

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Produção de Energia Elétrica Térmica

Gonçalo Soares Pacheco

PARA APRECIÇÃO POR JÚRI

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. Adriano da Silva Carvalho

28 de Julho de 2014

A Dissertação intitulada

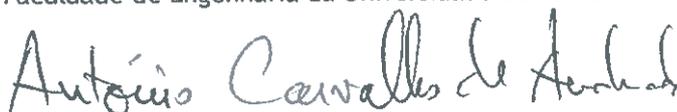
“Produção de Energia Eléctrica Térmica”

foi aprovada em provas realizadas em 22-07-2014

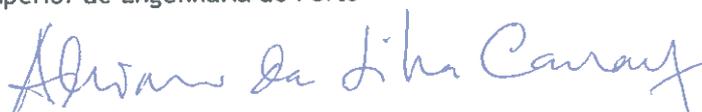
o júri



Presidente **Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa**
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor António Carvalho de Andrade
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto
Superior de Engenharia do Porto



Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho
Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Gonçalo Soares Pacheco

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A necessidade cada vez maior de procurar novas formas de produção de energia e a necessidade de otimizar as suas produções decorrem de preocupações de cariz económico e ambiental. A grande dependência dos combustíveis fósseis para produção de energia elétrica, numa carga em crescimento, está a ser colocada em causa pelo seu impacto nefasto na sociedade.

Esta dissertação surge com o intuito de estudar novas formas de produção de energia com base em recursos renováveis. Estes recursos que existem em abundância - água, sol e vento - devem ser aproveitados não só pela sua quantidade como também pelo seu potencial energético. Assim, pretende-se elaborar uma proposta que alie a produção fotovoltaica à produção termoelétrica tirando partido da mesma fonte de energia - o Sol.

De modo a elaborar esta proposta, foi necessário realizar um estudo teórico sobre o tema e sobre as tecnologias envolvidas neste processo. Este estudo envolveu formas de conversão de energia, fotovoltaica e termoelétrica, conversores DC-DC e técnicas de otimização da produção através de algoritmos *MPPT*. Foi também realizado um estudo sobre formas de acoplamento de geradores termoelétricos a painéis fotovoltaicos. Obtidos os conhecimentos básicos sobre painéis fotovoltaicos, geradores termoelétricos, conversores e respetivo controlo, foi possível elaborar uma proposta de sistema híbrido de produção fotovoltaica e termoelétrica.

Os resultados obtidos demonstram que existe um elevado potencial no aproveitamento energético do Sol no que toca à produção termoelétrica. Quando aliada a um sistema produtor fotovoltaico e com os elementos necessários à produção de uma diferença de temperatura nas suas junções - através de lentes de *Fresnel* e dissipadores de calor - é possível obter resultados bastante animadores. Desta forma é possível baixar o tempo de retorno de investimento num painel fotovoltaico acoplado a este um sistema de geração termoelétrica.

Abstract

The increasing need to find new forms of energy production and the need to optimize their production runs from concerns of economic and environmental nature. The heavy reliance on fossil fuels to produce electricity, with a load growth, is being called into question by its harmful impact on society.

This paper appears in order to study new forms of energy production based on renewable resources. These resources exist in abundance - water, sun and wind - should be used not only for its quantity but also for their energy potential. Thus, it is intend to develop a proposal that combines photovoltaic and thermoelectric production by taking advantage of the same energy source - the sun.

In order to develop this proposal was necessary to conduct a theoretical study on the topic and on the technologies involved in this process. This study involved forms of energy conversion, photovoltaic and thermoelectric power, DC-DC converters and techniques for optimizing production through MPPT algorithms. It was also performed a study on ways of coupling the photovoltaic and thermoelectric generators. Obtained the basic knowledge about photovoltaic panels, thermoelectric generators, converters and respective control was possible to draw up a proposal for a hybrid system of photovoltaic and thermoelectric production.

The results show that there is a high potential in energy recovery from the Sun in terms of the thermoelectric production. When combined with a PV and the elements needed to produce a temperature difference at their junctions producer system - through Fresnel lenses and heat sinks - it is possible to obtain very encouraging results. This way you can decrease the turnaround time investment in a photovoltaic panel engaging this system with a thermoelectric power generator.

Agradecimentos

Ao Professor Adriano Carvalho pela partilha do seu conhecimento, orientação, disponibilidade e conselhos prestados ao longo da dissertação.

Aos meus Pais pelo apoio, dedicação, entusiasmo e pela confiança que sempre depositaram em mim e nos meus projetos em toda a minha formação pessoal e académica.

Aos meus irmãos, Susana e André, por serem as minhas maiores influências.

À minha tia Cristina pela amizade, paciência e disponibilidade para ler esta dissertação.

À restante família por todo o suporte e confiança que depositaram em mim.

À minha namorada, Mafaldinha, por todo o amor, paciência, amizade e apoio que sempre prestou para que pudesse alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos de sempre, Becas, Breda, Catarina, Cidália, Guilherme, Júnia, Júlio, Kiko, Maria, Mariana, Miras, Rita, Ricky, Teclas e demais amigades que se cruzaram na minha vida que sempre me proporcionaram grandes momentos e que *construíram* um pouco de mim.

Aos meus companheiros de casa, João Bernardo e Guilherme Efe, pela amizade, *jogatanas*, *guitarradas* e todo o apoio nestes últimos 5 anos.

Aos amigos que fiz na faculdade desde o primeiro dia e que levo para sempre comigo, Zeza, Sónia, Basílio, Sabino.

Ao João Mota que sempre me acompanhou desde o início desta *aventura* e com o qual tive oportunidade de partilhar a grande experiência *Erasmus*.

Às amigades que fiz no decorrer da faculdade e que foram particularmente importantes nesta última fase, Mafalda, Sampaio, Nuno, Marta, Daniel, Joana, Trocado, Tavares, Nini, Leonor.

A todos o meu mais sincero Obrigado!

“When nothing seems to help, I go look at a stonecutter hammering away at his rock perhaps a hundred times without as much as a crack showing in it. Yet at the hundred and first blow it will split in two, and I know it was not that blow that did it, but all that had gone before.”

Jacob Riis

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objectivos	2
1.2	Estrutura da Dissertação	2
2	Estado da Arte	5
2.1	Enquadramento	5
2.2	Princípio dos Sistemas de Conversão de Energia Fotovoltaica	6
2.2.1	Tipos de sistemas fotovoltaicos	8
2.3	Princípio dos Sistemas de Conversão de Energia Termoelétrica	9
2.4	Concentradores Solares	10
2.5	Conversores DC-DC	11
2.5.1	Controlo de conversores DC-DC	11
2.5.2	Step-Down ou Buck	13
2.5.3	Step-Up ou Boost	14
2.5.4	Conversor Step-Up/Down ou Buck-Boost	21
2.6	Algoritmos <i>MPPT</i> - <i>Maximum Power Point Tracking</i>	23
2.6.1	Perturbação e Observação - <i>P&O</i>	24
2.6.2	Hill Climbing	26
2.6.3	Condutância Incremental	27
2.6.4	Tensão Constante	28
2.7	Armazenamento de Energia - Baterias	29
2.7.1	Perfil de carga e descarga	31
2.7.2	Critérios de Seleção	32
2.8	Hibridização entre Fotovoltaico e Termoelétrico	33
2.8.1	Acoplamento Simples	33
2.8.2	Spectrum Splitter	36
2.9	Conclusões	37
3	Sistema Fotovoltaico	39
3.1	Equivalente Elétrico	39
3.2	Funcionamento em diversas condições metereológicas	42
3.2.1	Influência da temperatura	43
3.2.2	Influência da irradiância	44
3.2.3	Influência do ângulo de incidência	45
3.3	Implementação em MATLAB	46
3.3.1	Método de Newton-Raphson	46
3.3.2	Influência da Irradiância	47
3.3.3	Influência da Temperatura	49

3.4	Implementação em PSIM	50
3.4.1	Influência da temperatura e irradiância	53
3.5	Conclusões	54
4	Sistema Termoelétrico	55
4.1	Efeito de Seebeck	55
4.2	Efeito de Peltier	55
4.3	Constituição de um Gerador Termoelétrico	56
4.3.1	Dissipadores de Calor	57
4.3.2	Figura de Mérito	58
4.4	Modelo elétrico	59
4.4.1	Potência Máxima de Saída	60
4.4.2	Rendimento do gerador termoelétrico	61
4.4.3	Modelo do TEG	61
4.5	Conclusões	65
5	Conversor DC-DC e respetivo controlo	67
5.1	Arquitetura simplificada do sistema	67
5.2	Dimensionamento do Conversor	67
5.2.1	Resposta em frequência	69
5.3	Controlo	70
5.3.1	Controlo de tensão na saída	72
5.3.2	Controlo do <i>duty-cycle</i> por Algoritmo <i>MPPT</i>	74
5.3.3	Controlo <i>MPPT</i> com <i>PWM</i>	76
5.4	Conclusões	78
6	Análise do Sistema	79
6.1	Arquitetura do Sistema	79
6.2	Dimensionamento da bateria	81
6.2.1	Barramento DC	83
6.3	Algoritmo <i>MPPT</i>	84
6.4	Simulação	85
6.4.1	Irradiância constante e carga constante	85
6.4.2	Irradiância constante e variação na carga	86
6.4.3	Variação da irradiância e carga constante	88
6.4.4	Variação da irradiância e variação na carga	88
6.5	Conclusões	91
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	93
7.1	Conclusões	93
7.2	Trabalhos futuros	94
	Referências	97
A	Implementação em MATLAB	101
A.1	Sistema PV	101
A.2	Sistema TEG	103

Lista de Figuras

2.1	Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica	7
2.2	Características de um painel fotovoltaico	8
2.3	Sistema de conversão de energia fotovoltaica desde o painel até à rede	8
2.4	Lente convencional à esquerda e a lente de <i>Fresnel à direita</i>	10
2.5	Princípio básico do controlo dos conversores DC-DC	12
2.6	Diagrama de blocos e formas de onda do controlo por PWM	12
2.7	Conversor DC-DC <i>Step-Down</i>	13
2.8	Formas de onda de corrente e tensão na bobina em condução contínua (a) e em condução descontínua (b) do conversor <i>Buck</i>	14
2.9	Conversor DC-DC <i>Step-Up</i>	14
2.10	Formas de onda, em condução contínua, da tensão e da corrente na bobina do Conversor DC-DC <i>Step-Up</i>	15
2.11	Formas de onda, no limiar entre a condução contínua e descontínua, da tensão e da corrente na bobina do Conversor DC-DC <i>Step-Up</i>	17
2.12	<i>Step-Up</i> , I_{LB} e I_{oB} como função do <i>duty-cycle</i> no limiar da condução contínua	17
2.13	Formas de onda, em condução descontínua, da tensão e da corrente na bobina do Conversor DC-DC <i>Step-Up</i>	18
2.14	Característica do conversor <i>Step-Up</i> mantendo V_o constante	19
2.15	Tensão de ripple na saída de um conversor DC-DC <i>Step-up</i>	20
2.16	Efeito dos elementos parasitas no rácio de conversão da tensão num conversor DC-DC <i>Step-up</i>	22
2.17	Conversor DC-DC <i>buckboost</i>	22
2.18	Formas de onda de corrente e tensão na bobina em condução contínua (a) e em condução descontínua (b) do conversor <i>Buck-Boost</i>	23
2.19	Curvas características I-V e P-V de um painel fotovoltaico sobre diferentes condições de temperatura e irradiância	24
2.20	Variação da derivada da potência em diferentes posições na curva de potência	25
2.21	Algoritmo <i>MPPT</i> - Perturbação e Observação	25
2.22	Algoritmo <i>MPPT</i> - Hill Climbing	26
2.23	Algoritmo <i>MPPT</i> - Condutância Incremental	28
2.24	Diagrama de cargas Ibérico em diferentes períodos do ano	29
2.25	Esquema de um acoplamento simples	33
2.26	Circuito equivalente PV-TE	34
2.27	Ilustração do sistema de condução de calor	35
2.28	Ilustração do sistema tipo Taça	35
2.29	Esquema de um sistema de <i>Spectrum Splitter</i>	36
3.1	Circuito do equivalente elétrico de uma célula fotovoltaico	39

3.2	Efeito da Temperatura na curva I-V de um painel	44
3.3	Efeito da Irradiância na curva I-V de um painel	45
3.4	Comparação entre uma painel com seguidor solar (a rosa) e um painel fixo (a azul) em função da hora constante a irradiância média solar	46
3.5	Método de Newton-Raphson	47
3.6	Algoritmos implementados para determinação das curvas $I - V$ e $P - V$	48
3.7	Influência da irradiância na curva I-V do painel	48
3.8	Influência da irradiância na curva P-V do painel	49
3.9	Influência da temperatura na curva I-V do painel	49
3.10	Influência da temperatura na curva P-V do painel	50
3.11	Modelo físico e funcional dos módulos disponíveis no PSIM	50
3.12	Layout da interface gráfica da ferramenta: <i>Solar Module (physical model)</i>	52
3.13	Curva $I - V$ com $S = 1000W/m^2$ e $T = 25^{\circ}C$	52
3.14	Curva $P - V$ com $S = 1000W/m^2$ e $T = 25^{\circ}C$	53
3.15	Valor de potência para irradiância constante, $1000w/m^2$, com coeficientes de Ross de 0.058, imagem superior, e de 0, na imagem inferior.	53
3.16	Resposta do painel fotovoltaico a variações de irradiância com um algoritmo <i>MPPT</i>	54
4.1	Estrutura típica de um gerador termoeletrico	57
4.2	Esquema de elétrico de um módulo termoeletrico	60
4.3	Algoritmo implementado para determinação das características do TEG com $T_c = 20^{\circ}C$	62
4.4	Curva V-I para diferentes diferenças de temperatura com $T_c = 20^{\circ}C$	63
4.5	Curva P-I para diferentes diferenças de temperatura com $T_c = 20^{\circ}C$	63
4.6	Esquema utilizado para a representação do Gerador Termoeletrico em PSIM	64
4.7	Influência da temperatura na tensão e na corrente de saída do TEG	64
5.1	Arquitetura simplificada do sistema	68
5.2	Diagrama de Bode em amplitude e fase do <i>step-up</i> para uma carga de 10Ω	70
5.3	Controlo PWM com tensão de referência	71
5.4	Controlo do <i>duty-cycle</i> com algoritmo <i>MPPT</i>	71
5.5	Controlo PWM com algoritmo <i>MPPT</i> a gerar uma referência de corrente	71
5.6	Esquema utilizado para efetuar o controlo de tensão de saída	72
5.7	Evolução da tensão de saída e a corrente entregue à carga de 100Ω	73
5.8	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada no PV, tensão de entrada no TEG e da corrente entregue à carga de 100Ω	73
5.9	Evolução da tensão de saída e a corrente entregue à carga de 200Ω	74
5.10	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 100Hz$ - Hill Climbing	74
5.11	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 100Hz$ - Condutância Incremental	75
5.12	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 10kHz$ - Hill Climbing	75
5.13	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 10kHz$ - Condutância Incremental	76
5.14	Esquema utilizado para realizar o controlo através de um algoritmo <i>MPPT</i>	77
5.15	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 500Hz$	77

5.16	Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH=10kHz$	78
6.1	Arquitetura do sistema	79
6.2	Exemplos de uma lente de <i>Fresnel</i> e de um painel fotovoltaico	80
6.3	Exemplo de um gerador termoelétrico	80
6.4	Proposta do esquema para o gerador termoelétrico	81
6.5	Esquema equivalente do conjunto de baterias	82
6.6	Barramento DC com produção fotovoltaica e ligação à rede	83
6.7	Algoritmo <i>MPPT</i> utilizado	84
6.8	Esquema utilizado	85
6.9	Tensão no barramento quando a bateria se encontra descarregada	86
6.10	Tensão no barramento quando a bateria se encontra a meia carga	86
6.11	Comparação das correntes exigidas pela bateria para diferentes níveis de tensão	87
6.12	Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de carga	87
6.13	Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância	88
6.14	Pormenor da variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância	89
6.15	Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância gradual e carga	89
6.16	Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância e carga	90
6.17	Variação das correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação irradiância no sistema com variação gradual da temperatura no TEG e carga constante	90
6.18	Tensão e corrente à saída do painel fotovoltaico e dos geradores termoelétricos quando sujeitos a variações de carga, aos 2s, e a variações de irradiância, aos 4s	91

Lista de Tabelas

2.1	Resumo dos diferentes tipos de baterias	31
3.1	Valores para o coeficiente de <i>Ross</i> consoante o tipo de instalação	43
3.2	Características mecânicas e elétricas do painel	46
4.1	Coeficientes <i>Seebeck</i> a 0°C de diversos materiais termoelétricos	56
4.2	Coeficientes <i>Seebeck</i> à temperatura ambiente de diversos materiais termoelétricos	57
4.3	Figura de mérito dos principais materiais termoelétricos	59

Abreviaturas e Símbolos

AC	<i>Alternate Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
PMMA	<i>Polymethylmethacrylate</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
STC	<i>Standard Test Condition</i>
TEG	<i>Thermoelectric generator</i>
ZOH	<i>Zero Order Hold</i>
Z	Figura de Mérito
ZT	Figura de Mérito adimensional

Lista de Símbolos

α	Coefficiente de temperatura de I_{SC}
a	Fator de correção de V_{OC}
β	Coefficiente de temperatura de V_{OC}
D	<i>Duty-Cycle</i>
k	Condutividade térmica
k_s	Coefficiente de Ross
K_c e K_v	Fatores de perdas térmicas do painel
π	Coefficiente de Peltier
q	Carga do elétron
ρ	Resistividade elétrica

Capítulo 1

Introdução

Hoje em dia a necessidade de se proceder a uma constante procura de novas formas de produção de energia e a constante procura na otimização das produções já existentes deve-se sobretudo à obrigação de satisfazer uma carga que se encontra a aumentar. Atualmente existe uma grande dependência de combustíveis fósseis como são o caso do carvão, do gás natural e sobretudo do petróleo, para a produção de energia elétrica. Este tipo de produção tem vindo a ser posta em causa não só pela grande quantidade de poluição que produz, mas também por uma velocidade de consumo das suas reservas superior à da reposição destes recursos.

