configurado o PWM para operar a uma frequência de 10kHz no modo *Up/Down*. Em seguida é executado um ciclo de 200 iterações; durante as 200 iterações o valor do seno correspondente vai sendo actualizado

para a saída, sempre que a contagem decrescente atinja o final, como se pode ver na Figura 5-11, criando desta forma os impulsos à saída do inversor. Foi configurado o *dead time* para se evitar que dois mosfets acidentalmente entrem em condução, causando um curto-circuito. O *dead time* foi calculado segundo a expressão:

$$Dead\ Time = \frac{Dead\ Time\ value}{\left(\frac{Fosc}{Prescaler}\right)}$$

Onde:

Dead Time value - valor que é carregado no registo DTCON

Fosc – Frequência do cristal

Prescaler – Contador/ Base tempo do registo PWM

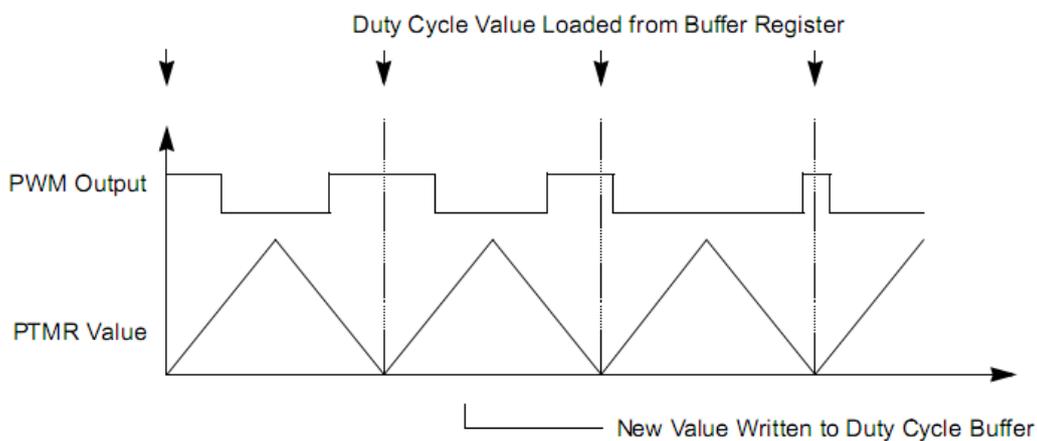


Figura 5-11 Modo contador *Up/Down* [48]

Na Figura 5-12 têm-se o algoritmo de controlo do inversor monofásico. Este algoritmo contém excertos de código para se melhor compreender o funcionamento deste. No anexo A encontra-se o código implementado para controlo do inversor monofásico como o nome de Sinusóide.c

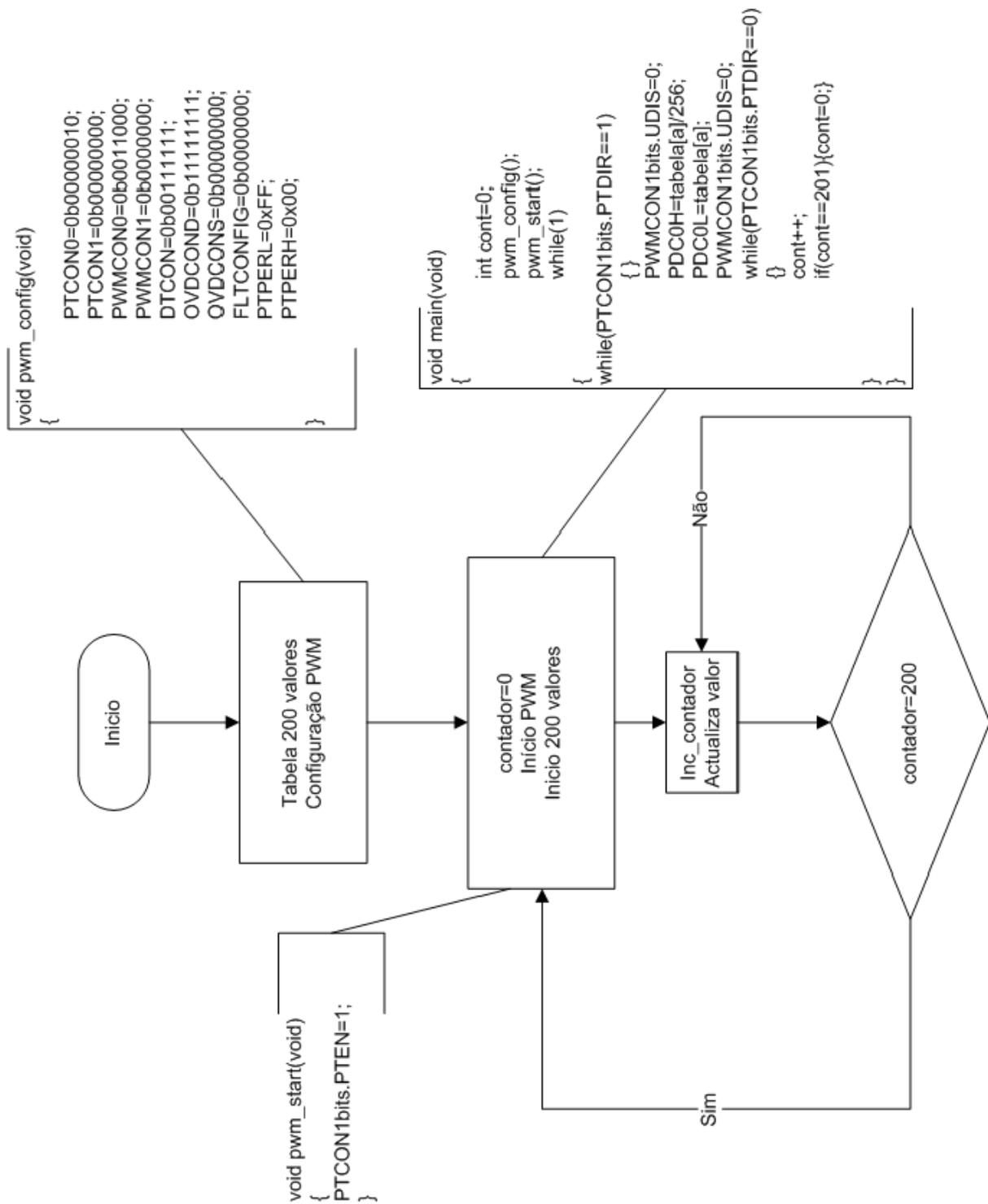


Figura 5-12 Algoritmo de controlo do inversor monofásico

## Capítulo 6

### Resultados

#### 6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios efectuados aos circuitos desta dissertação. Foram efectuados testes de carga para traçar as curvas características do pannel fotovoltaico, assim como, foram igualmente elaborados ensaios ao conversor de tensão *Step-Up* e ao inversor monofásico de tensão, com o objectivo de registar as principais formas de onda, bem como efectuar comentários aos resultados apresentados.