Este tipo de exigências, aliada à forma como se produz e consome energia, levanta questões ambientais que devem ser tidas em conta na maneira em como se pensa as novas formas de produção de energia e de otimização. De facto, tem-se assistido a uma política global em torno da eficiência energética bem como o recurso a fontes de energia renovável com o objetivo, por um lado, de atenuar o aumento de carga e por outro de satisfazer a necessidade energética da sociedade. A aposta nas energias renováveis veio lançar novos desafios à comunidade científica sobretudo no domínio da produção fotovoltaica. O rendimento obtido através da exploração da fonte energética que é o Sol está longe de ser o desejado, deixando, assim, margem de manobra para novas soluções quer ao nível de materiais usados bem como de técnicas de exploração.

A produção solar, nos dias de hoje, é realizada, na sua maioria, com recurso a painéis fotovoltaicos. Existem outros métodos para aproveitar a energia que chega à terra vinda do Sol. Colectores de altas temperaturas que fazem uso de espelhos para concentrar a radiação solar num único ponto, aquecendo água ou gás para, através de turbinas convencionais ou de gás, transformar energia solar em energia elétrica. O recurso a espelhos para concentrar a luz num recetor que pode ser um motor de *Stirling* - consiste em dois compartimentos, a diferentes temperaturas, que aquecem e arrefecem um gás de forma alternada provocando sucessivas contrações e expansões que acionam dois êmbolos ligados a um eixo - ou uma célula fotovoltaica de alta eficiência.

Tendo em conta a grande variedade de formas de produção de energia elétrica através do Sol e aproveitando a energia sobre a forma de calor que é desperdiçada, em diversos aparelhos do dia-a-dia desde painéis fotovoltaicos até sistemas de aquecimento ou motores, é possível melhorar

o rendimento destes mesmos sistemas. Fazendo uso de TEGs, *thermoelectric generators*, que têm por base o efeito de *Seebeck*, é possível retirar um aproveitamento significativo desta energia melhorando, por conseguinte, o rendimento desse mesmo sistema. O uso de TEGs também pode ser usado para sistemas de refrigeração quando se tira partido do efeito de *Peltier*. Sendo uma tecnologia relativamente recente e com um elevado potencial de desenvolvimento a nível de materiais e de soluções para as mais variadas aplicações, os geradores termoelétricos constituem uma área de estudo atrativa e com potencial no que toca à produção de energia elétrica.

O presente trabalho aborda o possível acoplamento dos dispositivos anteriormente referidos a formas de produção de energia já massificadas como os painéis fotovoltaicos. Acoplamento este que poderá satisfazer a necessidade energética e ambiental da sociedade em que vivemos.

1.1 Objectivos

Nesta dissertação pretende-se desenvolver uma proposta que alie a produção fotovoltaica à produção termoelétrica com o recurso a geradores termoelétricos. A junção destas duas formas de produção distintas deve-se ao facto de existir um desperdício sob a forma de calor, nos painéis fotovoltaicos. Os geradores termoelétricos podem, assim, aproveitar uma parte desse calor para produzir energia elétrica.

Desta forma, os principais objetivos são:

1. Estudo do estado da arte relativamente a painéis fotovoltaicos e geradores termoelétricos;
2. Modulação de painel fotovoltaico e do gerador termoelétrico em MATLAB e PSIM;
3. Caracterização e especificação do sistema;
4. Estudo e modulação de um sistema de armazenamento de energia;
5. Desenvolvimento de uma unidade de controlo que englobe os conversores DC-DC e algoritmos *MPPT*;
6. Apresentação de uma proposta de um sistema híbrido PV+TEG;
7. Modulação do sistema no software de simulação PSIM para validação da proposta.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em sete capítulos. Neste primeiro capítulo, para além da estrutura, é também apresentada uma breve introdução e os objetivos.

No capítulo dois, evidencia-se a base teórica da dissertação. Primeiramente é feita uma introdução ao capítulo a que se segue um enquadramento histórico das tecnologias a ser estudadas nesta dissertação, a sua relevância em Portugal e algumas considerações. Seguidamente são abordados os princípios dos sistemas de conversão de energia fotovoltaica e termoelétrica, assim como os

concentradores solares, nomeadamente as lentes de *Fresnel*. Nas secções seguintes são estudados vários tipos de conversores DC-DC assim como o seu controlo e algoritmos de *Maximum Power Point Tracking* que irão permitir uma otimização do sistema proposto. Para concluir é feita uma abordagem às baterias, constituínte importante desta dissertação, e várias formas de proceder à hibridização entre um sistema fotovoltaico e um sistema termoelétrico.

No capítulo três é feita um estudo mais profundo do Sistema Fotovoltaico. Aqui é apresentado o equivalente elétrico do painel fotovoltaico e, demonstrando como este se comporta em diversas condições meteorológicas, tais como: influência da temperatura, da irradiância e do ângulo de incidência. É realizada a implementação deste sistema para validação das equações apresentadas em MATLAB observando a influência da temperatura e da irradiância no comportamento do painel fotovoltaico. Recorre-se a um modelo já definido no PSIM para implementação do painel fotovoltaico e é feita uma comparação entre as duas ferramentas de simulação.

No capítulo quarto é realizado um estudo em pormenor do sistema termoelétrico e dos efeitos que podem ser verificados nele - *Seebeck e Peltier*. É também apresentada a constituição de um TEG e o seu equivalente elétrico. À semelhança do capítulo anterior é elaborado um modelo do gerador termoelétrico tanto em MATLAB como em PSIM.

No capítulo quinto é abordado o conversor DC-DC utilizado, assim como o seu controlo. É realizado o dimensionamento do mesmo e analisada a sua resposta em frequência. Por fim, é feito um estudo sobre o tipo de controlo a ser utilizado tendo em atenção o algoritmo *MPPT*.

No capítulo sexto é mostrada a proposta de arquitetura do sistema e a sua implementação em PSIM. São analisados os resultados para diferentes condições de variação de carga e de irradiância e a respetiva resposta do sistema.

No capítulo sétimo são apresentadas as conclusões da dissertação assim como possíveis trabalhos e desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo vai ser relatada a pesquisa bibliográfica efetuada. Na redação vão ser introduzidas algumas notas históricas referentes à evolução da tecnologia incidindo nos acontecimentos históricos relevantes que impulsionaram os grandes desenvolvimentos, dados técnicos sobre alguns aspetos considerados significativos, algumas considerações, e os avanços recentes nas tecnologias fotovoltaicas e termoeletricas, importância no seu desenvolvimento, exemplos ilustrados de métodos de aplicação e aspetos técnicos associados a cada configuração apresentada. São também abordados aspetos práticos do sistema como a inclusão de conversores DC-DC, algoritmos *MPPT* e o armazenamento de energia.

2.1 Enquadramento

O aproveitamento do sol como fonte de energia tem vindo a ser alvo de estudo há mais de um século. Alexandre-Edmond Becquerel, famoso físico francês que se dedicou ao estudo do espectro solar, do magnetismo e da eletricidade descobriu em 1839 o princípio de funcionamento da célula solar. Efeito este comumente conhecido como "*photovoltaic effect*" é também conhecido como "*Becquerel Effect*" [1]. Desde então esta nova área da produção de energia tinha sido levemente estudada e investigada pois os avanços lentos na engenharia de materiais não permitiram que se explorassem estas novas oportunidades.

Contudo entre 1957 e 1975, durante a Corrida Espacial, o efeito fotovoltaico ganhou uma nova força com novos desenvolvimentos na primeira década desta "época espacial". Os recentes avanços na investigação de novos materiais foram preponderantes para uma melhoria da eficiência, na redução de custos, no aumento da potência por unidade e sobretudo na fiabilidade destas células. A célula solar tinha também, à época, demonstrado uma grande aptidão para situações de temperaturas extremas tendo sido uma excelente opção para trabalhar no espaço [2].

Nesta época a grande prosperidade dos combustíveis fósseis vinha a ganhar força e portanto esta opção de produção de energia era descartada devido à necessidade de existir ainda mais investigação nesta área para que a tecnologia fosse rentável para aplicações de menor magnitude. Porém A. Smith, em 1969, já previa que esta seria uma excelente alternativa caso a tecnologia se

tornasse rentável e a situação económica mundial tivesse uma mudança. Os recentes avanços na engenharia de materiais e o abuso dos combustíveis fósseis vieram, já no século XXI, levantar uma questão importantíssima: a sustentabilidade. A sustentabilidade define-se, segundo o Oxford Dictionary, como a conservação de um equilíbrio ecológico sem que se esgotem os recursos naturais de maneira a preservar o futuro das próximas gerações.

Com a crescente diminuição das reservas dos chamados "combustíveis fósseis" que incluem fundamentalmente o petróleo, o gás e o carvão, com o aumento das preocupações ambientalistas em torno da camada do ozono e do efeito de estufa, com a instabilidade política nos países produtores de petróleo e com a escalada dos preços destes combustíveis tornou-se imperativa a exploração de recursos existentes que até então tinham vindo a ser subestimados. Estes são os chamados "recursos renováveis" que são essencialmente o vento, o sol e a água.

Em Portugal, no ano de 2012, estes recursos tomaram uma grande importância no diagrama de cargas tendo sido capazes de produzir cerca de 37% de todo o consumo realizado. A produção de eólica atingiu a quota mais elevada de sempre com 20%, as hídricas com 11% e as outras renováveis 6% [3]. Esta constante evolução que se fez sentir na produção de energias renováveis, tanto em Portugal como no Mundo, torna estes recursos como uma das principais fontes de energia num futuro próximo.

Os painéis fotovoltaicos, apesar da sua ainda fraca exploração e massificação, são cada vez mais utilizados para micro-geração em habitações familiares e são utilizados como um complemento à eficiência energética em cada vez mais prédios e indústrias. A sua fácil instalação, sem recorrer a grandes conhecimentos técnicos, o seu custo cada vez mais baixo e a rápida rentabilização desta tecnologia é motivo de grande interesse e apoio por parte dos governos um pouco por todo o mundo. A constante evolução e a cada vez maior investigação que tem vindo a ser realizada no campo dos nano-materiais tem permitido grandes avanços nos painéis fotovoltaicos. A diminuição do peso, a flexibilidade que têm vindo a adquirir e o aumento do rendimento são algumas das vantagens deste tipo de geração que são cada vez mais apreciadas.

Este tipo de produção ainda incorpora grandes inconvenientes. A necessidade de grandes áreas para a geração de uma quantidade apreciável de energia, a absorção de apenas uma zona restrita do espectro solar [4], que resulta num aquecimento exagerado e a consequente diminuição do rendimento, e o facto de a maior parte destes painéis terem uma base de instalação fixa que não permite uma otimização da incidência da luz solar ao longo de todo o dia, constituem os principais inconvenientes desta tecnologia. Contudo, os principais obstáculos à massificação dos painéis fotovoltaicos ainda se prendem com os elevados custos e a baixa eficiência [5].

2.2 Princípio dos Sistemas de Conversão de Energia Fotovoltaica

Os painéis fotovoltaicos são dispositivos que utilizam a energia da luz do Sol para produzir energia elétrica. Este tipo de painéis são compostos por módulos de células solares que podem ser de diferentes materiais semicondutores como o silício, o arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre. Atualmente o semicondutor mais utilizado para a produção de células

solares é o silício. Isto deve-se, em grande parte, ao acesso quase ilimitado que se tem a este recurso, a areia de sílica. [6].

Os módulos fotovoltaicos, como referidos anteriormente, convertem a energia solar em eletricidade. Esta conversão acontece nos materiais semicondutores sujeitos a uma radiação luminosa. Esta energia é transferida para os elétrons de valência do gás inerte estável de 6 elétrons que se formou a partir da junção dos 4 elétrons de valência do átomo de silício com dois elétrons de átomos vizinhos. A influência da luz solar quebra, então, a ligação dos elétrons dando-se a libertação de um elétron deixando uma lacuna no retículo cristalino. Porém, este efeito denominado auto-condução, não é suficiente para gerar energia. Para tal "contamina-se" o retículo cristalino com átomos impuros que possuem um elétron a mais (impureza p), o fósforo, ou com um elétron a menos (impureza n), o boro, do que o número de elétrons do silício na camada de valência. Quando se juntam as camadas de semicondutores *p* e *n*, produz-se uma região de transição *pn* que leva à difusão dos elétrons do semiconductor *n* para o semiconductor *p* na junção. É criada uma barreira de potencial. Quando uma célula solar é exposta à luz, os fótons são absorvidos pelos elétrons quebrando-se a ligação entre estes. Os elétrons libertados são conduzidos para a área *n*. Este processo denomina-se efeito fotovoltaico [6, 7].

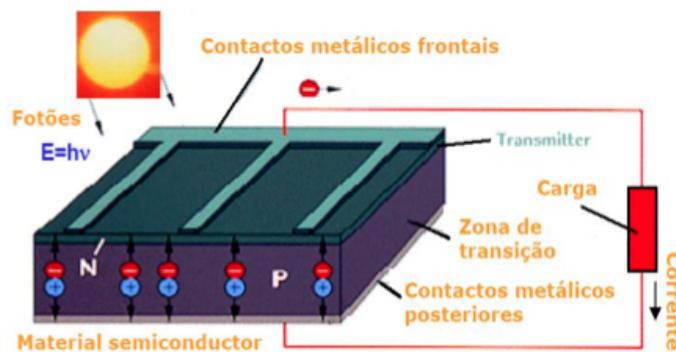


Figura 2.1: Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica [7]

Por forma a aumentar a resistência mecânica e a obtenção de valores adequados de tensão são utilizadas ligações, entre módulos, em série ou em paralelo consoante a finalidade. Quando os módulos são associados em série, perfazem as denominadas fileiras. Este tipo de interligação permite que a tensão de entrada no barramento contínuo seja a soma das tensões de cada módulo. Por outro lado, a interligação em paralelo permite que se obtenham valores de corrente mais elevados. Este tipo de configuração é mais utilizado quando se pretende um sistema autónomo. Para a ligação de um painel à rede, é conveniente que se utilize um sistema misto de interligações entre módulos fotovoltaicos por forma a aumentar a potência entregue à rede.

Um painel fotovoltaico, como referido anteriormente, é um gerador elétrico capaz de transformar a radiação solar em energia elétrica. As suas características estão representadas na Fig. 2.2.

Como o principal objetivo dos painéis fotovoltaicos é fornecer o máximo de energia possível, logo é essencial que este trabalhe num ponto, na Fig. 2.2 (U_{mpp}, i_{mpp}), que forneça a potência

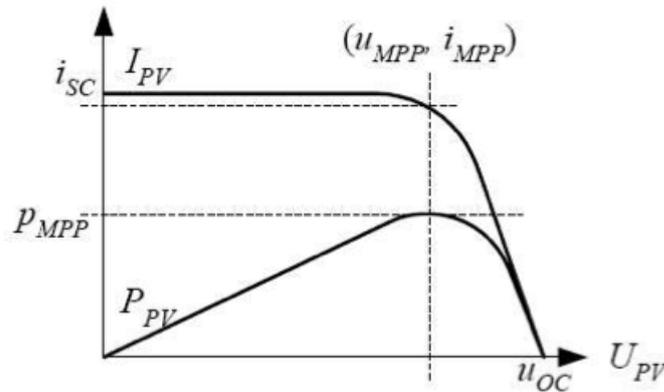


Figura 2.2: Características de um painel fotovoltaico [8]

máxima, tal como será explicado oportunamente. O painel fotovoltaico, devido à sua baixa tensão de saída, necessitará de um conversor DC-DC, para elevar o seu nível de tensão para valores aceitáveis antes de ser entregue à rede por meio de um inversor, tal como pode ser visto no esquema da Fig. 2.3

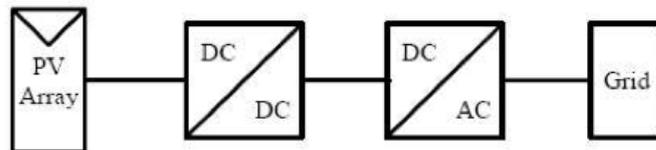


Figura 2.3: Sistema de conversão de energia fotovoltaica desde o painel até à rede [8]

O conversor DC-DC tem dois objetivos principais: controlar o painel fotovoltaico para fornecer o máximo de potência através de um algoritmo MPPT - ver secção 2.6 - e elevar o nível de tensão do painel para que possa ser modelado, posteriormente, pelo conversor DC-AC.

2.2.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos, dependendo do tipo de utilização, dividem-se em dois grandes grupos: os sistemas isolados e sistemas ligados à rede elétrica [7].

Nos sistemas isolados existem os sistemas autónomos que, como o próprio nome indica, dependem apenas da energia solar para responder às exigências do consumo. Normalmente são associadas baterias por forma a armazenar energia para ser entregue à carga nos períodos onde não existe exposição solar, principalmente à noite e durante dias nublados. Este tipo de sistemas pode também ser utilizado para outras aplicações como o bombeamento de água em centrais de bombagem. Existem também sistemas híbridos que têm o mesmo princípio de funcionamento só que com a vantagem de ter uma segunda fonte de energia que permite o fornecimento contínuo de energia à carga.

Nos sistemas ligados à rede elétrica toda a energia produzida é encaminhada para as necessidades energéticas, tanto no caso da micro-geração como nas centrais solares, e o excedente é entregue à rede. Muitos destes sistemas possuem um dispositivo que permite seguir o Sol por forma a otimizar a potência total entregue à rede. São normalmente utilizados na micro-geração e nas centrais solares podendo ocupar grandes áreas.

Tanto os sistemas isolados como os ligados à rede elétrica vêm acentuar a tendência dos grandes centros de produção, deslocalizando a produção para junto da carga. Esta tendência é positiva do ponto de vista da rede elétrica pois permite aliviar a capacidade das linhas de transmissão e evita também os custos associados ao transporte e gestão de energia do sistema. Porém têm também algumas desvantagens pois é necessário utilizar um conversor DC-AC, ou seja, um inversor. Todavia, recentemente, têm vindo a ser estudadas formas de interligação a barramentos contínuos assim como a transmissão em corrente contínua sendo, por isso, a necessidade de uma grande quantidade de inversores cada vez menos significativa.

É de salientar que o estudo da implementação de um qualquer tipo de sistema que recorra à tecnologia fotovoltaica deve ter em conta a localização, a finalidade e sobretudo as condições de irradiância e de vento.

2.3 Princípio dos Sistemas de Conversão de Energia Termoelétrica

No que concerne à produção termoelétrica ainda existe um vasto caminho a ser explorado. Este tipo de aplicação surge comumente associado ao aquecimento de água através da luz solar. Uma das aplicações que tem tido uma grande aceitação por parte dos pequenos consumidores são os coletores solares. Estes coletores solares permitem, de uma forma simples, aquecer água. São relativamente baratos e de fácil instalação e permitem uma redução significativa na fatura da eletricidade ou gás assim como proporcionam um retorno bastante rápido. Porém esta tecnologia já vem sendo há muito utilizada pelas centrais ditas clássicas. As centrais a carvão, gás e de ciclo combinado já fazem uso deste princípio simples - aquecer a água até esta evaporar e acionar uma turbina.

Contudo uma nova geração de módulos termoelétricos tem vindo a surgir à medida que a engenharia dos materiais progride. Novas formas de produzir energia devido às diferenças de temperatura têm vindo a emergir e a serem alvo de grande atenção por parte da comunidade internacional.

Existem diversos fatores que devem ser tidos em conta na modelização de um gerador termoelétrico como por exemplo a condução, o efeito de *Joule*, o efeito de *Peltier*, o efeito de *Seebeck* e ainda o efeito de *Thomson*. Porém, neste estudo, para melhor compreender estes dispositivos torna-se essencial analisar os fenómenos mais relevantes associados a esta tecnologia como é o caso do efeito de *Seebeck* 4.1 e o efeito de *Peltier* 4.2.

Um gerador termoelétrico tem como princípio de funcionamento a diferença de temperatura. Quando sujeito a uma diferença de temperatura verifica-se que este produz uma diferença de potencial elétrico e por conseguinte um fluxo de corrente elétrica quando o circuito se encontra

fechado. Este fenômeno é denominado como efeito de *Seebeck* e o princípio de funcionamento bem como as características deste sistema vão ser estudadas em mais detalhe no capítulo 4. Como a tensão produzida por este gerador também é relativamente baixa, também necessitará de um conversor DC-DC na sua saída tanto para encontrar o seu ponto de funcionamento máximo como para elevar o seu nível de tensão. Poderá ser necessário associar vários geradores termoelétricos por forma a satisfazer as necessidades do conversor.

2.4 Concentradores Solares

Historicamente, a produção de eletricidade a partir de dispositivos termoelétricos sempre se prendeu com o uso de recuperadores de calor e com a exploração espacial. Sendo o Sol um importante recurso energético pode, se bem aproveitado, constituir um recurso energético bastante importante no futuro. Todavia, o baixo rendimento dos dispositivos termoelétricos e a sazonalidade são fatores decisivos para uma menor aposta nesta área. Este problema pode ser ultrapassado com recurso à exploração de técnicas de concentração da energia solar.

Neste campo, as lentes de *Fresnel* assumiram particular destaque uma vez que possuem diversas vantagens como o pequeno volume, leveza, produção em massa de baixo custo e um efetivo aumento da densidade de energia [9]. Atualmente o recurso a polímeros, *PMMA - polymethylmethacrylate*, permite uma redução significativa dos custos de produção assim como de peso, atingindo características semelhantes às do vidro. Este tipo de técnica sempre despoletou grande interesse nomeadamente para uniformização da radiação em painéis fotovoltaicos. Contudo o recurso a este tipo de concentradores faz aumentar a temperatura do painel baixando o seu rendimento e o seu período de vida útil.

Assim, neste projeto, recorre-se às lentes de *Fresnel* para aumentar a radiação incidente no gerador termoelétrico por forma a atingir maiores diferenças de temperatura e, conseqüentemente, maior potência de saída. Uma lente de *Fresnel*, é constituída por uma série de pequenos prismas. Quando a radiação solar atinge estes primas é refletida para um ponto específico. Como pode ser observado na Fig. 2.4 é possível verificar as vantagens destas lentes face às lentes convencionais.

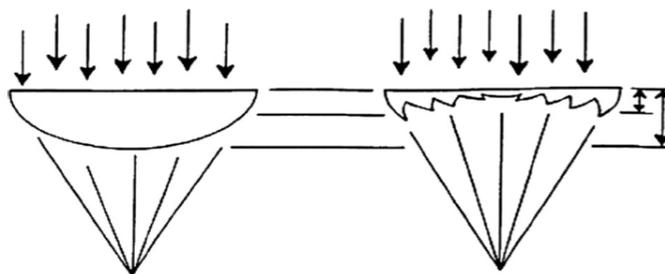


Figura 2.4: Lente convencional à esquerda e a lente de *Fresnel* à direita [9]

As lentes de *Fresnel* possuem alguns inconvenientes como alguma dispersão do foco num ponto específico, devido à refração dos prismas que constituem a lente, porém possuem um baixo

fator de reflexão ≈ 0.1 . Em simulações realizadas por *Hulin Huang et al*, [10], foi possível atingir um nível de irradiância, no ponto de focagem, de aproximadamente $110kW/m^2$ (Com $S = 850W/m^2$ incidente na lente), que correspondem a um rácio de concentração de aproximadamente 120 S (*Suns*). Na prática, o recetor e a focagem da lente podem ser ajustados para que se obtenha um rácio de concentração adequado à aplicação. À semelhança do que sucede com os painéis fotovoltaicos, um sistema de seguimento do sol é, também, recomendado.

Existem também outros tipos de lentes e métodos de concentração como o recurso à refração da luz na água [11], contudo as lentes *Fresnel* são as mais utilizadas, estudadas e as que apresentam mais vantagens diretas.

2.5 Conversores DC-DC

Os conversores DC-DC são amplamente utilizados como forma de regularizar uma determinada tensão. Isto é, normalmente na entrada dos conversores está presente uma tensão variável e o conversor tem como objetivo retificar esta tensão apresentando à saída uma tensão regulada e num determinado valor desejado. Esta conversão é feita através da comutação de sinal que controla o interruptor de potência - transístores (MOSFETs e IGBTs)- e de elementos passivos como as bobinas e condensadores.

Os conversores DC-DC são um elemento importante em qualquer sistema produtor de energia como os painéis fotovoltaicos e os geradores termoelétricos pois, constituem, uma parte não desprezável das perdas destes sistemas. Este tipo de conversores divide-se em dois grandes grupos: isolados e não-isolados. Nesta secção apenas serão abordados os conversores não-isolados, tais como os step-down ou buck, step-up ou boost e step-up/down ou buck boost, pois estes permitem obter o conhecimento adequado ao desenvolvimento de um sistema de conversão *single-stage* como pretendido.

2.5.1 Controlo de conversores DC-DC

Os conversores DC-DC têm como principal objetivo controlar a tensão média de saída. Esta tensão deve ser controlada por forma a atingir um determinado valor desejado, tendo em conta que a tensão de entrada e a tensão de saída podem variar. Os conversores, para aumentar ou diminuir a tensão de um nível para o outro, utilizam comutações por meio de interruptores. Desta forma é possível controlar a tensão de saída, atendendo a uma dada corrente e tensão de entrada, através da duração em que o interruptor se encontra desligado, t_{off} , e ligado, t_{on} .

Um dos métodos para controlar a tensão de saída passa por efetuar uma comutação a frequência constante, ajustando o tempo de duração t_{on} do interruptor, para controlar a tensão média de saída, V_O na Fig. 2.5. Este método denomina-se Modulação por Largura de Pulso - PWM (*Pulse Width Modulation*) [12]. A constante do período de tempo de comutação é representada por T_s ,

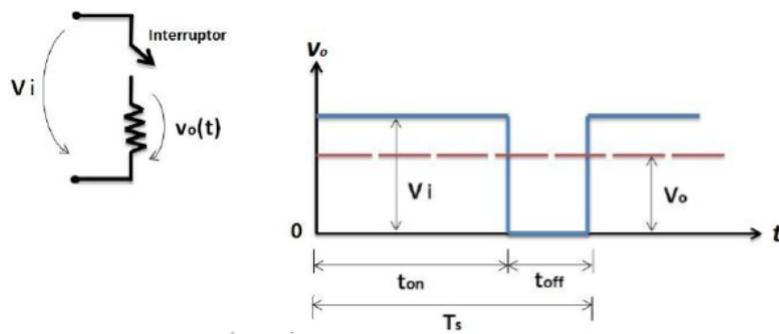


Figura 2.5: Princípio básico do controlo dos conversores DC-DC [12, 13]

sendo ajustada a tensão média de saída (V_o) através do tempo de duração t_{on} do interruptor de potência.

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (2.1)$$

A tensão média na saída de um conversor é então calculada por:

$$V_O = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.2)$$

No método PWM, o sinal de controlo do estado do interruptor de potência é gerado através da comparação de uma tensão de controlo, $V_{control}$, com uma forma de onda repetitiva, normalmente uma onda dente de serra.

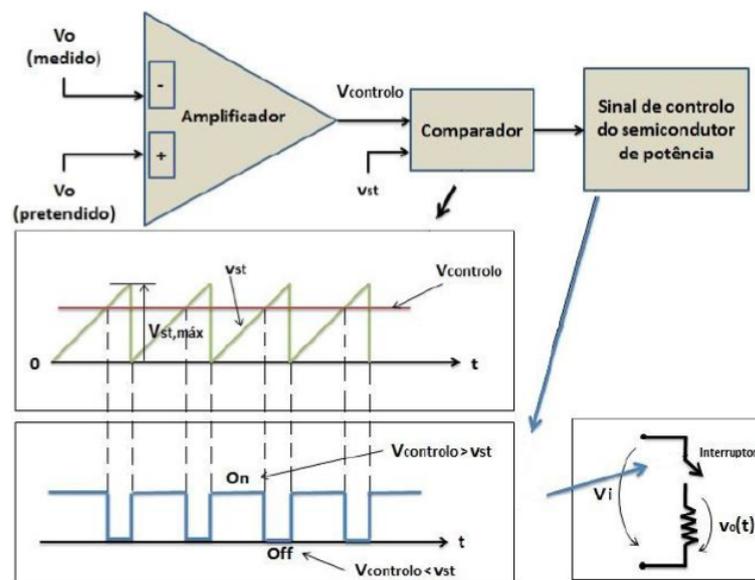


Figura 2.6: Diagrama de blocos e formas de onda do controlo por PWM [12, 13]

O sinal da tensão de controlo é geralmente obtido através da amplificação do erro, ou pela diferença entre um valor desejado e o valor atual da tensão. A frequência da onda dente de serra, normalmente na gama dos kHz , estabelece a frequência de comutação. Quando a amplificação do sinal do erro ou a diferença entre uma determinada tensão de referência e a tensão atual é superior à onda dente de serra, o sinal de controlo do interruptor passa para um valor elevado. Este aumento provoca um aumento do estado *on* (ligado) do interruptor de potência. Em sentido inverso, o interruptor de potência fica *off* (desligado), durante mais tempo. O *duty-cycle* é expresso através da razão entre $V_{controlo}$ e o valor de pico da onda dente de serra ($V_{st,max}$).

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{controlo}}{V_{st,max}} \quad (2.3)$$

2.5.2 Step-Down ou Buck

O conversor *step-down*, como o próprio nome indica, é um conversor DC-DC baixador de tensão. Proporciona assim, à saída, um valor de tensão igual ou inferior ao de entrada.

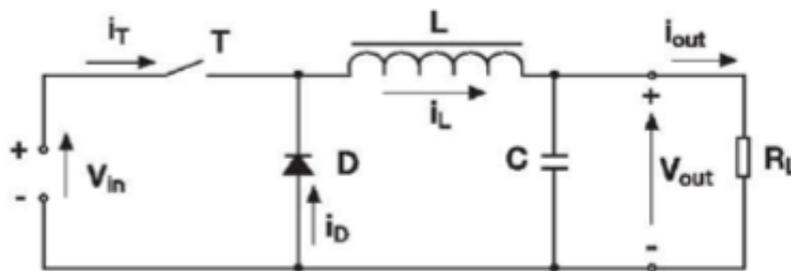


Figura 2.7: Conversor DC-DC *Step-Down* [8, 12]

Fazendo uma análise breve ao esquema elétrico apresentado verifica-se que o princípio de funcionamento deste conversor está no armazenamento e descarga de energia na bobina L . Este processo é controlado pelo *duty-cycle* do sinal PWM aplicado ao interruptor de potência.

Quando o transistor está ligado, o diódo fica inversamente polarizado isolando, assim, a saída. A entrada fornece, então, energia para o indutor. Quando o transistor está fechado a saída recebe energia do indutor e da entrada simultaneamente.

Como em regime estacionário, e em condução contínua, o valor médio da tensão da bobina L , durante um período, deve ser nulo, a função de transferência, associada a este conversor, é [12]:

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (2.4)$$

Então,

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.5)$$

Como o *duty-cycle* representa uma variável que varia entre 0 e 1 conclui-se que a tensão de saída, V_o , é superior à tensão de entrada, V_i , como esperado neste tipo de conversor.

O conversor *Buck* pode atuar em três modos de operação:

- Condução Contínua - A corrente no indutor flui continuamente durante um período de comutação ($i_L(t) > 0$), Fig. 2.8a;
- Condução Descontínua - A corrente no indutor anula-se a cada período de comutação, Fig. 2.8b;
- Condução Crítica - A corrente no indutor vai para zero no fim de cada período.

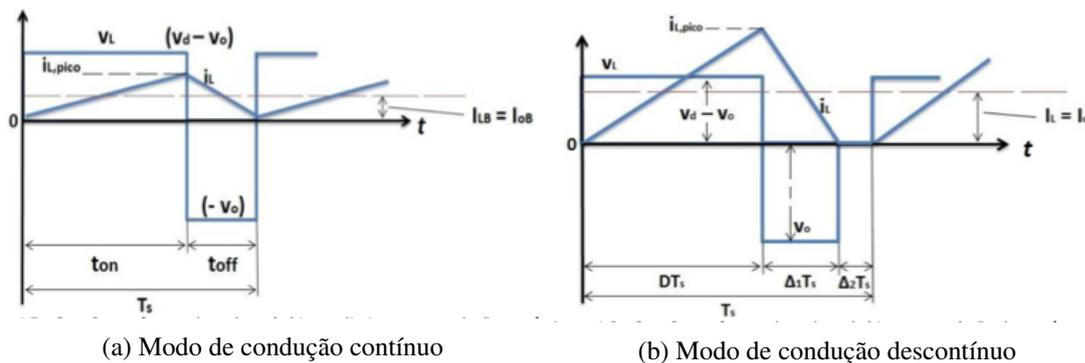


Figura 2.8: Formas de onda de corrente e tensão na bobina em condução contínua (a) e em condução descontínua (b) do conversor *Buck* [12, 13].

2.5.3 Step-Up ou Boost

O conversor *step-up*, como o próprio nome indica, é um conversor DC-DC elevador de tensão. Proporciona à saída, assim, um valor de tensão igual ou superior ao de entrada.

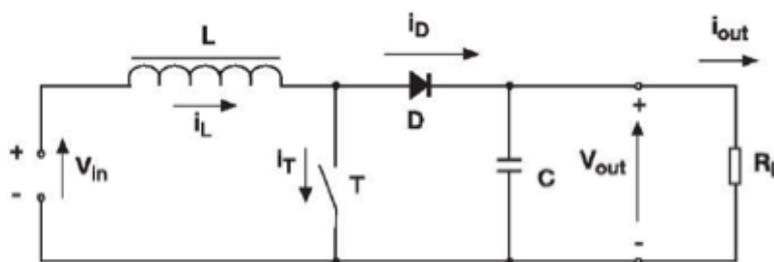


Figura 2.9: Conversor DC-DC *Step-Up* [8, 12]

Fazendo uma análise breve, ao esquema elétrico apresentado na Fig. 2.9 verifica-se que o princípio de funcionamento deste conversor está no armazenamento e descarga de energia na bobina L , à semelhança do conversor DC-DC analisado anteriormente. Este processo é controlado pelo *duty-cycle* do sinal PWM aplicado ao interruptor de potência. A bobina, enquanto está a carregar, atua como se de uma carga se tratasse e absorve energia. Por outro lado, quando está a descarregar, funciona como uma fonte de energia.