#### 6.2 Ensaio ao pannel solar

O pannel solar utilizado nesta dissertação é constituído por 72 células de silício monocristalino e apresenta uma potência de 150W com uma tensão de saída de 24 volts.

A Tabela 6-1 salienta as principais especificações técnicas do pannel, nomeadamente as características eléctricas.

Tabela 6-1 Características eléctricas BP2150S [32]

	<b>BP 2150S</b>
Potencia Máxima (Pmax)	150W
Tensão na Pmax (Vmp)	34V
Corrente na Pmax(Imp)	4.45A
Mínima Pmax garantida	140W
Corrente curto-circuito (Isc)	4,75A
Tensão circuito-aberto (Voc)	42,8V
Coeficiente de temperatura de Isc	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}\text{C}$
Coeficiente de temperatura de Voc	$-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Coeficiente de temperatura da potência	$-(0,5 \pm 0,05)\%/^{\circ}\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Tensão máxima do sistema	600V

No ensaio verificou-se uma radiação solar de cerca de  $180\text{W/m}^2$ , uma temperatura ambiente de  $37^\circ\text{C}$ , enquanto a do painel rondava os  $60^\circ\text{C}$ . Os testes consistiram em aplicar ao painel fotovoltaico cargas puramente resistivas, e registar o comportamento deste. Foram igualmente efectuados testes em circuito aberto e em curto-circuito. Na tabela 6-2 mostra-se os valores obtidos para as diversas cargas aplicadas.

Tabela 6-2 Resultados experimentais

Carga ( $\Omega$ )	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)
0	4,37	0,00	0,00
1	4,35	4,96	21,58
3	4,35	13,76	59,86
5	4,27	22,15	94,58
6	4,16	25,75	107,12
7	3,97	28,56	113,14
8	3,71	30,31	112,45
9	3,43	31,51	108,08
10	3,18	32,43	103,13
11	2,95	33,06	97,53
12	2,74	33,54	91,90
13	2,56	33,94	86,78
14	2,43	34,22	82,13
15	2,25	34,46	77,53
20	1,69	34,65	58,47
25	1,38	35,16	48,52
30	1,16	35,51	41,19
40	0,88	35,89	31,58
Aberto	0	37,03	0,00

Após a obtenção dos resultados do ensaio em carga, procedeu-se ao seu tratamento. Para uma melhor análise foram inseridos numa tabela do *Excel*, do *Microsoft Office*. A partir desta tabela foram criados gráficos para melhor ilustrar o comportamento do painel. Através dos dados inseridos traçaram-se as curvas  $I * U$ , assim como a da potência, tal como, se demonstra na Figuras 6-1 e na Figura 6-2.

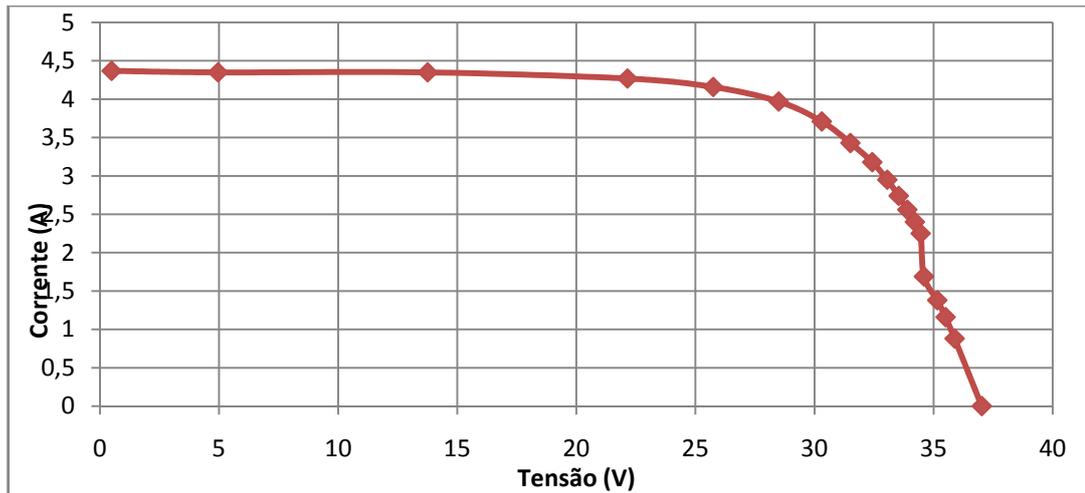


Figura 6-1 Curva I\*U

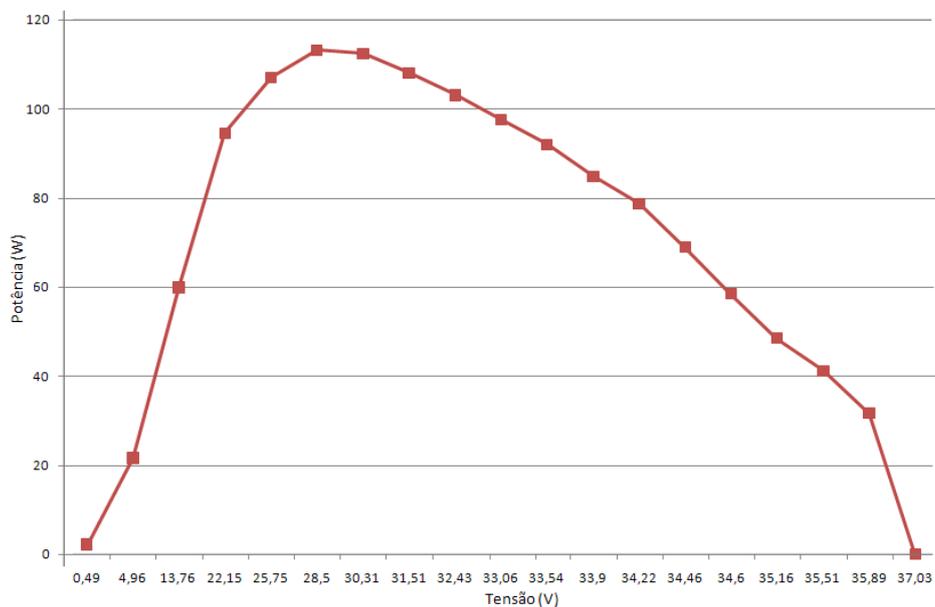


Figura 6-2 Curva da potência

Como se observa nas figuras anteriores, a potência real que se consegue obter do painel é bastante inferior àquela que o fabricante refere. Existem vários factores que justificam esta situação, entre os quais, se destacam a alta temperatura a que se encontrava o painel no dia do ensaio, assim como, as condições meteorológicas existentes durante esse ensaio, como foi o caso do aparecimento de nuvens que condicionaram a exposição solar. Estes foram os factores mais relevantes para que o painel não conseguisse atingir um nível de potência mais elevado.