2.5.3.1 Condução Contínua

- Estado *on*

Quando o interruptor de potência se encontra no estado *on*, o diodo encontra-se inversamente polarizado e portanto não conduz. Esta situação permite que a corrente que atravessa a bobina aumente enquanto o condensador alimenta a carga.

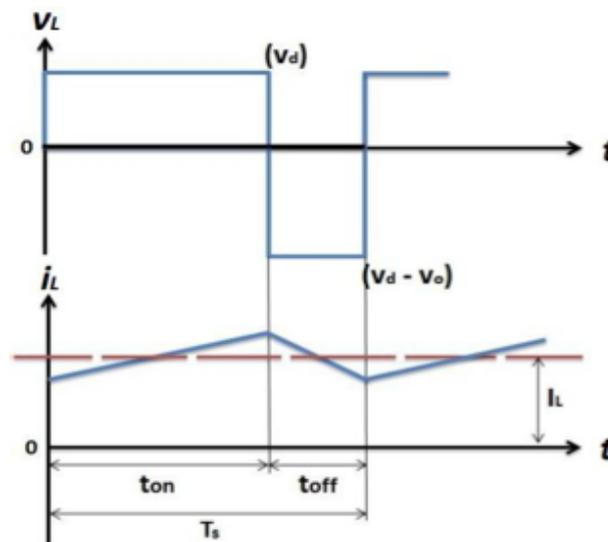


Figura 2.10: Formas de onda, em condução contínua, da tensão e da corrente na bobina do Conversor DC-DC *Step-Up* [12, 13]

Como visto anteriormente, a tensão de saída, V_o , é controlada através do tempo $t_{on} = DT_s$. A taxa de crescimento da corrente na bobina depende tanto da tensão fornecida pela fonte de alimentação como do valor da indutância. Com o interruptor no estado *on*, aparece uma tensão aos terminais da bobina provocando, portanto, uma corrente na bobina durante esse intervalo de tempo. O aumento de corrente na bobina é expresso como:

$$\Delta I_L = \frac{V_i}{L} DT_s \quad (2.6)$$

A tensão na bobina tem um comportamento descrito pela seguinte equação:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.7)$$

Como se pode ver na Fig. 2.10, verifica-se que quando o interruptor de potência está ligado, existe uma tensão aos terminais do indutor que provoca um aumento da corrente na bobina.

- Estado *off*

Quando o interruptor de potência se encontra no estado *off*, o diodo encontra-se a conduzir. Desta forma, a bobina transfere energia para o condensador e para a carga, assim como a fonte de alimentação. A tensão de saída mantém-se constante $v_o(t) \approx V_o$ enquanto a constante de tempo (RC) for

muito maior que o tempo em que o interruptor de potência está no estado *on*. O transistor, neste estado, apresenta uma impedância elevadíssima aos seus terminais fazendo com que a corrente comece a fluir através do díodo até à carga. A tensão aos terminais, neste momento, da bobina é:

$$V_L = V_i - V_o \quad (2.8)$$

Sendo a tensão de saída superior à tensão de entrada, a tensão nos terminais da bobina assume um valor negativo. Como consequência a taxa de crescimento da corrente que a percorre é também negativa e descrita pela equação:

$$\Delta i_L = \frac{V_i - V_o}{L} (1 - D) T_s \quad (2.9)$$

Esta situação pode ser também verificada na Fig. 2.10.

Em regime permanente, a quantidade de energia armazenada em cada um dos seus componentes, ao fim de um ciclo de comutação, tem que ser igual. Portanto, ao fim de um período de tempo, o valor médio de V_L é nulo,

$$V_{i(on)} + (V_i - V_o)t_{off} = 0 \quad (2.10)$$

Então, e como a variação da corrente na bobina ao fim de um ciclo é nula, dividindo ambos os termos por T_s tem-se que:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.11)$$

Como o valor do *duty-cycle* assume valores compreendidos entre 0 e 1, a tensão de saída adota valores iguais ou superiores à tensão de entrada. Sendo um circuito sem perdas, $P_i = P_o$, portanto $V_i I_i = V_o I_o$ a relação entre a corrente de entrada e a corrente de saída é determinada por,

$$\frac{I_o}{I_i} = 1 - D \quad (2.12)$$

2.5.3.2 Limiar entre Condução Contínua e Descontínua

Por definição, neste modo, a corrente i_L vai a zero no fim de um intervalo de tempo.

O valor médio da corrente no indutor neste ponto de funcionamento é:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,pico} = \frac{1}{2} \frac{V_d}{L} t_{on} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D) \quad (2.13)$$

Como num conversor *Step-Up*, a corrente do indutor e a corrente de entrada assumem o mesmo valor, usando as equações 2.13 e 2.12, a corrente média no limiar da condução contínua é:

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D)^2 \quad (2.14)$$

Sabendo que a maior parte das aplicações requer que o conversor *Step-Up* mantenha o valor da tensão de saída constante, pode-se representar I_{oB} como uma função do *duty-cycle*.

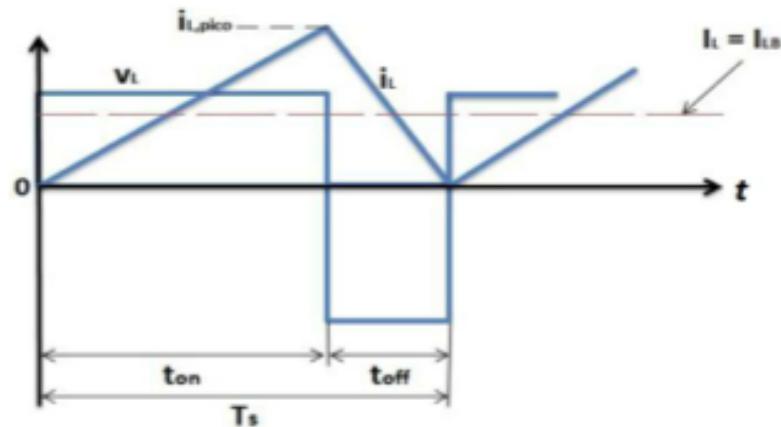


Figura 2.11: Formas de onda, no limiar entre a condução contínua e descontínua, da tensão e da corrente na bobina do Conversor DC-DC *Step-Up* [12, 13]

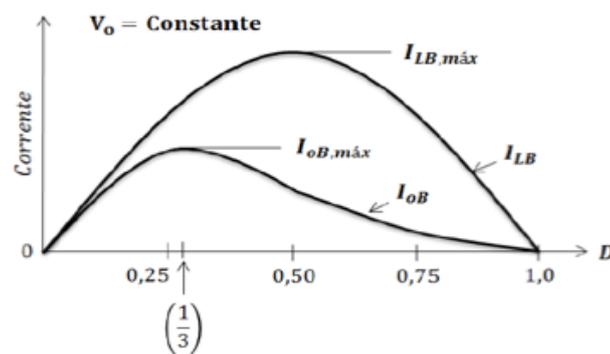


Figura 2.12: *Step-Up*, I_{LB} e I_{oB} como função do *duty-cycle* no limiar da condução contínua [12, 13]

Da Fig. 2.12, verifica-se que I_{LB} atinge o valor máximo para $D = 0,5$,

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{8L} \quad (2.15)$$

Também I_{oB} atinge o seu valor máximo para $D = 1/3$,

$$I_{oB,max} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_o}{L} \quad (2.16)$$

Assim, os valores máximos de I_{LB} e I_{oB} podem ser expressos como:

$$I_{LB} = 4D(1 - D)I_{LB,max} \quad (2.17)$$

$$I_{LB} = \frac{27}{4} D(1 - D)^2 I_{oB,max} \quad (2.18)$$

Pela Fig. 2.12, para um dado D com V_o constante, se a corrente média na carga descer abaixo de I_{oB} , e por consequência abaixo de I_{LB} , a condução de corrente será descontínua.

2.5.3.3 Condução Descontínua

O modo de condução descontínua ocorre quando existe uma redução da potência de saída e, por conseguinte, uma diminuição de $i_L (= I_i)$ para uma tensão de entrada constante. Por outras palavras, isto significa que a quantidade de energia requerida pela carga foi transferida num tempo inferior a um ciclo de comutação.

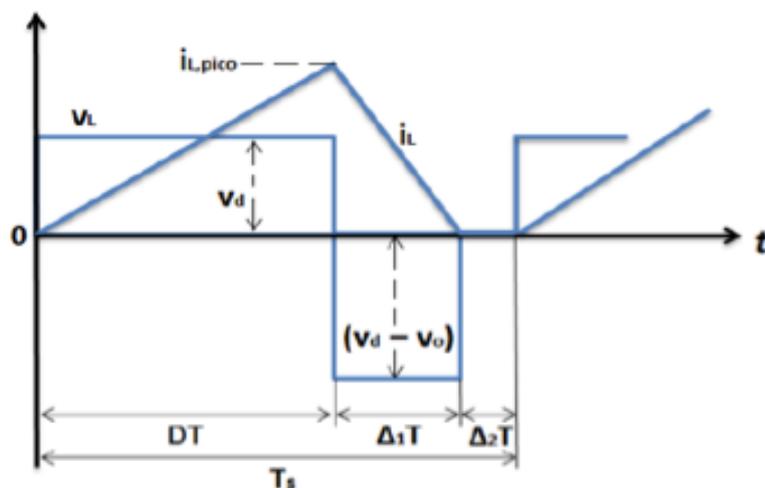


Figura 2.13: Formas de onda, em condução descontínua, da tensão e da corrente na bobina do Conversor DC-DC *Step-Up* [12, 13]

A condução descontínua pode ocorrer, também, em situações cuja frequência de comutação diminui ou em que o *duty-cycle* diminui ou ainda em situações onde a indutância da bobina assume valores demasiado baixos para o circuito em causa.

Pela análise da Fig. 2.13 verifica-se que, quando em condução descontínua, a tensão aos terminais da bobina assume o valor zero durante um determinado período do ciclo de comutação. Isto significa que a bobina descarregou toda a sua energia antes do *terminus* de um ciclo de comutação.

A tensão na bobina durante um ciclo de comutação, por análise da Fig. 2.13, é:

$$V_i DT_s + (V_i - V_o) \Delta_1 T_s = 0 \quad (2.19)$$

Como

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (2.20)$$

Tendo em conta que $P_i = P_o$,

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad (2.21)$$

Da Fig. 2.13 a corrente média de entrada, que é igual à corrente na bobina é:

$$I_i = \frac{V_i}{2L} DT_s (D + \Delta_1) \quad (2.22)$$

Aplicando as equações anteriores,

$$I_o = \frac{T_s V_i}{2L} D \Delta_1 \quad (2.23)$$

Na prática e uma vez que o valor da tensão de saída é constante e que o valor do *duty-cycle* varia com a tensão de entrada, então, torna-se mais prático, obter o valor do *duty-cycle* como uma função da corrente para os diversos valores de V_o/V_i ,

$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_i} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

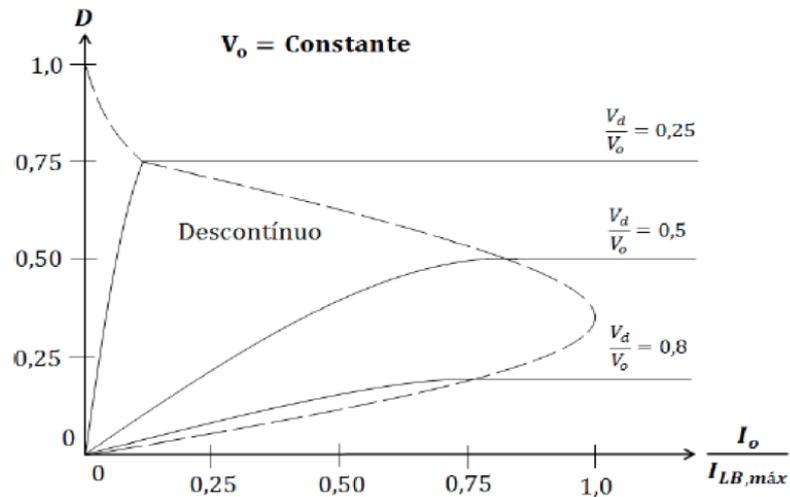


Figura 2.14: Característica do conversor *Step-Up* mantendo V_o constante [12, 13]

No modo de condução descontínua, se a tensão de saída não for controlada durante cada ciclo de comutação, a energia transferida para a saída pode ser expressa como,

$$\frac{L}{2} i_{L,pico}^2 = \frac{(V_i DT_s)^2}{2L} \quad (2.25)$$

Se a carga não for capaz de absorver esta energia a tensão de saída irá aumentar até se atingir um equilíbrio energético. Em sentido inverso, o aumento da tensão de saída pode causar problemas no condensador de saída podendo mesmo ocorrer altas tensões.

Tensão de Ripple na Saída

A tensão de ripple na saída pode ser calculada através das formas de onda presentes na Fig. 2.15.

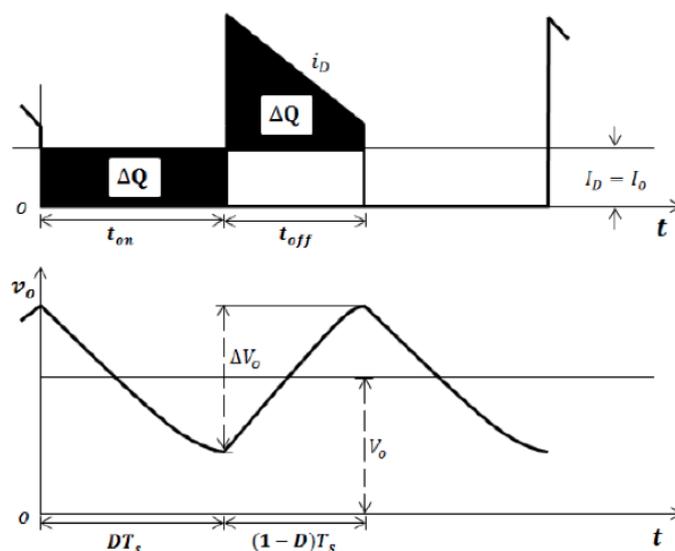


Figura 2.15: Tensão de ripple na saída de um conversor DC-DC *Step-up* [12]

Quando o interruptor se encontra no estado *on*, o circuito fica dividido em duas malhas. Desta forma o condensador descarrega parte da sua energia para a carga, sustentando, desta forma, a tensão de saída. Quando o interruptor se encontra no estado *off*, o condensador é carregado pela bobina. Esta, para que tal aconteça, fornece um valor normalmente superior à corrente requerida pela carga. Assim, as áreas correspondentes à carga e descarga do condensador, que assume a tensão de saída do conversor, são representadas por ΔQ . Quando o valor da corrente que flui através do díodo, que é igual à corrente de entrada, possui o valor zero, o condensador descarrega parte da sua energia. No sentido contrário o condensador é carregado.

Desta forma a tensão pico-a-pico de ripple é dada por,

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_0 D T_s}{C} \quad (2.26)$$

Assumindo constante a corrente de saída

$$\Delta V_o = \frac{V_o}{R} \frac{V_o T_s}{C} \quad (2.27)$$

Para o modo de condução descontínuo pode-se fazer uma análise semelhante.

Cálculo da indutância crítica

Como visto anteriormente, é necessário que a bobina possua um valor de indutância capaz de suportar os requisitos do conversor por forma a manter um modo de funcionamento contínuo. Para tal é necessário saber o valor da indutância L que permite que o circuito forneça a corrente mínima sem que esta se torne descontínua. Relembrando da secção 2.5.3.2 que o valor da indutância L_{min} da bobina deve ser dimensionado por forma a que a corrente $I_{oB,min}$, não se torne descontínua,

funcionando assim em modo de condução contínua. Sendo,

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_o dt \quad (2.28)$$

O valor da indutância para que o conversor esteja num estado de condução contínua é representado por,

$$L_{min} \geq \frac{V_o T_s}{2I_{oB,min}} D(1-D)^2 = \frac{V_i T_s}{2I_{LB,min}} \quad (2.29)$$

Cálculo da Capacidade Crítica

O condensador de saída do conversor deve garantir que a tensão de saída varia dentro dos limites pretendidos. A sua forma de onda de tensão, assim como perfil de carga e descarga, podem ser vistos na Fig. 2.15. Desta forma o condensador deve assegurar que durante o tempo em que o interruptor está *on* e para a corrente nominal (carga máxima) este fornece energia suficiente para alimentar a carga.

Durante este período de tempo, e sendo que a corrente no condensador se comporta desta forma, $i_c = C \frac{dv}{dt}$, é possível calcular a capacidade mínima do condensador através de,

$$C_{min} \geq \frac{I_{o,max} D T_s}{\Delta V_o} \quad (2.30)$$

Efeito dos elementos parasitas

Este tipo de efeitos deve-se às perdas associadas à bobina, ao condensador, ao interruptor e ao diodo. Como se pode observar na Fig. 2.16, na prática V_o/V_i decai à medida que o rácio do *duty-cycle* se aproxima da unidade. Estes elementos parasitas podem ser eliminados em análises simplistas deste tipo de conversores mas podem ser integrados na simulação dos circuitos com recurso a *software* indicado.

2.5.4 Conversor Step-Up/Down ou Buck-Boost

Este tipo de conversor permite gerar uma tensão à saída cujo valor pode ser superior ou inferior ao valor de entrada. Este conversor pode ser obtido com uma ligação em cascata de dois conversores básicos vistos anteriormente: o *step-down* e o *step-up*.

O funcionamento deste conversor, mais uma vez, prende-se com o controlo da energia da bobina L . O seu controlo é também efetuado a partir do *duty-cycle* do sinal PWM aplicado ao transístor. Este tipo de configuração, como se pode ver na Fig. 2.17, confere ao conversor uma característica peculiar. Este conversor inverte a tensão disponibilizada. Em regime estacionário, o

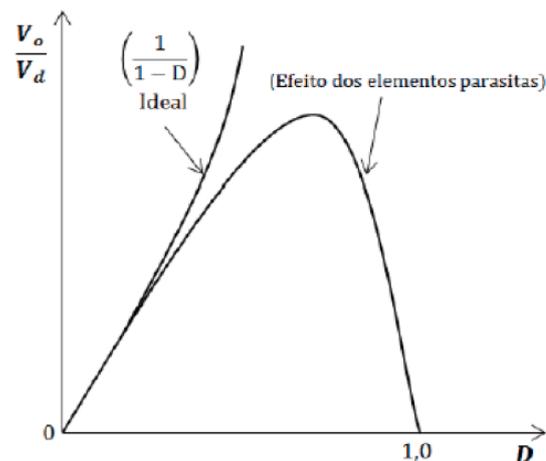


Figura 2.16: Efeito dos elementos parasitas no rácio de conversão da tensão num conversor DC-DC *Step-up* [12]

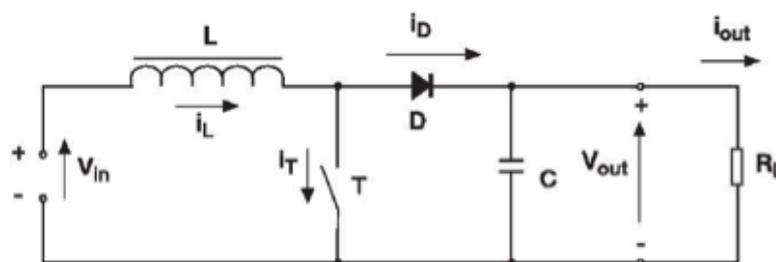


Figura 2.17: Conversor DC-DC *Buck-Boost* [8, 12]

valor médio da tensão da bobina L é nulo. Assim o rácio de conversão tensão de saída por tensão de entrada é o produto dos rácios de conversão de cada um dos conversores em cascata,

$$\frac{V_o}{V_i} = D \frac{1}{1-D} \quad (2.31)$$

Como visto anteriormente, e aproveitando o fato de o *duty-cycle* ser uma variável compreendida entre 0 e 1, pela análise da Fig. 2.17 conclui-se que $V_o \geq V_i \vee V_o \leq V_i$. Verifica-se assim a característica deste conversor gerar à saída uma tensão de valor superior ou inferior ao presente na entrada, embora à custa da inversão do sinal de tensão DC. Quando o interruptor está *on* a entrada fornece energia para o indutor enquanto o diodo se encontra reversamente polarizado. Quando o interruptor está *off*, a energia armazenada na bobina é transferida para a saída e não existe fornecimento de energia por parte da entrada neste período de tempo. À semelhança dos conversores vistos anteriormente também este atua em três modos de operação diferentes - condução contínua 2.18a, limiar de condução contínua e descontínua e condução descontínua 2.18b.

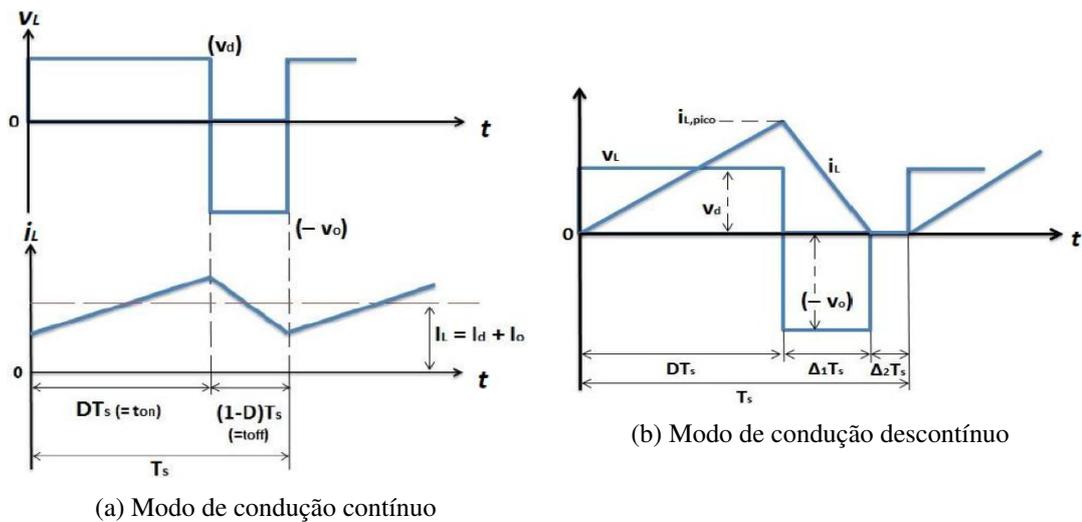


Figura 2.18: Formas de onda de corrente e tensão na bobina em condução contínua (a) e em condução descontinua (b) do conversor *Buck-Boost* [12, 13].

2.6 Algoritmos MPPT - Maximum Power Point Tracking

Num sistema de conversão de energia baseado em painéis fotovoltaicos espera-se que exista o maior aproveitamento possível por forma a retirar o máximo de potência possível. Esta necessidade surge da baixa eficiência da conversão em energia elétrica por parte das células solares e de outros fatores como por exemplo o elevado tempo de retorno do investimento e o custo de instalação e manutenção dos painéis. Para contrariar esta tendência e atenuar alguns dos efeitos de ter um painel fotovoltaico, é de vital importância a implementação de um algoritmo que, em cada instante, retire o máximo de potência possível de um sistema fotovoltaico.

Analisando as características de um painel fotovoltaico, verifica-se que este apresenta um determinado ponto de funcionamento em potência máxima para um determinado estado de funcionamento que depende tanto da temperatura como da radiação solar [14].

O recurso a técnicas de *MPPT*, *Maximum Power Point Tracking*, é possível controlar continuamente o ponto de máxima potência, sendo possível, em alguns casos, aumentos na geração na ordem de 15 a 30% [16]. O recurso a este tipo de controlo permite alterar o funcionamento do conversor, ligado ao painel fotovoltaico, por forma a que este opere no estado em que fornece o máximo de potência.

Existem diversos tipos de algoritmos *MPPT*, sendo que se diferenciam uns dos outros na forma como atingem o ponto de potência máxima. Estas diferenças resultam em aproximações ao ponto ótimo mais rápidas ou mais lentas e ainda diferenças no aproveitamento da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

Os métodos estudados são:

- Perturbação e Observação (*P&O*)
- Hill Climbing

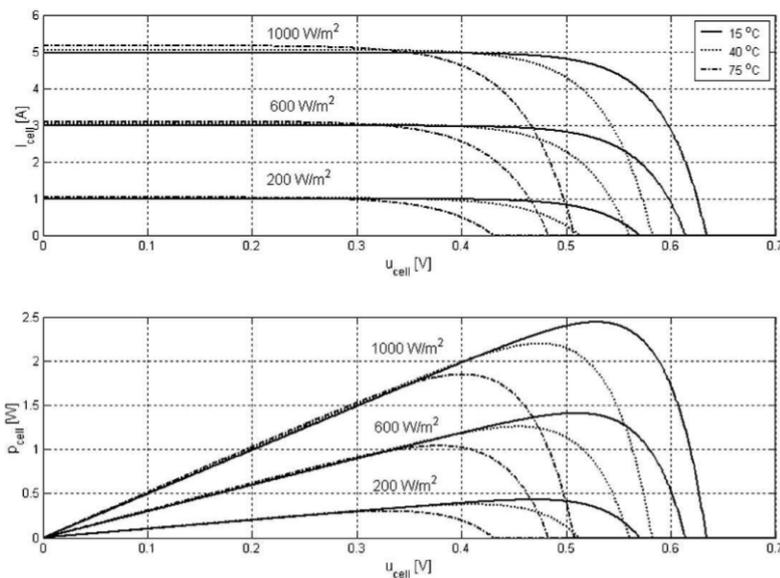


Figura 2.19: Curvas características I-V e P-V de um painel fotovoltaico sobre diferentes condições de temperatura e irradiância [15]

- Condutância Incremental
- Tensão Constante

2.6.1 Perturbação e Observação - P&O

Este algoritmo *MPPT* é um dos métodos mais utilizados devido à sua facilidade de implementação. Este método baseia-se na alteração da referência, que pode ser de corrente ou de tensão, e na comparação da potência disponibilizada pelo painel ou pelo gerador termoelétrico antes e depois da perturbação. Desta forma é possível determinar o sentido da próxima alteração da referência.

Este método faz variar, periodicamente, a referência de corrente ou de tensão em busca do ponto de potência máxima. Desta forma, se uma perturbação resulta num aumento de potência, então a perturbação seguinte realizar-se-á no mesmo sentido. Por outro lado, se essa perturbação resultar numa diminuição de potência, então, a próxima variação será no sentido oposto. Desta forma é possível encontrar o ponto de potência máxima em determinadas condições de temperatura e irradiância.

Como se pode ver pela análise da fig. 2.20 e da fig. 2.21 é possível ver que, quando a derivada da potência é negativa, torna-se necessário diminuir a referência em corrente ou aumentar a referência em tensão no sentido de atingir o ponto máximo. Quando a derivada é positiva, é necessário fazer alterações nas referências no sentido oposto. Quando a derivada é igual a zero atinge-se o ponto de potência máxima.

Este método apresenta algumas limitações. A presença de um erro em regime permanente, fruto das oscilações em torno do ponto de máxima potência em regime permanente, a resposta

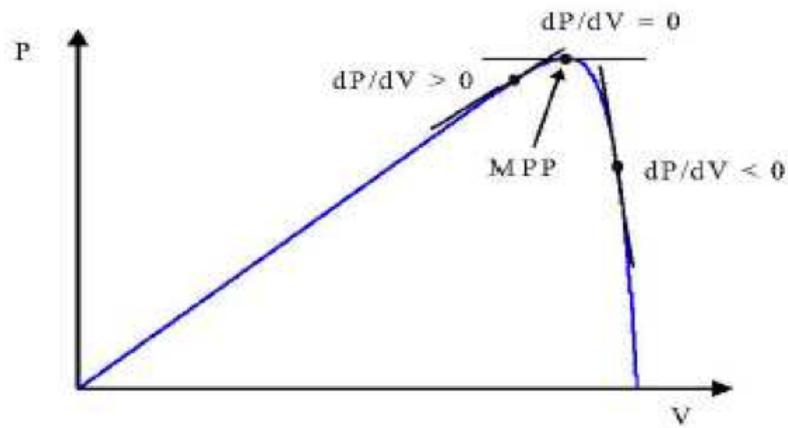


Figura 2.20: Variação da derivada da potência em diferentes posições na curva de potência [16]

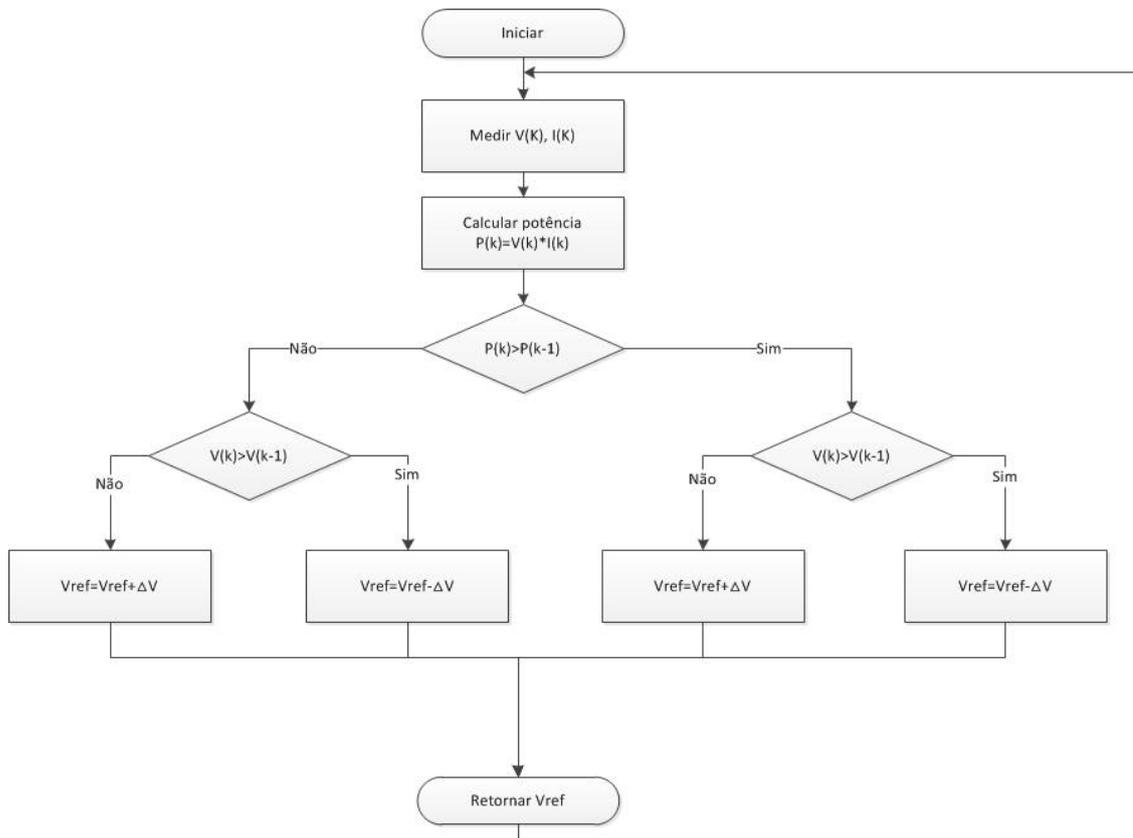


Figura 2.21: Algoritmo MPPT - Perturbação e Observação

dinâmica lenta em caso de variações bruscas na temperatura e na radiação solar são algumas das desvantagens deste método.

2.6.2 Hill Climbing

O método de *Hill Climbing* é também um dos métodos mais implementados e muito semelhante ao método de Perturbação e Observação. Este método, contudo, altera o índice de modulação, o *duty-cycle*, em função da zona da curva de potência em que se encontra. Para tal o método recorre a medições periódicas da corrente e da tensão do painel e, em função de medições e resultados anteriores, decide em que ponto de funcionamento se encontra. Assim é possível alterar o índice de modulação, M , somando ou subtraindo uma quantidade fixa, de forma a levar o painel ou o TEG ao ponto de potência máximo [8].

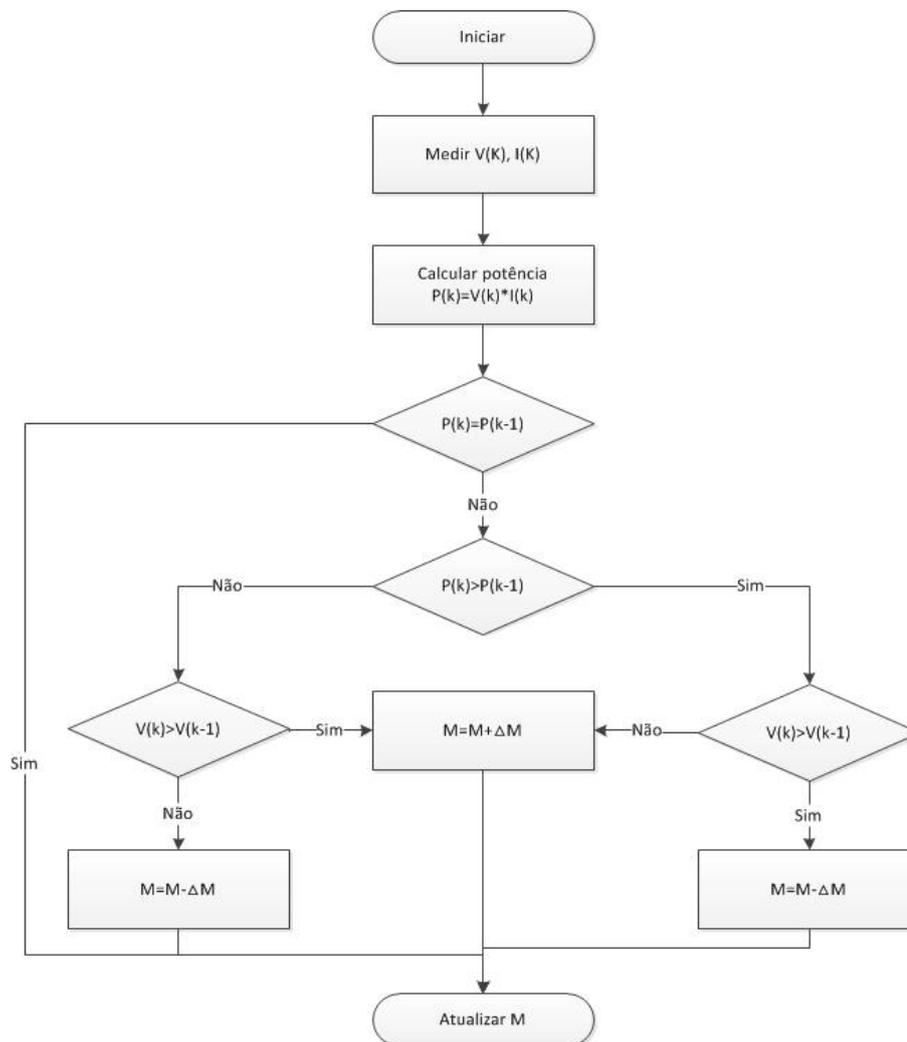


Figura 2.22: Algoritmo MPPT - Hill Climbing

O algoritmo apresentado, numa primeira fase mede a corrente e a tensão atual do painel fotovoltaico/gerador termoelétrico por fim a determinar a potência que lhe está associada nesse instante. Nos instantes seguintes, verifica se existiu uma perturbação na potência do painel. Se esta se verifica, então é necessário saber em que zona da curva de potência o sistema se encontra. Para

determinar a posição, é necessário analisar a variação da tensão, antes da perturbação e após esta. Consoante o resultado é decidido se se aumenta ou diminui o índice de modulação. De forma recursiva, o algoritmo tende a atingir o ponto de potência máxima.