### 6.3 Ensaio ao conversor de tensão *Step-Up*

Este ensaio permitiu observar o funcionamento do conversor *Step-Up*. Foi utilizada uma fonte de corrente contínua de 20V, para emular a tensão do painel fotovoltaico. A Figura 6-3 mostra, a tensão no *Drain* do mosfet, estando aplicada ao mosfet uma frequência de comutação de 40kHz com um *duty-cycle* 47,8%.

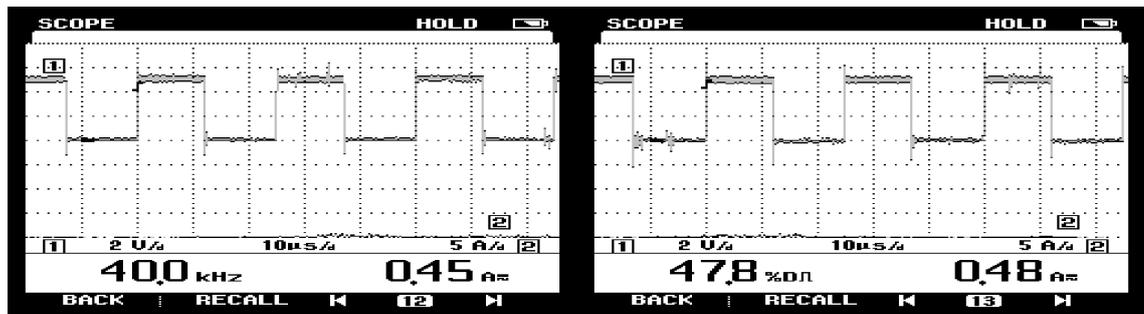


Figura 6-3 Forma de onda da tensão no mosfet

A tensão à saída do conversor apresenta uma tensão de 36,74V e apresenta um reduzido *ripple*, como se pode observar na Figura 6-4.

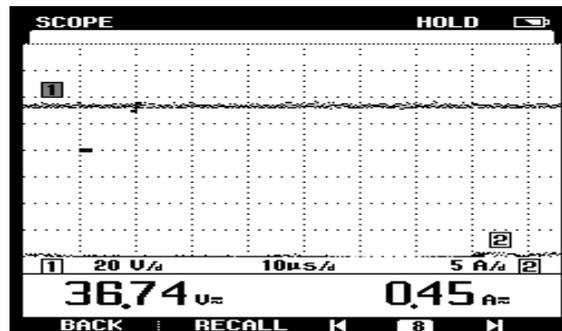


Figura 6-4 Forma de onda da tensão de saída

### 6.4 Ensaio ao Inversor de Tensão

Para ensaio ao inversor de tensão foram efectuados três testes: o primeiro em vazio, o segundo com uma carga resistiva e o terceiro com um carregador de telemóvel, onde comportamento é o típico de uma fonte de alimentação comutada.

Na figura 6-5 são apresentadas as medições efectuadas à tensão de saída do transformador, para o teste em vazio.

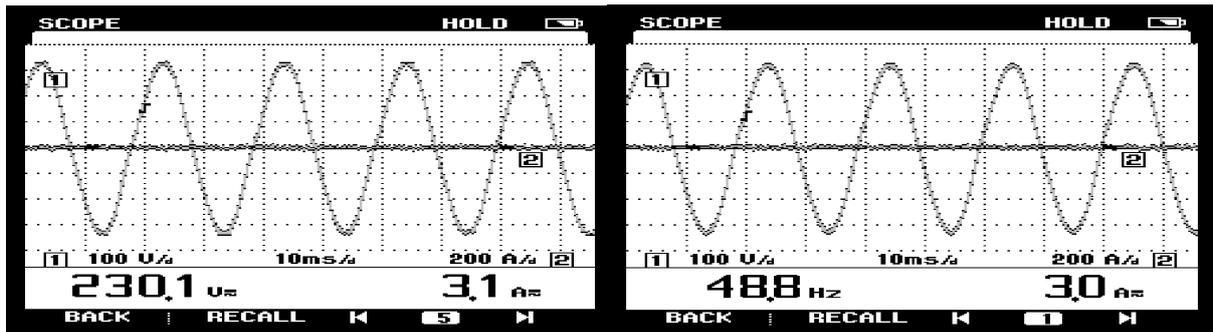


Figura 6-5 Formas de onda da tensão

Como se observa na Figura 6-5, a tensão apresenta um valor eficaz de aproximadamente 230V, com uma frequência de 48,8Hz. A frequência é inferior à permitida por lei, uma vez que a frequência da rede eléctrica é de 50Hz, apresentando uma baixa tolerância. Foi portanto, necessário descobrir a razão para se estar a obter um valor tão distanciado daquele que era esperado. Analisando-se o sistema, chegou-se à conclusão que o problema foi originado por uma falha durante a programação do sistema de controlo do inversor de tensão. Aquando da programação para se gerar a sinusóide, foi calculada uma tabela de senos com 200 valores. Sendo que cada um desses valores devia ser inserido com uma cadência de 0,02s, o que dá uma frequência de inserção de 10kHz. Na realidade a frequência a que o microcontrolador estava a inserir os valores era ligeiramente inferior, cerca de 9,8kHz, ou seja, no final da inserção das 200 amostras, obtém-se uma frequência próxima dos 49Hz e não dos 50Hz como seria esperado. Na figura 6-6 está representado o conteúdo harmónico da forma de onda de tensão, onde o THD atinge um valor de 4,2%, com componentes harmónicos de terceira e quinta ordem.

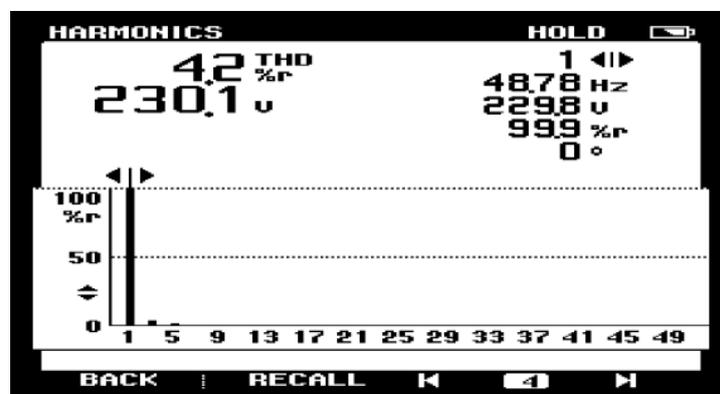


Figura 6-6 Espectro da tensão de saída

Na figura 6-7 apresentam-se as formas de onda e o espectro da tensão de saída para o teste em carga. Neste teste foi utilizado uma lâmpada de incandescência como carga, esta tem uma potência de 25W.