Este algoritmo apresenta os mesmos problemas que o método *Perturbação e Observação* quando submetido a rápidas variações de radiação solar. Porém o erro em regime permanente é bastante superior.

2.6.3 Condutância Incremental

O método da condutância incremental apresenta resultados significativamente melhores em regime permanente e também para variações bruscas da radiação solar [16]. Este método utiliza tanto a potência como a tensão para atingir o ponto de máxima potência tornando, assim, possível alterar o índice de modulação no sentido do ponto de máxima potência. Como visto anteriormente, atinge-se o ponto ótimo quando a derivada da potência em função da tensão é igual a zero. Pode-se considerar então que a localização do ponto da potência máxima é dada pela equação 2.32.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2.32)$$

O método começa então por realizar as medições de tensão, corrente e o cálculo da potência associada ao sistema. Calculam-se também os desvios de corrente e os desvios de tensão, utilizando as leituras atuais e as anteriores. O algoritmo determina então a posição atual do sistema na curva de potência, se está à direita, à esquerda ou no ponto ótimo através das equações 2.33, 2.34 e 2.35.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, V_k = V_{MPP}, \quad (2.33)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, V_k < V_{MPP}, \quad (2.34)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, V_k > V_{MPP}, \quad (2.35)$$

Quando o sistema não encontrar variações de tensão, ($dV = 0$), o algoritmo procura por alterações na corrente por forma a ajustar o índice de modulação, aumentando-o ou diminuindo-o.

À semelhança dos algoritmos apresentados anteriormente, também este tem a dificuldade de atingir exatamente o ponto de potência máxima. Como tal, é usual definir que o *MPP* é alcançado quando o ponto de operação está dentro de uma margem de erro,

$$\left| I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \right| < \varepsilon \quad (2.36)$$

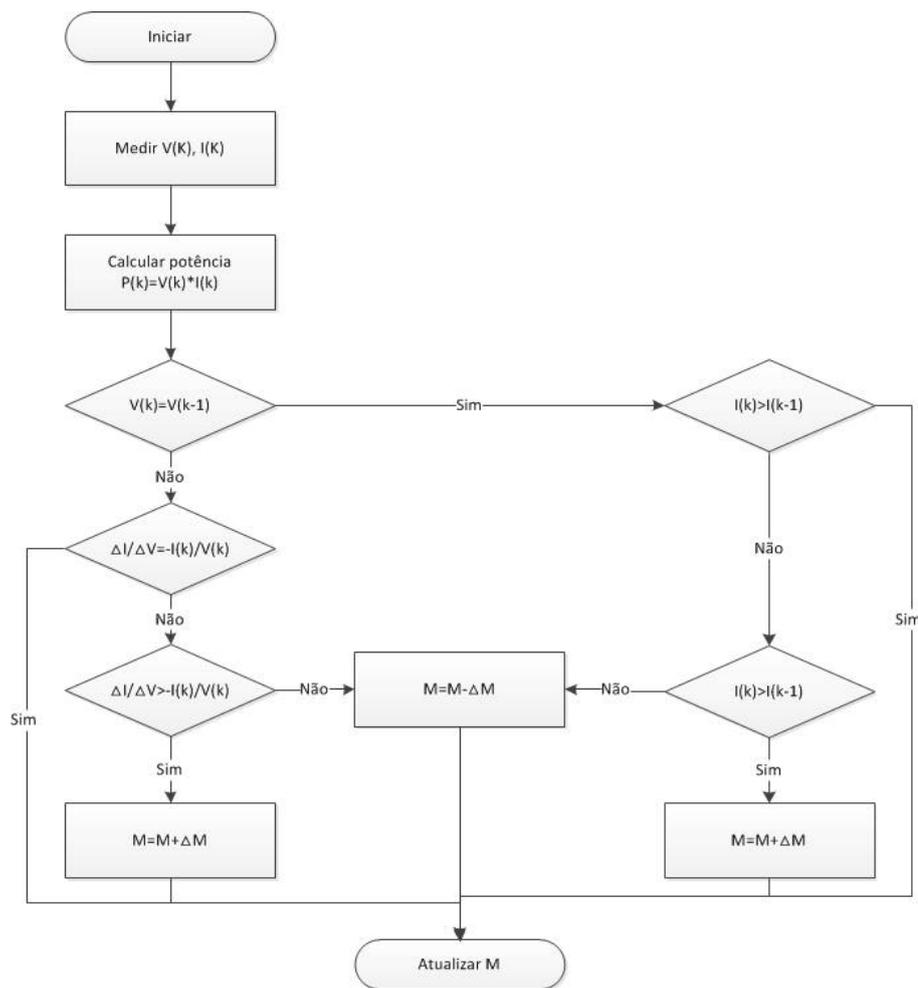


Figura 2.23: Algoritmo *MPPT* - Condutância Incremental

2.6.4 Tensão Constante

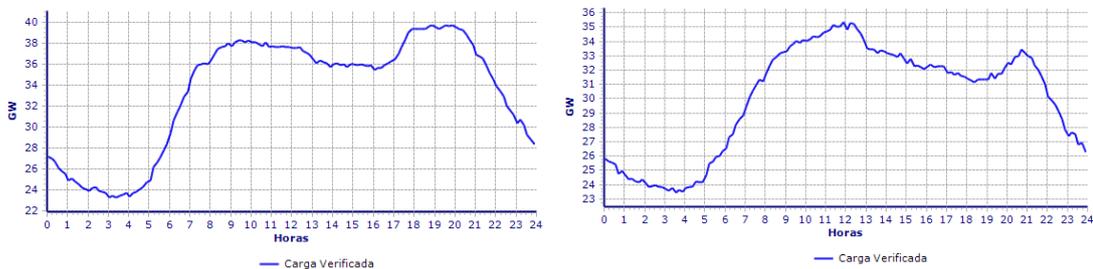
O método da tensão constante é relativamente simples de implementar quando conhecido o valor da tensão em circuito aberto, V_{OC} , do sistema. Este método é mais indicado para painéis fotovoltaicos pois é possível determinar a tensão em circuito aberto, colocando uma célula em circuito aberto, ou, em alternativa, aplicando o método indicado por *Kobayashi et al.* [17]. Este método consiste em colocar um díodo no painel fotovoltaico e, com este alimentado com uma corrente, calcular V_{OC} a partir dele.

Este método tem como princípio uma característica dos painéis fotovoltaicos onde a tensão que fornece a potência máxima, (V_{MPPT}) está relacionada com a tensão em circuito aberto, (V_{OC}). A relação entre estas duas variáveis é de aproximadamente 76% [18], sendo independente das condições de funcionamento do painel.

O algoritmo mede a tensão do painel e calcula a tensão de referência. É calculado o erro através da comparação entre as duas variáveis e atualiza o índice de modulação, por forma a igualar as tensões. Desta forma é possível colocar o painel a fornecer a potência máxima.

2.7 Armazenamento de Energia - Baterias

O armazenamento de energia, em produção de energia fotovoltaica, constitui, hoje em dia, um elemento essencial neste tipo de sistemas. A imprevisibilidade de produção e o facto de, na maioria das vezes, o período de produção não coincidir com as horas de consumo são alguns dos fatores que exigem que um sistema de produção fotovoltaica necessite de armazenar energia. Quer num sistema autónomo quer num sistema de produção para entrega à rede, o recurso a baterias constitui uma vantagem. O facto de poder armazenar a energia para depois a poder vender num determinado período de tempo constitui por si só uma vantagem. Num sistema constituído por um sistema que alie um painel fotovoltaico a um gerador termoelétrico, o período de produção vai ser limitada ao número de horas de Sol disponíveis.



(a) Diagrama de cargas Ibérico de 4/01/2014

(b) Diagrama de cargas Ibérico de 21/05/2014

Figura 2.24: Diagrama de cargas Ibérico em diferentes períodos do ano [19].

Analisando os diagramas de cargas apresentados na Fig. 2.24, é possível verificar que existem horas em que o consumo é maior. Estas horas denominam-se horas de ponta. Nestas horas a remuneração aos produtores de eletricidade é decidida pelo preço marginal do último produtor, sendo esse o valor da remuneração fixado para todos os produtores nesse intervalo de tempo. Como o mercado funciona em *pool*, os produtores podem apresentar propostas de produção para diversos períodos de tempo [20].

Num sistema que possua produção fotovoltaica e termoelétrica, o armazenamento de energia torna-se uma vantagem pois permite maximizar a rentabilidade deste sistema, determinado pelas horas de produção para armazenamento de energia e pelas horas para venda dessa mesma energia.

As baterias são um elemento que permite armazenar energia química para posteriormente ser convertida em energia elétrica. Durante o processo de carga, transforma energia elétrica em energia química e, durante o processo de descarga, energia química em energia elétrica. Durante o processo de carga e de descarga ocorrem, portanto, reações de oxidação ou redução. Uma bateria é tipicamente constituída por dois elétrodos, positivo e negativo, o eletrólito, meio responsável pela condução dos iões entre os dois elétrodos, e consoante a tecnologia pode existir um separador que divide fisicamente as diferentes polaridades.

As baterias, constituem hoje em dia, a principal forma de armazenamento de energia em sistemas de engenharia. A diminuição do número de ciclos de vida, a alteração das características com

a temperatura são algumas das limitações que as baterias ainda apresentam. Por isso, estas estão sujeitas a um constante desenvolvimento por forma a ultrapassar estas situações.

Existem diversos tipos de baterias para diferentes utilizações. De seguida, vão ser apresentadas algumas baterias que se adequam mais ao tipo de sistema a ser desenvolvido.

- **Chumbo-ácidas** - Estas baterias, possuem uma tensão nominal de 2V por célula, podem ser de dois tipos diferentes [21]:

Baterias húmidas

São o tipo de baterias mais comuns em instalações fotovoltaicas. São constituídas pelas placas e pelo fluido eletrólito. As placas são constituídas pelos elétrodos positivos e negativos. Estas placas podem ser produzidas a baixo custo uma vez que a matéria ativa pode ser espalhada na estrutura da grelha. Este tipo de baterias são principalmente utilizadas em aplicações pontuais. Quando sujeita a grandes esforços, a bateria pode danificar-se provocando um derrame do eletrólito.

Baterias de gel

Este tipo de baterias constitui uma versão melhorada das baterias húmidas. O eletrólito é desta vez misturado com outros agentes que permitem que se forme uma substância viscosa denominada gel. Apresenta algumas características importantes face às baterias húmidas porque apresentam um tempo de vida útil maior, invólucro selado e não requerem grandes cuidados de manutenção. Porém não são capazes de fornecer altas correntes de carga e descarga e em caso de sobrecarga podem desenvolver uma mistura de gás perigosa. São utilizadas em aplicações que necessitem de correntes baixas ou médias durante um longo período de tempo.

- **Níquel** - As baterias de Níquel são constituídas por células eletroquímicas. As baterias de Níquel Cádmio e de Hidretos Metálicos de Níquel são as que possuem um maior número de ciclos de vida comparativamente a outras tecnologias, cerca de 1500. Estas baterias são relativamente caras de produzir face a outras tecnologias [21].

Níquel Cádmio

São baterias que têm um eletrólito viscoso e possuem características interessantes como o facto de poderem ser carregadas imediatamente após a uma descarga completa [22]. Esta descarga completa deve ser efetuada sempre que possível, pois acontecendo situações de carga e descarga parciais dá-se o aparecimento de cristais no elétrodo negativo, diminuindo, assim, a capacidade da bateria. Este tipo de baterias oferece correntes de descargas mais altas quanto maior for a sua temperatura. Porém não podem ser carregadas com altas correntes a temperaturas baixas.

Hidretos Metálicos de Níquel A principal diferença entre esta bateria e a anterior é que estas não precisam de ser completamente descarregadas sempre que são utilizadas. O efeito de memória é, também, significativamente mais reduzido em comparação com as baterias de Níquel Cádmio.

- **Lítio** - As baterias de lítio, a par de outras baterias, são também constituídas por células eletroquímicas.

Este tipo de baterias oferece um elevado período de vida, elevada densidade energética e elevada eficiência [23]. Este tipo de baterias oferece, também, um baixo impacto ambiental uma vez que podem ser recicladas. O lítio, principal constituinte da bateria, encontra-se embebido e desloca-se entre os dois elétrodos. Este tipo de baterias podem estar sujeitas a condições de carga e descarga parciais sem que se danifiquem. As baterias à base de lítio, exigem, no entanto, elevado rigor e qualidade no seu processo de fabricação para que em caso de situações anormais - elevadas correntes ou temperaturas - não ocorra a destruição da bateria.

Na tabela 2.1 são apresentadas algumas das principais características de cada umas das baterias apresentadas acima.

Tabela 2.1: Resumo dos diferentes tipos de baterias [13]

Tipo	Densidade Energia (Wh/kg)	Dens. (W/L)	Potência	Ciclos	Preço
Chumbo-Ácidas	20-50	10-400		500-1000	Baixo
Níquel-Cádmio	50-75	60		2000-2500	Alto
Hidretos Metálicos de Níquel	50-90	320		300-2000	Alto
Lítio	75-200	250>340		>1000	Alto

2.7.1 Perfil de carga e descarga

O uso adequado de uma bateria prende-se essencialmente com o seu perfil de carga e descarga e na forma como este é feito de maneira a evitar um envelhecimento prematuro desta. Existem alguns conceitos associados ao funcionamento de uma bateria que são essenciais para a sua compreensão [19]:

- **Ciclo de Vida** - Representa o número de ciclos que uma célula ou bateria pode ser carregada e descarregada, em determinadas condições, antes que a sua capacidade disponível atinja um valor menor que 80% da capacidade nominal;
- **Auto-descarga** - fenómeno provocado por impurezas metálicas que resulta numa diminuição da capacidade da bateria (não recuperável) mesmo sem estar em carga.
- **C-rate** - é um padrão específico de medição da capacidade nominal dado em função da taxa de carga e descarga. Um C-rate de 1 numa bateria com uma capacidade de 600mAh significa que esta carrega ou descarrega com uma corrente de 600mA.
- **Efeito de recuperação** - quando existem descargas intermitentes a bateria pode recuperar alguma da sua capacidade nos momentos em que se encontra parada.

Numa bateria a corrente tem um efeito decisivo na velocidade de carregamento e descarregamento da mesma. Quanto maior for a corrente de carga mais rápido será o carregamento da bateria. Em sentido inverso, quanto menor a corrente, maior vai ser o tempo de carregamento da bateria. A mesma análise pode ser feita no processo de descarga onde quanto maior for a corrente exigida à bateria maior vai ser a sua taxa de variação e, portanto, vai descarregar mais rápido.

Existem alguns problemas associados às baterias que decorrem dos processos de carga e descarga [24]:

- Sobrecarga - o carregamento excessivo de uma bateria, ou seja, forçar o armazenamento de energia para além do valor máximo estipulado, resulta num aumento de tensão aos seus terminais e um aumento da atividade química na bateria. Como consequência pode-se verificar uma degradação das características químicas, diminuição da capacidade da bateria, aquecimento excessivo e aumento da pressão.
- Sub-carga - o descarregamento excessivo de uma bateria, ou seja, forçar a descarga de energia para além do valor mínimo estipulado, resulta na diminuição da tensão aos seus terminais. Como consequência surgem também os efeitos verificados na sobrecarga.

2.7.2 Critérios de Seleção

As baterias devem possuir diversos tipos de características que se adequem à aplicação onde vão ser inseridas. Tendo isto em conta é possível realizar um resumo das principais características e critérios relevantes para a escolha de uma bateria [6]:

- Boa relação performance/preço;
- Reduzida manutenção;
- Longo período de vida útil;
- Elevada eficiência energética e reduzida-autodescarga;
- Elevada capacidade de armazenamento e densidade de potência (em volume e peso);
- Resistência mecânica a fatores externos
- Proteção do meio ambiente

A não existência de um acumulador de energia que cumpra todos estes requisitos obriga a que seja necessária efetuar uma hierarquia face aos critérios apresentados. Esta hierarquia deve ter em conta, como dito anteriormente, a finalidade.

2.8 Híbridação entre Fotovoltaico e Termoelétrico

A híbridação destas duas tecnologias, a fotovoltaica e a termoelétrica, tem gerado um grande interesse nos tempos mais recentes. A possibilidade de se complementarem tem vindo a ser estudada e com resultados bastante interessantes. O facto de ambas as tecnologias possuírem rendimentos relativamente reduzidos, mas tendo a tecnologia constituinte, tanto da parte das células fotovoltaicas como da parte dos materiais, um elevado potencial futuro, a sua híbridação pode vir a ser uma solução viável. Existem diversos tipos de acoplamento entre painéis fotovoltaicos e os módulos termoelétricos. O tipo de acoplamento normalmente tem em vista uma determinada aplicação, quer seja em pequena escala quer em grande escala.