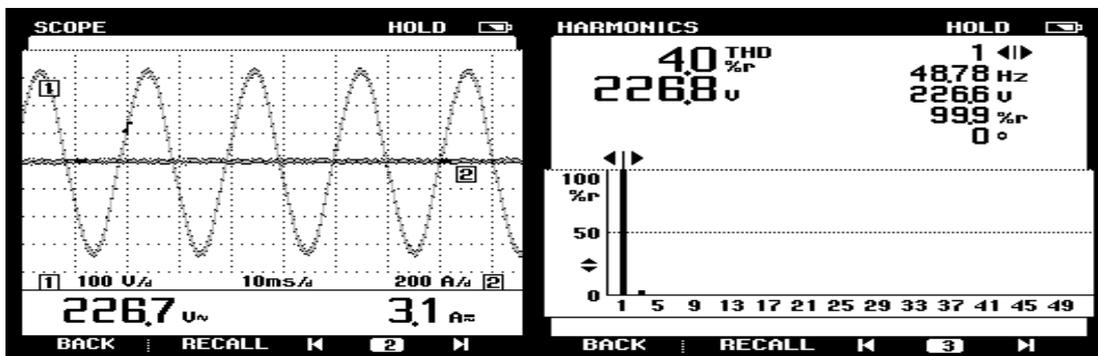


Figura 6-7 Forma de onda da tensão ensaio em carga

Como se observa na figura 6-7, a tensão apresenta um valor eficaz de 226,7V, uma frequência de 48,78Hz e um THD de 4% com componente harmónica de terceira ordem. Este valor de tensão deve-se ao facto de quando se efectua a ligação entre o sistema e a carga verifica-se uma diminuição do valor eficaz da tensão à saída do transformador. Esta descida de tensão origina também uma descida de tensão no conversor de tensão DC/DC. Este problema é de fácil solução, uma vez que a tensão à saída do conversor de tensão é controlada, ou seja, existe uma monitorização da tensão de saída. Quando a tensão é superior ou inferior a um determinado nível, neste caso cerca de 36V, o sistema através da variação do *duty-cycle* efectua uma compensação da tensão de saída, que vai afectar a tensão à saída do transformador.

Na Figura 6-8 observa-se a forma de onda da tensão de saída assim como a percentagem do THD para o ensaio com o carregador do telemóvel. Esta carga foi escolhida devido ao facto, de este equipamento electrónico caracterizar várias cargas largamente utilizadas. Como se constata na Figura 6-8, a forma de onda apresenta as características típicas de uma fonte de alimentação, ou seja, um achatamento na crista da sinusóide e encontramos componentes harmónicas de terceira e quinta ordem.

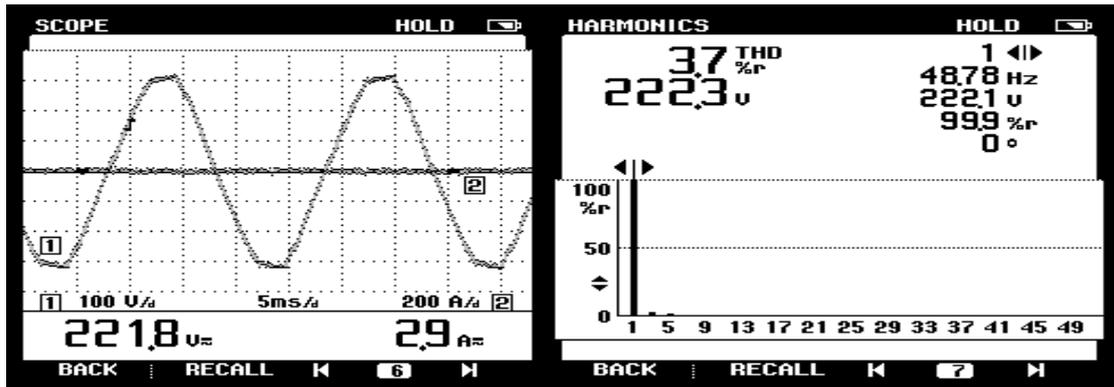


Figura 6-8 Forma de onda da tensão no ensaio



## Capítulo 7

### Conclusões

#### 7.1 Conclusões

Com este trabalho reforça-se a ideia de que a energia fotovoltaica, assim como todas as energias renováveis, possibilitam e promovem a investigação académica. Em Portugal existe nos meios académicos uma importante força impulsionadora na área da investigação, pelo que não será surpreendente, os avanços que se irão atingir, na vanguarda da tecnologia relativamente às energias renováveis.

Presentemente em Portugal, a energia renovável onde se efectuam os maiores investimentos é sem dúvida a energia eólica, devido a esta encontrar-se numa fase mais madura da sua tecnologia, relativamente à solar fotovoltaica. Ao contrário da energia eólica, ainda é bastante caro instalar campos de extracção de energia eléctrica solar fotovoltaica. Uma das principais razões deve-se ao preço de fabrico das células fotovoltaicas, sendo que o processo de fabrico ainda se revela bastante complicado e requer instalações com equipamentos de última geração. No entanto, já se deslumbra a curto prazo, uma redução no preço de fabrico das células fotovoltaicas, em grande parte, graças à implementação de novas técnicas na produção destas, assim como devido à descoberta de novos materiais capazes de substituir as actuais células.

Este trabalho apresentou como objectivo principal a elaboração um circuito de interface entre um pannel fotovoltaico de baixa potência e as cargas eléctricas que irão ser alimentadas por este. O circuito de interface é particularmente útil em aplicações remotas, ou seja, aplicações que se encontram distanciadas da rede eléctrica. Ultimamente este tipo de aplicação tem registado grande crescimento entre nós, sendo possível ver exemplos destas aplicações nas auto-estradas, nomeadamente nos sistemas de vigilância e sistemas S.O.S., também é bastante comum encontrar-se em antenas dos sistemas de telecomunicação.

O circuito de interface é constituído por um conversor de tensão DC/DC *Step-Up*, um inversor de tensão DC/AC monofásico e por um transformador para elevar a tensão para 230V. Antes de se iniciar a construção do circuito de interface, foi efectuado um teste de carga a um pannel solar fotovoltaico de 150W, com o intuito de traçar a curva característica deste. Após de efectuado o teste chegou-se à conclusão, que potência de

saída do painel é bastante inferior àquela que os fabricantes anunciam. Sendo que a potência anunciada nos dados técnicos é obtida em ambiente controlado, ou seja, condições atmosféricas que na realidade dificilmente ocorrerão. Durante o ensaio o painel atingiu uma temperatura bastante superior àquela que é referenciada nos dados técnicos, assim como a radiação solar durante o ensaio não é constante. Por estes motivos, não se consegue obter a máxima potência do painel fotovoltaico.

Não se conseguindo obter uma potência suficientemente satisfatória para o painel, surgiu a questão de se conseguir obter o máximo de potência, que o painel consegue fornecer a cada instante. Assim concluiu-se, que já existem bastantes estudos sobre este tema, o que torna a solução deste problema bastante simples. Essa solução passa por integrar no sistema de controlo do conversor de tensão DC/DC *Step-Up*, um algoritmo que permita extrair a máxima potência. Este algoritmo para além de extrair a máxima potência vai também regular a tensão à saída do painel fotovoltaico, para um nível pré-definido. Dos vários algoritmos existentes, aquele que mais é utilizado, devido à sua simplicidade e eficácia, é o algoritmo da perturbação e observação. Este baseia o seu princípio de funcionamento, na introdução de uma perturbação no *duty-cycle* do conversor de tensão, sendo que desta forma a potência de saída do painel varia. Consoante a variação de potência a perturbação vai ser repetida, para que se consiga obter à saída uma potência mais elevada. Este algoritmo é aplicado através de um microcontrolador que controla o conversor de tensão. A escolha do microcontrolador recaiu sobre o PIC18F4431, devido a este ser distribuído de forma gratuita e satisfazer os requisitos necessários para a aplicação.

Em relação à topologia adoptada para o conversor de tensão DC/DC, foi escolhida a configuração *Step-Up*. Este conversor permite obter uma tensão de saída mais elevada do que a tensão que o painel fotovoltaico fornece. Com isto, vai existir um menor nível de corrente a fluir pelo circuito do conversor. Em relação ao inversor de tensão DC/AC, foi escolhida a topologia em ponte completa, sendo que, é constituído por quatro mosfets de canal n, divididos em dois braços. As comutações dos mosfets são controladas pelo PIC18F4431 de forma a obter-se na saída uma sequência de impulsos. Estes, depois de filtrados originam uma forma de onda de tensão bastante próxima com uma sinusóide à frequência de 50Hz.

A principal dificuldade durante a elaboração desta dissertação deu-se com a escolha do microcontrolador e durante a programação deste. A escolha do microcontrolador PIC18F4431 deve-se ao facto de este conter todos os elementos

necessários à concretização deste trabalho. Uma vez que o PIC18F4431 já é fabricado com módulo de PWM e módulo de ADC. Sendo que desta forma, despende-se menos tempo na montagem de circuitos externos (circuitos de ADC e PWM). Visto ser a primeira vez que se trabalhou com este microcontrolador, foi necessário estudá-lo, assim como as ferramentas necessárias para a sua programação.

Em relação ao desenvolvimento do trabalho, é de referir os seguintes aspectos: o painel fotovoltaico só foi utilizado aquando do ensaio para traçar a curva característica, sendo que, a partir daí foi substituído por uma fonte de tensão DC uma vez que não é possível colocar o painel em correcto funcionamento, dentro de um gabinete. A construção do filtro LC revelou ser um processo complexo, visto que a construção de uma bobina é um processo moroso, uma vez que enrolar fio de cobre implica alguma perícia por parte de quem o faz. O condensador devido às características para este tipo de aplicação é bastante caro, e difícil de encontrar nas lojas da especialidade. Assim foi necessário recorrer a um condensador de arranque de um motor, visto as características serem deste serem semelhantes ao condensador do filtro LC.

Numa análise global os objectivos propostos foram atingidos, uma vez que, o sistema construído demonstrou através dos vários ensaios efectuados funcionar dentro da normalidade. O comportamento obtido foi o esperado, face às limitações do mesmo sistema, ou seja, este apenas foi dimensionado para alimentar cargas de baixa potência.

## **7.2 Propostas de trabalho futuro**

Como proposta para trabalho futuro e numa perspectiva enriquecedora do trabalho já efectuado, sugere-se a elaboração de um circuito de interface, para se proceder à injeção de energia na rede eléctrica, assim como a introdução de um banco de baterias com o respectivo controlo de carga. A ligação deste tipo de sistema à rede eléctrica, tem ganho nos últimos anos grande destaque no mercado das energias renováveis, uma vez que o Estado tem promovido tarifas atractivas para os produtores deste tipo de energia. Sendo que estas tarifas permitem aos produtores amortizar mais rapidamente o investimento inicial. Em relação ao banco de baterias este é de extrema importância em aplicações afastadas da rede eléctrica, uma vez que permite o armazenamento de energia eléctrica. Assim, em alturas em que não exista sol, pode-se recorrer ao banco de baterias para se obter energia eléctrica. Para uma boa utilização do banco de baterias é

necessário controlar o ciclo de carga e descarga, com o objectivo de prolongar a vida útil das mesmas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Vasconcellos Gomes, Daniela; “Algumas considerações sobre o desenvolvimento sustentável e a necessária preocupação com os recursos naturais”; 2006
- [2] Energy for a Changing World; European Commission; 2007.
- [3] International Energy Outlook 2008, Energy Information Administration, September 2008
- [4] Energia, tecnologia e política climática: perspectivas mundiais para 2030, mensagens-chave; Comissão Europeia; 2003.
- [5] Unidade de Coordenação do Plano Tecnológico, Energia, Documento de trabalho nº10.
- [6] Página consultada em 28 de Setembro de 2008 <<http://www.mineconomia.pt/innerPage.aspx?idCat=51&idMasterCat=13&idLang=1>>
- [7] “Europa admite punir Portugal por não cumprir metas de Quioto” página consultada em 18 de Novembro de 2008<[http://dn.sapo.pt/2006/02/16/sociedade/europa\\_admite\\_punir\\_portugal\\_ao\\_cum.html](http://dn.sapo.pt/2006/02/16/sociedade/europa_admite_punir_portugal_ao_cum.html)>
- [8] “Vento e sol podem garantir energia para 2/3 da população mundial” Página consultada a 18 de Novembro de 2008 <[http://www.ecoblogue.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2147&Itemid=1](http://www.ecoblogue.net/index.php?option=com_content&task=view&id=2147&Itemid=1)>
- [9] “Portugal Verde”Página consultada a 10 de Novembro de 2008 <<http://sol.sapo.pt/blogs/energia/archive/tags/solar/default.aspx>>
- [10] “Energia para o Futuro: Fontes de Energia e Renováveis”; Livro Branco.
- [11] “Energia Mercado português da energia solar fotovoltaica vale 1000 milhões de euros por ano”. Página consultada em 23 de Outubro de 2008 <[http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content\\_id=674618](http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content_id=674618)>
- [12] Fernandes, Eduardo de Oliveira; VIII congresso ibérico de energia solar, Energia solar e qualidade de vida, Porto, Maio de 1997.
- [13] Eloy, António; Energias Sem-fim, Manual Pedagógico, 2006
- [14] A Vision for Photovoltaic Technology, Report by the Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC), 2005.
- [15] “Energia solar”. Página consultada a 23 de Outubro de 2008 <<http://www.dgge.pt/aaaDefault.aspx?f=1&back=1&codigono=636364426444AAAAAAAAAAAAA>>
- [16] Brito, Miguel Centeno; Electricidade Solar, 2001
- [17] Brito, Miguel Centeno; Vallêra, António; “Meio século de história fotovoltaica”; 2006
- [18] Castro, Rui; “Energias Renováveis e Produção Descentralizada Introdução à Energia Fotovoltaica”; Maio 2007.
- [19] Camus, Cristina; Eusébio, Eduardo; “Gestão de energia solar”; Março 2006.