2.8.1 Acoplamento Simples

O acoplamento simples, como o próprio nome indica, é realizado fazendo a junção do módulo termoelétrico ao painel fotovoltaico como pode ser visto na figura seguinte [25]:

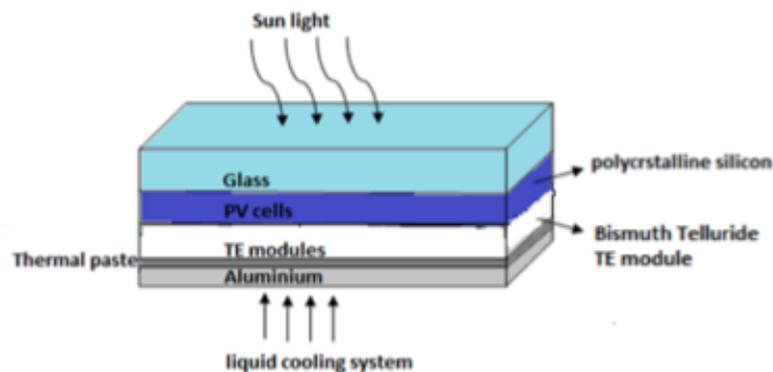


Figura 2.25: Esquema de um acoplamento simples [25]

Este tipo de acoplamento é flexível quanto às junções entre materiais e módulos. Como já foi visto a eficiência dos módulos termoelétricos depende, em larga parte, dos materiais que o constituem e da diferença de temperatura entre o condutor, sendo tanto maior quanto maior for a diferença de temperatura, entre junções, e o ZT. Neste esquema foi utilizado vidro para proteger as células fotovoltaicas, uma pasta térmica para aumentar a transferência de calor entre as células e o módulo termoelétrico e entre o alumínio e o módulo. Este tipo de sistema permite vários tipos de refrigeração a partir da convecção onde o alumínio é um excelente dissipador de calor ou através de líquidos de refrigeração.

Neste caso em particular, a tensão máxima produzida no módulo termoelétrico não é independente das condições de funcionamento uma vez que depende da temperatura das células fotovoltaicas e da temperatura da junção fria. Desta forma $V_{total} = V_{TE} + V_{PV}$ e o circuito equivalente [25, 26]

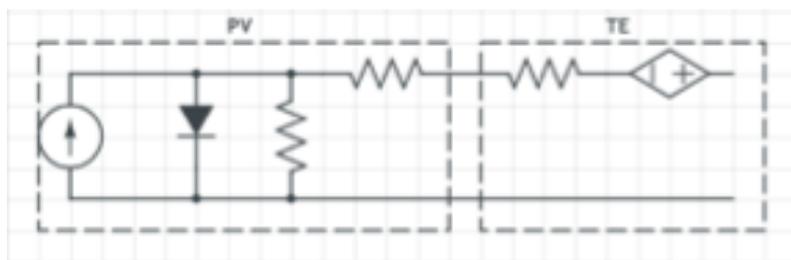


Figura 2.26: Circuito equivalente PV-TE [26]

Os resultados obtidos em função das experiências realizadas [25–27] demonstram que o acoplamento simples entre módulos PV e TEGs produz um ligeiro aumento do rendimento global do sistema quando comparado com um sistema puramente fotovoltaico. Embora os resultados não tenham sido consistentes em termos numéricos, o que é normal pois foram testados sistemas diferentes (modelos teóricos e práticos), com o mesmo tipo de acoplamento, em condições de teste diferentes, todos demonstram, como referido nas secções anteriores, que um aumento da temperatura prejudica o rendimento do módulo PV e, por outro lado, beneficia o módulo TEG. É de referir também que um sistema de refrigeração quando aplicado a um painel fotovoltaico permite que este melhore as suas condições de funcionamento e tenha, por isso, um melhor rendimento. O mesmo acontece num módulo termoelétrico pois é possível aumentar a diferença de temperatura entre as junções melhorando, também, o rendimento. De uma forma geral, este tipo de acoplamento permite que se aumente o rendimento global em até 3%.

2.8.1.1 Acoplamento simples com concentrador de calor

Como visto na secção anterior 2.1 quanto maior for a diferença de temperatura nas junções do módulo termoelétrico maior será o seu rendimento. O mesmo acontece quando a temperatura é relativamente baixa nos módulos fotovoltaicos. Como tal, e em ordem de otimizar a primeira permissa, foram já estudadas diversas formas de aumentar o gradiente de temperatura no TEG [4, 28, 29].

A principal aproximação ao problema foi concentrar a radiação incidente na junção do lado quente do módulo termoelétrico e estudar diversas formas de o fazer. Um dos sistemas possíveis necessita de um dispositivo que permita "seguir o Sol", encarecendo o sistema. Outra abordagem foi a de usar um concentrador termoelétrico. Esta abordagem permite que exista uma superfície altamente absorvente de radiação, transformando-a diretamente em calor e que vai ser direcionado para o módulo termoelétrico através de uma camada altamente condutora de calor e que pode ser visto na figura a seguir [4]:

A este modelo 2.27 pode ser facilmente instalado um módulo PV no topo da camada absorvente de radiação. Este acoplamento pode ter a desvantagem de aquecer a fina película fotovoltaica e com isto reduzir o seu rendimento. Visto o rendimento deste modelo, exclusivamente do TEG, ser significativo, na ordem dos 5% vale a pena pensar numa forma de acoplar este sistema a um

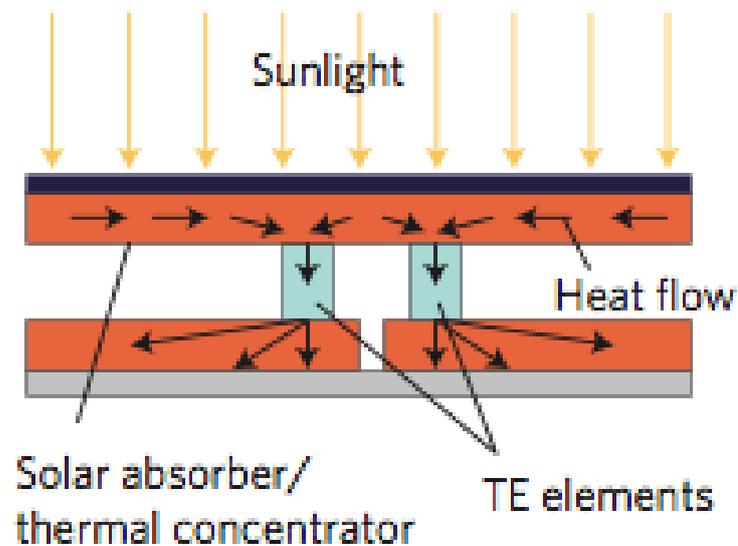


Figura 2.27: Ilustração do sistema de condução de calor [4]

módulo PV e estudar uma forma de otimizar os dois sistemas sem prejudicar o espaço que irão ocupar.

Outra abordagem passa por juntar ao módulo PV que na figura 2.28 se denomina STC (Solar Cell) a um sistema que conjuga o módulo TEG, e como visto nesta secção, a um coletor de calor que é composto por uma camada absorvente de radiação e uma camada de condução na forma de "taça". Esta topologia permite absorver tanto o fluxo solar directo como aquele que é refletido pelo STC [28].

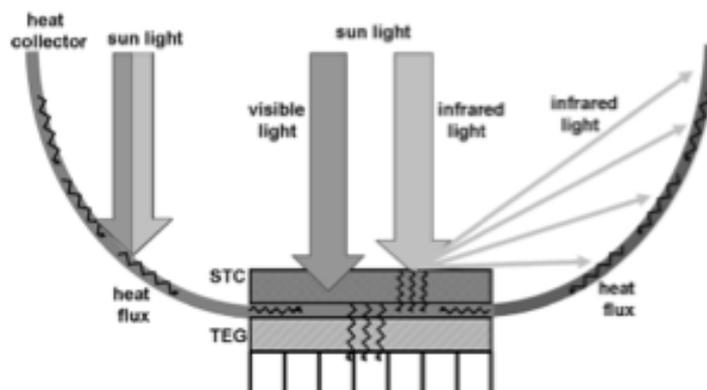


Figura 2.28: Ilustração do sistema tipo Taça [28]

Tanto o sistema das figuras 2.27 e 2.28 apresentam resultados satisfatórios e podem, efetivamente, resultar, quando acoplados a módulos fotovoltaicos, aumentar o rendimento global do sistema.

2.8.2 Spectrum Splitter

Este tipo de sistema parte do facto de que a eficiência das células fotovoltaicas é maior para determinados comprimentos de ondas dos fotões incidentes [30–32]. A principal diferença deste sistema é que ainda existe uma carência de estudos empíricos que atestem efetivamente os resultados obtidos teoricamente. Neste sistema não existe um acoplamento do módulo termoelétrico ao painel fotovoltaico, mas sim uma estrutura que os coloca como módulos independentes mas ligados em série como visto na figura 2.26. Desta forma é possível otimizar os dois sistemas em separado por forma a obter um melhor rendimento conjunto.

A ideia genérica deste sistema é dividir o espectro solar e redirecioná-lo para cada um dos módulos de acordo com o comprimento de onda dos fotões incidentes. Assim é possível reduzir o aumento de temperatura, uma vez que o rendimento diminui com o aumento desta [30, 32] e rentabilizá-los ao máximo. É possível aproveitar o restante espectro, que possui os fotões de maior capacidade energética, para o módulo termoelétrico.

O facto dos módulos funcionarem independentemente, mas associados a um mesmo circuito, permite que a refrigeração da junção fria do módulo termoelétrico possa, também, ser utilizada como meio de arrefecimento ao painel fotovoltaico, melhorando, desta forma, a sua eficiência e longevidade.

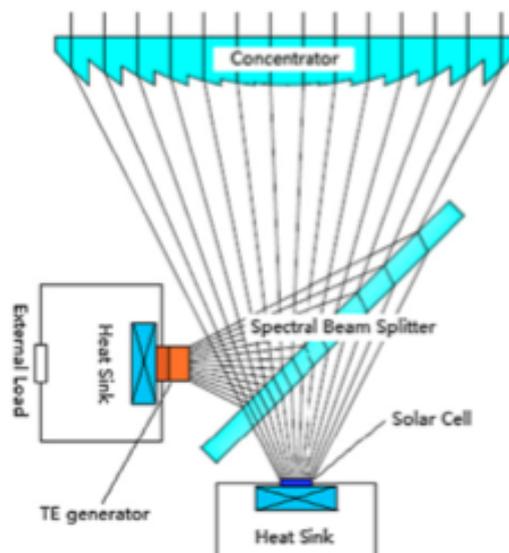


Figura 2.29: Esquema de um sistema de *Spectrum Splitter* [30]

Este sistema [30] tem algumas desvantagens que podem ser um entrave à sua aplicação massificada:

1. Desenvolvimento de divisores do espectro solar;
2. Difícil aplicação para micro-geração e produção em grande escala;

3. Necessidade de escolha do valor de corte do divisor do espectro tendo em conta o local de aplicação;
4. Elevada necessidade de personalização ao local de instalação.

2.9 Conclusões

Neste capítulo foi abordada a base teórica desta dissertação. Foram analisados os princípios fundamentais de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos e dos sistemas termoelétricos. Nos sistemas fotovoltaicos foram analisados dois tipos de sistemas: isolados e ligados à rede. Com base nestes tipos de sistema concluiu-se que nesta dissertação era de grande interesse estudar um sistema isolado com possibilidade de ligação à rede que, pela sua menor dimensão, seria mais fácil de analisar e que poderia ser facilmente escalado para um sistema de produção ligado à rede através da substituição, fundamentalmente, dos conversores DC-DC. Tendo em conta esta necessidade, de um sistema com conversor DC-DC, é feita uma análise a alguns tipos de conversor existentes, a sua finalidade, e o seu modo de funcionamento. É dada especial ênfase ao conversor DC-DC *step-up*, pelas suas características e modo de funcionamento, por ser o elemento a utilizar neste projeto. Como é desejado que o sistema forneça a sua potência máxima em qualquer instante, são estudados alguns algoritmos *MPPT*. Para finalizar é feito um estudo a possíveis soluções que englobem o acoplamento de um gerador termoelétrico a um painel fotovoltaico. Com base neste estudo é possível concluir que existem diversas maneiras de fazer este sistema híbrido. Contudo a solução adotada tem como base o funcionamento independente dos dois sistemas que irá ser explicada em mais detalhe na secção 6.1.

Capítulo 3

Sistema Fotovoltaico

Neste capítulo serão abordadas questões pertinentes no que concerne aos painéis fotovoltaicos. Irá ser analisado o equivalente elétrico e como este pode ser modelizado em ferramentas de simulação, como por exemplo, o MATLAB e o PSIM. Irá ser estudado também o comportamento do painel fotovoltaico perante diversas condições de irradiância, temperatura e ângulo de incidência da radiação solar. Irá ser apresentada a modulação deste sistema nas ferramentas de simulação acima mencionadas.

3.1 Equivalente Elétrico

Uma célula solar é composta por camadas de silício que se encontram contaminadas por impurezas do tipo p e do tipo n. Idealmente o circuito elétrico equivalente teria uma fonte de corrente controlada pela radiação solar em paralelo com um díodo que modela as junções PN que estão associadas à constituição física do painel. Contudo o circuito equivalente utilizado neste trabalho tenta contemplar a realidade de um painel fotovoltaico comportando por isso as correntes de fuga e eventuais perdas, que não são caracterizadas num modelo ideal. O esquema elétrico da Fig. 3.1 permite englobar estas características.

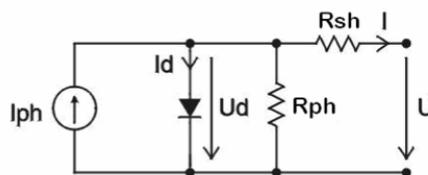


Figura 3.1: Circuito do equivalente elétrico de uma célula fotovoltaico [8]

O circuito apresentado na Fig. 3.1 é apenas um dos possíveis que permitem representar o funcionamento de uma célula fotovoltaica. Porém os modelos de díodo simples e de díodo duplo são amplamente utilizados uma vez que, na maior parte das vezes, permitem representar de uma forma bastante aproximada o funcionamento de uma célula.

A equação I-V da Fig. 3.1 é representada na expressão 3.1.

Os símbolos representados na Fig. 3.1 são definidos como:

- I_{ph} : fotocorrente;
- I_d : corrente do diodo;
- I_{sh} : corrente de shunt;
- I : corrente de saída;
- V : tensão de saída;
- R_{sh} : resistência de shunt;
- R_s : resistência de série;
- U_D : tensão no diodo.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

Onde I_0 representa a corrente de saturação inversa do diodo, q a carga do eletrão ($1.602 \times 10^{-19} C$), A o fator de ajuste da curva, K a constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J/K$). Em células que tendem a ter uma curva I-V em que a inclinação em curto-circuito é quase zero, acontece sobretudo nas células mono-cristalinas o valor da resistência de shunt, R_{sh} , é assumida infinita [33]. Desta forma pode-se ignorar o último termo da equação 3.1. Assumindo I_{ph} como I_{SC} , corrente de curto-circuito, a equação anterior ficará [34]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

A equação 3.2 é válida para apenas uma célula solar. Para representar a realidade de uma forma mais precisa, pois os painéis são compostos por várias células, é necessário alterar o termo $q(V + R_S I)/(AKT)$ por $q(V + R_S I)/(N_S AKT)$, sendo a nova expressão para células mono-cristalinas:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{N_S AKT}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Para células poli-cristalinas a expressão será a da equação 3.1 com a correção do número de células:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{N_S AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

Em circuito aberto ($V_{OC}, 0$) a equação -3.1 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$\frac{q}{AKT} = \frac{\ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} - \frac{V_{OC}}{R_{sh} I_0} + 1\right)}{V_{OC}} \quad (3.5)$$

Substituindo 3.5 na Eq.3.4, obtém-se:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \left(\frac{I_{SC}R_{sh} - V_{OC}}{R_{sh}I_0} + 1 \right)^{\frac{V+R_S I}{V_{OC}}} - 1 \right\} - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

Assim o parâmetro k pode ser definido como:

$$k = \frac{I_{SC}R_{RS} - V_{OC}}{R_{sh}I_0} \quad (3.7)$$

Então a equação 3.6 fica:

$$I = \frac{1}{R_{sh}} \left\{ I_{SC}R_{sh} - R_{sh}I_0 \left[(k+1)^{\frac{V+R_S I}{V_{OC}}} - 1 \right] - (V + R_S I) \right\} \quad (3.8)$$

Analisando o parâmetro k pode-se observar que este possui um valor muito elevado e pode ser aproximado por $k+1$:

$$R_{sh}I_0 = \frac{I_{SC}R_{RS} - V_{OC}}{k} \approx \frac{I_{SC}R_{RS} - V_{OC}}{k+1} \quad (3.9)$$

Então:

$$I = \frac{1}{R_{sh}} \left\{ I_{SC}R_{sh} - (I_{SC}R_{RS} - V_{OC})(k+1)^{\left(\frac{V+R_S I}{V_{OC}} - 1\right)} + \frac{I_{SC}R_{sh} - V_{OC}}{k} - (V + R_S I) \right\} \quad (3.10)$$

Da Eq. 3.7:

$$I_0 = \frac{I_{SC}R_{sh} - V_{OC}}{kR_{sh}} \quad (3.11)$$

Então:

$$I = I_{SC} - \frac{I_{SC}R_{sh} - V_{OC}}{R_{sh}} (k+1)^{\left(\frac{V+R_S I}{V_{OC}} - 1\right)} + I_0 - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (3.12)$$