- [20] “Silício - do grão de areia ao circuito de computador”. Página consultada a 2 de Outubro de 2008 <<http://www.quiprocura.net/elementos/silicio.htm>>
- [21] A Vision for Photovoltaic Technology, Report by the Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC), 2005.
- [22] Camus, Cristina; Eusébio, Eduardo; “Gestão de energia solar”; Março 2006.
- [23] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; “Energia solar princípios e aplicações”.
- [24] European Photovoltaic Technology Platform; “A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology”.
- [25] “PORTFOLIO” Página consultada a 15 de Outubro de 2008. <<http://www.paul-langrock.de/docs/portfolio.htm>>
- [26] “Solar Dude” Página consultada a 15 de Outubro de 2008 <<http://www.solardude.org/>>
- [27] Silva, Marco Faustino; “Impacto da Microgeração Fotovoltaica na Rede de Distribuição utilizando o Trânsito de Energia Trifásico”; Julho 2008
- [28] Abu Tariq, Associate Member, IEEE; M.S. Jamil Asghar, Member, IEEE; Development of Microcontroller-Based Maximum Power Point Tracker for a Photovoltaic Panel; 2006
- [29] K. Agbossou, Senior Member, IEEE; T.Tafticht; Institut de Recherché sur l'Hydroghe, Université de Québec à Trois-Rivres; Développement d'une méthode MPPT pour les systèmes photovoltaïques; 2004;
- [30] SMM Wolf; JHR Enslin; Department of Electrical and Electronical Engineering, University of Stellenbosch; ECONOMICAL, PV MAXIMUM POWER POINT TRACKING REGULATOR WITH SIMPLISTIC CONTROLLER; 1993.
- [31] Guillermo Martín-Segura; Joaquim López-Mestre; Miquel Teixidó-Casas; Antoni Sudrià-Andreu; “Development of a Photovoltaic Array Emulator System based on a Full-Bridge Structure”
- [32] “150-Watt Monocrystalline Photovoltaic Module” Documento consultado a 12 de Outubro de 2008. <[www.bpsolar.com](http://www.bpsolar.com)>
- [33] Trishan Eram; Patrick L. Chapman; “Comparison of a Photovoltaic Array Maximum Point Tracking Techniques”
- [34] Wernher Swiegers; Johan H.R. Enslin; Department of Electrical Engineering University of Stellenbosch; An Integrated Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panels; 1998
- [35] Florent Boico; Brad Lehman; Northeastern University; Study of Different Implementation Approaches for a Maximum Power Point Tracker; 2006.
- [36] Vikrant.A.Chaudhari; Deemed University; Automatic Peak Power Tracker for Solar PV Modules Using dSPACER software; 2005.
- [37] D. P. Hohm; M. E. Ropp; John Wiley & Sons, Ltd.; Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms; Published online 22 November 2002.

- [38] S.ARMSTRONG; W.G.HURLEY; Self-Regulating Maximum Power Point Tracking For Solar Energy Systems.
- [39] Joe-Air Jiang; Tsong-Liang Huang; Ying-Tung Hsiao; Chia-Hong Chen; “Maximum power tracking for photovoltaic power systems”; 2004.
- [40] Rosembach, Ricardo Henrique; Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico; 2004.
- [41] Pomilio, José Antenor; Fontes Chaveadas – Cap. 1 Topologias básicas de conversores CC-CC não-isolados; 2000.
- [42] Martins, António e Rodrigues, Ricardo (2002); Sistema de Alimentação a Energia Solar; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [43] Mohan, Underland and Robins (1995); Power Electronics: Converters, Applications, and Design; John Wiley & Sons, Ltd.
- [44] Mineiro Sá Junior, Edilson; “Sistema Fotovoltaico para Iluminação Pública em Horário de Ponta”; 2004.
- [45] MAXIM; “Application note 2031, DC-DC converter tutorial”; 2000.
- [46] Matias, José (1997); Tecnologias da Electricidade; Didáctica Editora.
- [47] Muhammad, H. Rashid; Power Electronics Handbook; <http://books.google.pt>
- [48] PIC18F2331/2431/4331/4431 Data Sheet; Microchip.
- [49] Francisco, Antonio; “Microcontroladores PIC”; 2008.
- [50] Blake, Carl; Bull, Chris; IGBT or MOSFET: Choose Wisely; International Rectifier
- [51] NTY100N10 Data Sheet; On Semiconductor
- [52] 6N136 Data Sheet, QT Optoelectronics
- [53] MAXIM ;125V/3A, High-Speed, Half-Bridge MOSFET Drivers;2008.
- [54] NCP511 Data Sheet; On Semiconductor
- [55] “Energias Renováveis” Página consultada a 15 de Outubro de 2008 <[www.futersolutions.pt](http://www.futersolutions.pt)>
- [56] Australian CRC for renewable energy



## ANEXOS

### Anexo A - Código de controlo do inversor monofásico:

Inversor.c

```
#include<p18f4431.h>
#include<stdio.h>
#pragma config OSC = HS
#pragma config WDTEN = OFF
#pragma config DEBUG = ON
#pragma config LVP = OFF
near rom int tabela [201] =
{0x1FF,0x209,0x214,0x21F,0x229,0x234,0x23F,0x249,0x254,0x25E,0x268,0x273,0x27D,0x287,0x291,0x2
9A,0x2A4,0x2AD,0x2B6,0x2BF,0x2C8,0x2D1,0x2D9,0x2E1,0x2E9,0x2F1,0x2F9,0x300,0x307,0x30E,0x314,
0x31A,0x320,0x326,0x32B,0x330,0x335,0x339,0x33D,0x341,0x345,0x348,0x34B,0x34D,0x34F,0x351,0x3
53,0x354,0x355,0x356,0x357,0x358,0x359,0x35A,0x35B,0x35C,0x35D,0x35E,0x35F,0x360,0x361,0x362,0
x363,0x364,0x365,0x366,0x367,0x368,0x369,0x36A,0x36B,0x36C,0x36D,0x36E,0x36F,0x370,0x371,0x372,0
x373,0x374,0x375,0x376,0x377,0x378,0x379,0x37A,0x37B,0x37C,0x37D,0x37E,0x37F,0x380,0x381,0x382,0
x383,0x384,0x385,0x386,0x387,0x388,0x389,0x38A,0x38B,0x38C,0x38D,0x38E,0x38F,0x390,0x391,0x392,0
x393,0x394,0x395,0x396,0x397,0x398,0x399,0x39A,0x39B,0x39C,0x39D,0x39E,0x39F,0x3A0,0x3A1,0x3A2,0
x3A3,0x3A4,0x3A5,0x3A6,0x3A7,0x3A8,0x3A9,0x3AA,0x3AB,0x3AC,0x3AD,0x3AE,0x3AF,0x3B0,0x3B1,0x3B2,0
x3B3,0x3B4,0x3B5,0x3B6,0x3B7,0x3B8,0x3B9,0x3BA,0x3BB,0x3BC,0x3BD,0x3BE,0x3BF,0x3C0,0x3C1,0x3C2,0
x3C3,0x3C4,0x3C5,0x3C6,0x3C7,0x3C8,0x3C9,0x3CA,0x3CB,0x3CC,0x3CD,0x3CE,0x3CF,0x3D0,0x3D1,0x3D2,0
x3D3,0x3D4,0x3D5,0x3D6,0x3D7,0x3D8,0x3D9,0x3DA,0x3DB,0x3DC,0x3DD,0x3DE,0x3DF,0x3E0,0x3E1,0x3E2,0
x3E3,0x3E4,0x3E5,0x3E6,0x3E7,0x3E8,0x3E9,0x3EA,0x3EB,0x3EC,0x3ED,0x3EE,0x3EF,0x3F0,0x3F1,0x3F2,0
x3F3,0x3F4,0x3F5,0x3F6,0x3F7,0x3F8,0x3F9,0x3FA,0x3FB,0x3FC,0x3FD,0x3FE,0x3FF};

void pwm_config(void)
{
PTCON0=0b00000010;//countinuous UP/Down Count mode
PTCON1=0b00000000;
PWMCON0=0b00110000;
PWMCON1=0b00000000;
DTCON=0b00111111;
OVDCOND=0b11111111;
OVDCONS=0b00000000;
FLTCONFIG=0b00000000;
//Frequencia
PTPERL=0xFF;
PTPERH=0x00;
```

```
}  
void pwm_start(void)  
{  
    PTCON1bits.PTEN=1;  
}  
void adc_config(void)  
{  
    ADCON0=0b00010001;  
    ADCON1=0b00010000;  
    ADCON2=0b11000010;  
    ADCON3=0b11000000;  
    ADCHS=0b00000000;  
    ANSEL0=0b00000011;  
    ANSEL1=0b00000000;  
}  
void adc_start(void)  
{  
    ADCON0bits.GO=1;  
}  
void main(void)  
{  
    int i=0, aux;  
    int a=0;  
  
    pwm_config();  
    pwm_start();  
    adc_config();  
    TRISAbits.TRISA0=1;  
    LATAbits.LATA0=1;  
    while(1)  
    {  
        while(PTCON1bits.PTDIR==1)  
        {}  
        PWMCON1bits.UDIS=0;  
        PDC0H=tabela[a]/256;  
        PDC0L=tabela[a];  
        PWMCON1bits.UDIS=0;  
        while(PTCON1bits.PTDIR==0)
```

```
{  
  a++;  
  if(a==201){a=0;}  
}
```

## Anexo B - Código de controlo do conversor Step-Up:

Step.c

```
#include <p18f4431.h>
#include <delays.h>
#include <stdio.h>
void pwm_variavel(void)
{
    int i;
    TRISC = 0;
    PR2 = 124; // ~20k
    T2CON = 0b00000100;
    CCP1CON = 0b00011101;
    CCPR1L = 0x01;
}
void inc_duty(void)
{
    CCPR1L++;
}
void dec_duty(void)
{
    CCPR1L--;
}
void adc_config(void)
{
    // 76543210
    ADCON0 = 0b00010001;
    ADCON1 = 0b00010000;
    ADCON2 = 0b11000010;
    ADCON3 = 0b11000000;
    ADCHS = 0b00000000;
    ANSEL0 = 0b00000011;
    ANSEL1 = 0b00000000;
}
void adc_start(void)
{
    ADCON0bits.GO = 1;
}
```

```
}  
void main(void)  
{  
    int ulidoh,ulidol,vout1,ilidoh,ilidol;  
    int verro;  
    float vout;  
    int vref=50;//46  
    TRISD=0x00;  
    TRISB=0x00;  
    PORTD=0x00;  
    adc_config();  
    TRISAbits.TRISA0=1;  
    LATAbits.LATA0=1;  
    TRISAbits.TRISA1=1;  
    LATAbits.LATA1=1;  
    pwm_variavel();  
    while(1)  
    {  
        adc_start();  
        while(ADCON0bits.GO==1)  
            ulidoh=ADRESH;  
            ulidol=ADRESL;  
            ilidoh=ADRESH;  
            ilidol=ADRESL;  
            vout=(256*ulidoh)+ulidol;  
            vout=(vout*5)/1023;  
            vout1=vout*10;  
            verro=vref-vout1;  
            if((verro)>0)  
            {  
                inc_duty();  
                Delay10KTCYx(1000);  
            }  
            if((verro)<0)  
            {  
                dec_duty();  
                Delay10KTCYx(1000);  
            }  
        }  
    }  
}
```

## Anexo C - Placa de controlo Step-Up:

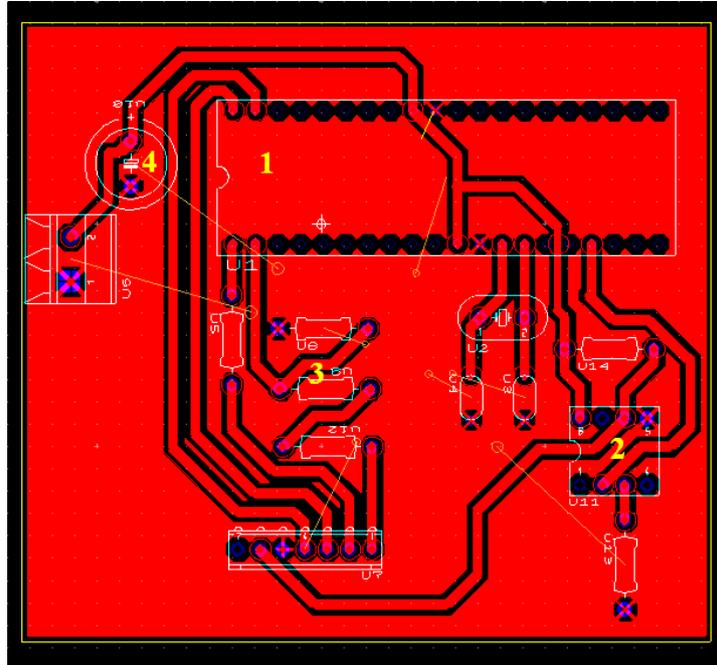


Figura 7-1 Placa de aquisição de dados

Legenda da Figura:

- 1: Microcontrolador 18F4431
- 2: Acoplador Óptico
- 3: Divisor de tensão
- 4: Condensador

## Anexo D - Placa de controlo do inversor monofásico:

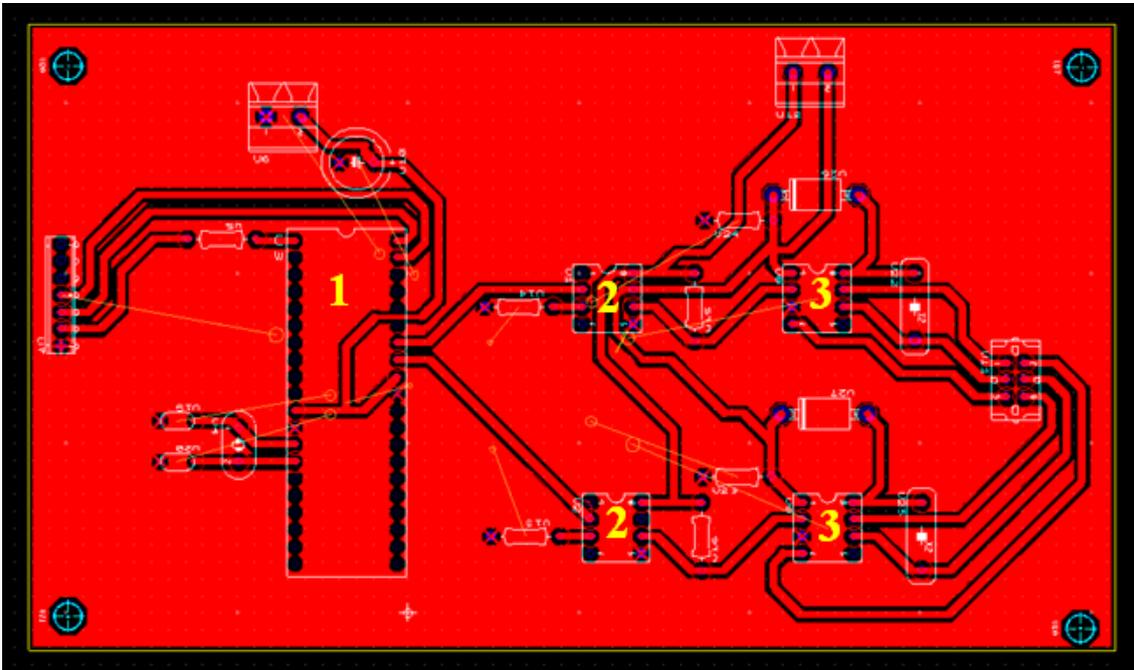
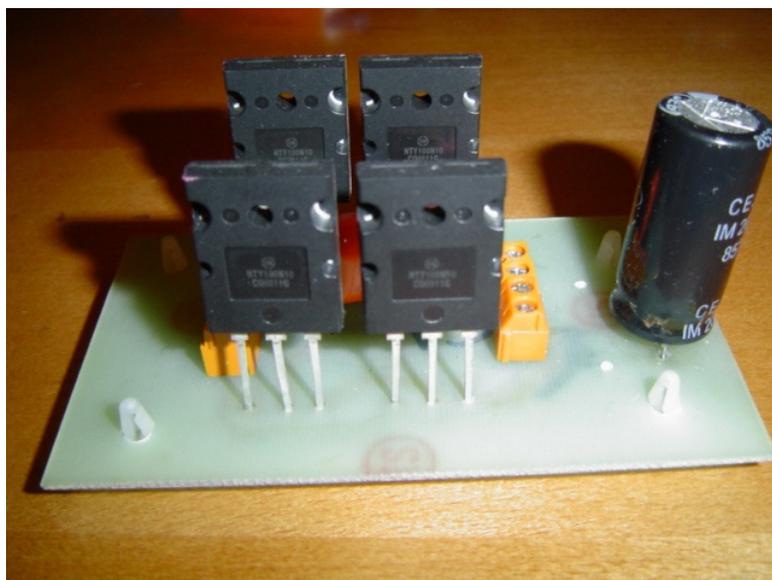


Figura 7-2 Placa de controlo do inversor

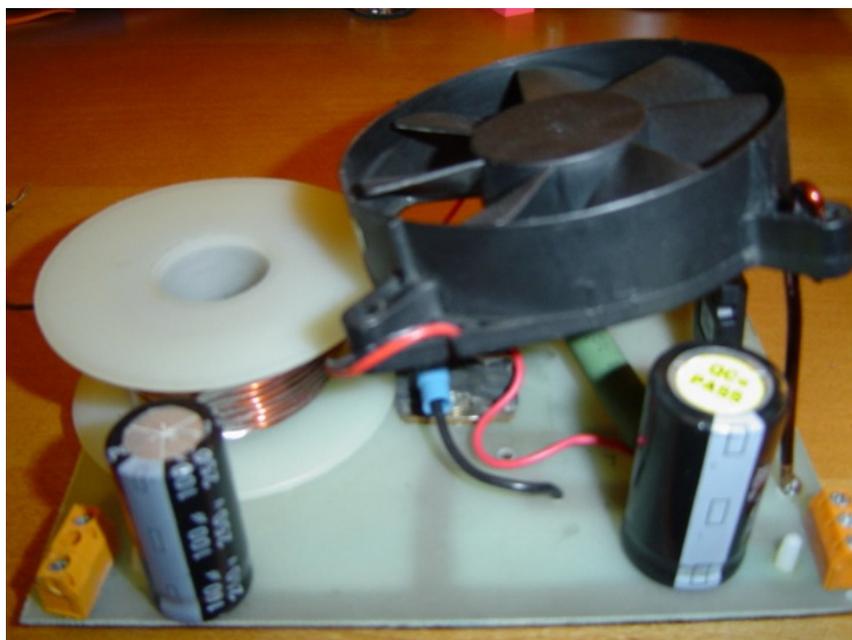
Legenda da Figura:

- 1: Microcontrolador 18F4431
- 2: Acoplador Óptico
- 3: Circuito de drive

## Anexo E - Inversor monofásico implementado:



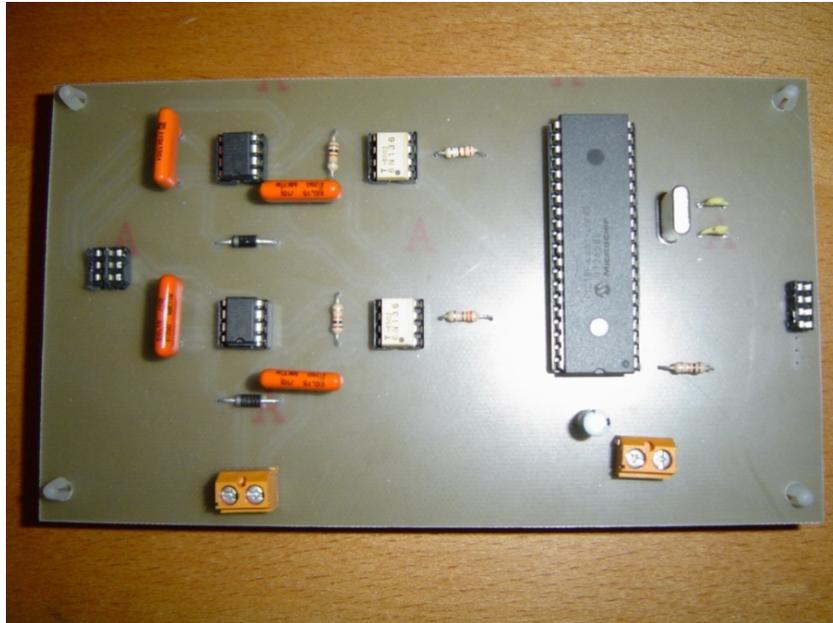
**Anexo F – Circuito *Step-Up* implementado:**



## Anexo G - Placa de controlo Step-Up implementada:



**Anexo H - Placa de controlo do inversor monofásico implementada:**



**Anexo D – Filtro LC implementado:**