Sendo I_0 muito mais pequeno que os restantes termos da equação 3.12, pode ser ignorado e dessa forma chegar à expressão simplificada da equação $I - V$ do painel fotovoltaico:

$$I = I_{SC} - \frac{I_{SC}R_{sh} - V_{OC}}{R_{sh}} (k+1)^{\left(\frac{V+R_S I}{V_{OC}} - 1\right)} - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (3.13)$$

Por forma a resolver o parâmetro k , que continua a ser uma incógnita, pode-se recorrer aos valores da corrente de curto circuito, tensão em vazio e a valor da corrente para o *maximum power point* (MPP) em condições de teste normalizadas (STC). Em condições de teste normalizadas a temperatura do módulo é de 25°C e a irradiação ao nível do painel é de 1000 W/m². Então o parâmetro k pode ser definindo tendo em conta estes parâmetros e a Eq. 3.13 :

$$k_{ref} = \left(\frac{V_{mpp,ref} + R_S I_{mpp,ref}}{V_{OC,ref}} - 1 \right) \sqrt{\frac{I_{SC,ref}R_{sh} - I_{mpp,ref}R_{sh} - I_{mpp,ref}R_S - V_{mpp,ref}}{I_{SC,ref}R_{sh} - V_{OC,ref}}} - 1 \quad (3.14)$$

Onde $J_{SC,ref}$ e $V_{OC,ref}$ representam a corrente de curto circuito e a tensão em circuito aberto em condições STC, $I_{mpp,ref}$ e $V_{mpp,ref}$ a corrente e a tensão MPP em condições STC e k_{ref} o valor de referência para k em condições STC. Uma vez determinados os parâmetros R_S e R_{sh} , o valor de k_{ref} pode ser calculado expeditamente. Por forma a calcular estes dois parâmetros é necessário derivar a Eq.3.13 em ordem à tensão [34]:

$$\frac{\partial I}{\partial V} = - \frac{\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_{SC}R_{sh}-V_{OC}}{R_{sh}V_{OC}}(k+1)^{\left(\frac{V+R_S I}{V_{OC}}-1\right)} \ln(k+1)}{1 + \frac{R_S}{R_{sh}} + \frac{(I_{SC}R_{sh}-V_{OC})R_S}{R_{sh}V_{OC}}(k+1)^{\left(\frac{V+R_S I}{V_{OC}}-1\right)} \ln(k+1)} \quad (3.15)$$

Sobre condições STC, o parâmetro k pode ser substituído por:

$$\frac{\partial I}{\partial V} = - \frac{\frac{1}{R_{sh}} + Q}{1 + \frac{R_S}{R_{sh}} + R_S Q} \quad (3.16)$$

Onde Q representa:

$$Q = \frac{R_{sh}I_{SC,ref} - V_{OC,ref}}{R_{sh}V_{OC,ref}} \left(\frac{R_{sh}I_{SC,ref} - R_{sh}I_{mpp,ref} - R_S I_{mpp,ref} - V_{mpp,ref}}{R_{sh}I_{SC,ref} - V_{OC,ref}} \right)^{\frac{V+R_S I - V_{OC,ref}}{V_{mpp,ref} + R_S I_{mpp,ref} - V_{OC,ref}}} \frac{V_{OC,ref}}{V_{mpp,ref} + R_S I_{mpp,ref} - V_{OC,ref}} \ln \left(\frac{R_{sh}I_{SC,ref} - R_{sh} - R_S I_{mpp,ref} - V_{mpp,ref}}{R_{sh}I_{SC,ref} - V_{OC,ref}} \right) \quad (3.17)$$

Posto isto é necessário derivar a potência de saída em relação à tensão em vazio em condições MPP [35] por forma a obter a seguinte equação:

$$\left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V=V_{mpp}} = - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (3.18)$$

Seguidamente é necessário derivar a corrente de saída do painel fotovoltaico com a tensão aproximadamente igual a $-1/R_{sh}$ em condições de curto-circuito [36], isto é:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0} = - \frac{1}{R_{sh}} \quad (3.19)$$

Assim a Eq. 3.16 pode ser substituída por estes dois pontos de funcionamento. De notar que as equações 3.17 e 3.19 são ambas não lineares. Para ultrapassar tal problema recorreu-se à função *fsolve* do MATLAB para resolver estas duas equações em simultâneo. Como referido anteriormente depois de determinado R_S e R_{sh} é possível determinar o parâmetro K_{ref} a partir da Eq. 3.14 e desta forma, para um qualquer ponto de tensão é possível determinar a respetiva corrente com recurso à Eq. 3.13.

3.2 Funcionamento em diversas condições meteorológicas

Os painéis fotovoltaicos, como é do conhecimento geral, possuem um rendimento relativamente baixo, 8% – 21%. Este fato prende-se com alguns aspetos físicos dos mesmos mas também

com algumas condições externas como a temperatura, a irradiância, o ângulo de incidência no painel, o espectro solar e fenômenos de convexão. Nesta secção será explicado a influência dos fenômenos que causam maiores perturbações no funcionamento do painel fotovoltaico, a temperatura, a irradiância e o ângulo de incidência.

3.2.1 Influência da temperatura

O efeito da temperatura de operação do painel fotovoltaico tem uma influência preponderante na eficiência do módulo assim como nos parâmetros elétricos do sistema. Como a eficiência dos módulos fotovoltaicos é feita sobre condições STC, $T_a = 25^\circ\text{C}$ e $S = 1000\text{W}/\text{m}^2$, que raramente são as condições de funcionamento, pois, em condições normais, a temperatura do painel é geralmente superior em $20/50^\circ\text{C}$ [7] é necessário extrapolar a curva I_V para condições que não as de referência. Como mencionado por *Ding et al* [37] de acordo com o *IEC 60891(2009)* as correções a efetuar na corrente de curto-circuito e na tensão em circuito aberto são:

$$I_{SC} = I_{SC,ref} \left\{ 1 + \alpha(T - T_{ref}) \right\} \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.20)$$

$$V_{OC} = V_{OC,ref} \left\{ 1 + a \ln \left(\frac{S}{S_{ref}} \right) + \beta(T - T_{ref}) \right\} \quad (3.21)$$

Onde α representa o coeficiente de temperatura de I_{SC} , β o coeficiente de temperatura de V_{OC} , a o fator de correção de V_{OC} com a irradiância sendo o seu valor, normalmente, 0.06 segundo o (*IEC 60891,2009*).

Como se pode constatar pelas equações 3.20 e 3.21 a potência de saída do painel fotovoltaico é largamente afetada pela temperatura e pela irradiância. Outros fatores como o espectro solar, vento e fenômenos de convexão causam também oscilações na potência de saída, porém o seu estudo é bastante complexo.

Por forma a calcular a temperatura da célula é normalmente recorrido a um método mais empírico que permite calcular e extrapolar a temperatura do painel a partir de algumas medições. O estudo da influência da temperatura nas células foi conduzido por *Ross* em 1976 e que, permite, de uma forma muito simples determinar a temperatura da célula a partir da temperatura ambiente, da irradiância, de uma constante, K_S - coeficiente de *Ross*, dependendo do tipo de instalação [38] e que pode ser visto na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores para o coeficiente de *Ross* consoante o tipo de instalação [27]

Instalação do sistema PV	K_S
Integrado no telhado	0.058
Com uma pequena distância ao telhado (<10cm)	0.036
Com uma grande distância ao telhado (>10cm)	0.027
Livre	0.02

Existem, contudo, alguns painéis que, no seu dimensionamento contemplam uma área de refrigeração natural (vento) e forçada (dissipadores de calor ou líquidos refrigerantes). Assim a temperatura da célula T_{cel} ($^{\circ}\text{C}$) passa por um ajustamento dado pela equação 3.22 [6].

$$T_{cel} = T_{amb} + G \frac{NOCT - 20}{800} - \frac{P}{S \cdot (K_C + V_{vento} \cdot K_V)} \quad (3.22)$$

Onde T_{amb} representa a temperatura ambiente, normalmente 25°C , G a irradiância (W/m^2), K_C e K_V os fatores de perdas térmicas do painel, S a secção do painel e $NOCT$ ("Nominal Operating Cell Temperature") - temperatura a 25°C , irradiância a $800\text{W}/\text{m}^2$ e vento a $1\text{m}/\text{s}$. Por forma a simplificar o problema que decorre da transferência de calor provocado pelo vento, partindo do princípio que a radiação e a convecção natural têm efeitos menores na temperatura, foi possível chegar à expressão [38]:

$$T_{cel} = T_{amb} + \frac{0.32}{8.19 + 2v_W} \cdot G; v_W > 0 \quad (3.23)$$

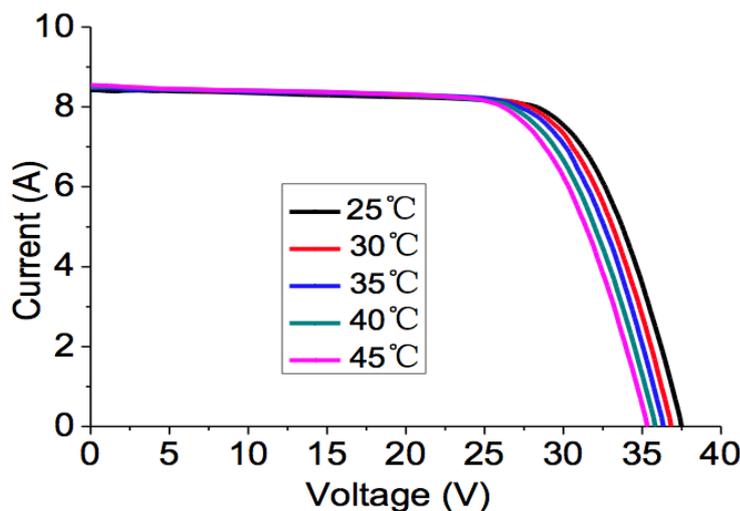


Figura 3.2: Efeito da Temperatura na curva I-V de um painel [39]

3.2.2 Influência da irradiância

No que concerne ao efeito da irradiância na célula, a corrente I_{SC} varia proporcionalmente com o aumento da irradiância, G (W/m^2), verificando-se um aumento da eficiência e da potência com o aumento desta.

$$I_{SC} = G \frac{I_{SC}}{1000} \quad (3.24)$$

Um problema que se levanta num painel fotovoltaico prende-se com o sombreamento de uma ou várias células solares enquanto as outras continuam expostas à radiação. Esta condição de

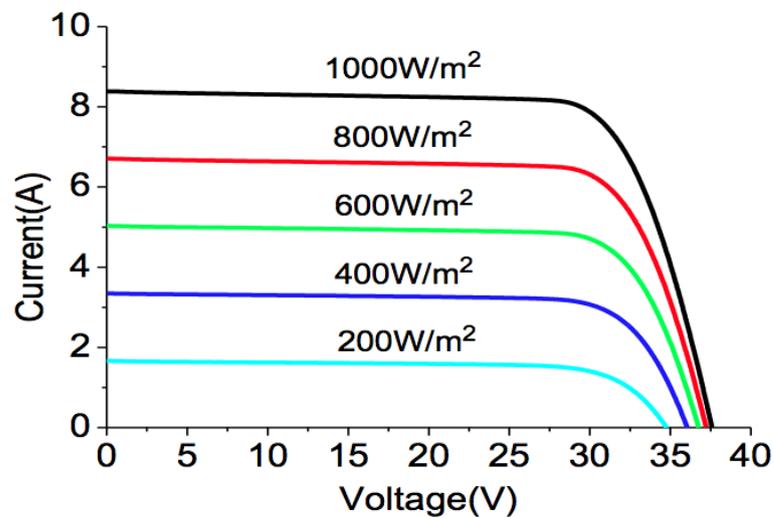


Figura 3.3: Efeito da Irradiância na curva I-V de um painel [39]

exploração pode ter consequências negativas para o rendimento do painel assim como pode, inclusive, danificar o módulo. Quando uma célula se encontra totalmente escurecida fica também inversamente polarizada funcionando como uma carga elétrica, ou seja, consumindo energia elétrica e libertando-a sob a forma de calor através do efeito de *Joule*. Esta condição pode levar ao sobreaquecimento da célula, formando o chamado "*ponto quente*", que pode destruir o módulo. Para solucionar este problema são utilizados díodos de *by-pass* para efetuarem o desvio de correntes, impedindo o sobreaquecimento, com penalização de produção mas com o benefício de não permitirem a degradação do módulo em causa [6].

3.2.3 Influência do ângulo de incidência

Muitas vezes negligência-se o ângulo de incidência da irradiância no painel fotovoltaico no que concerne às propriedades elétricas do sistema. Sendo que a irradiância varia ao longo do dia, assim como o espectro solar, é essencial aproveitar ao máximo o seu valor por forma a otimizar o rendimento do painel. Sabendo, então, que a energia produzida pelo painel deve-se somente à componente perpendicular dos raios solares, então quanto maior for o ângulo de incidência mais pequeno vai ser o aproveitamento. Portanto a utilização de um seguidor solar permite que o ângulo de incidência seja sempre perpendicular desde o nascer-do-sol até ao pôr-do-sol, otimizando então o rendimento do painel.

Como se pode ver na Fig.3.4 o aproveitamento de um painel fotovoltaico com seguidor solar vai ser claramente superior ao de um painel fixo.

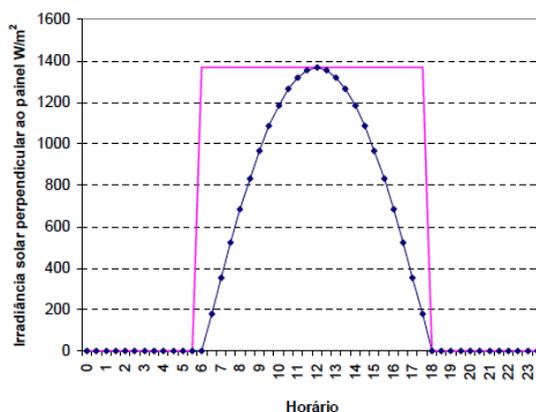


Figura 3.4: Comparação entre uma panela com seguidor solar (a rosa) e um painel fixo (a azul) em função da hora constante a irradiação média solar [40]

3.3 Implementação em MATLAB

A implementação em MATLAB seguiu o modelo elétrico apresentado em 3.1 e teve em conta os efeitos da irradiação 3.2.2 e da temperatura 3.2.1. Para o efeito foi feito um código baseado no código apresentado por *Ding et al.* [34]. Para desenhar as curvas I-V e P-V foi utilizado o Método de *Newton-Raphson*. Para que a simulação esteja de acordo com um dispositivo real recorreu-se à *datasheet* da empresa *EGing Photovoltaic Technology Co.,Ltd* presentes na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características mecânicas e elétricas do painel [39]

STC	EG-230-P60-C-DG
Nº de células	60
$P_{max}(W)$	230
$V_{MP}(V)$	29.99
$I_{MP}(A)$	7.67
$V_{OC}(V)$	36.98
$I_{SC}(A)$	8.24
$P_{max}(\%/C^{\circ})$	$-(0.43 \pm 0.05)$
$I_{SC}(\%/C^{\circ})$	0.04 ± 0.015
$V_{OC}(\%/C^{\circ})$	$-(0.325 \pm 0.1)$

STC: Irradiância $1000W/m^2$, Temperatura do módulo $25^{\circ}C$

3.3.1 Método de Newton-Raphson

Uma das principais dificuldades na implementação das equações do modelo elétrico prende-se com a dificuldade em determinar a corrente de saída I para uma determinada tensão. Como tal optou-se pela utilização do método de *Newton – Raphson* por forma a fazer o cálculo das variáveis do painel de forma expedita. O método de *Newton – Raphson* tem como objetivo determinar as

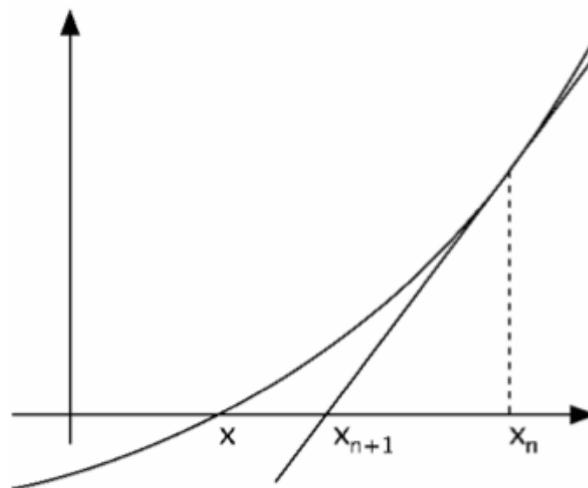


Figura 3.5: Método de Newton-Raphson [8]

raízes de uma dada função. Para proceder à realização do método é necessário fazer uma aproximação inicial perto do valor da solução ótima. Posto isto é calculada a reta tangente a essa função, a derivada, e a interseção dela com o eixo das abcissas por forma a encontrar uma solução melhor que a estimativa inicial. Executando este processo recursivamente, cria-se um método iterativo que permite encontrar o ponto de funcionamento do painel para uma dada tensão. O processo para quando a diferença entre dois valores calculados é suficientemente pequena, parâmetro programável pelo o utilizador. Este método permitiu de uma forma simples e rápida desenhar as curvas de funcionamento do painel. Através da variação da tensão para determinadas condições de irradiância e/ou de temperatura este método iterativo permitiu determinar a corrente em cada instante. A equação associada ao Método de *Newton – Raphson* é:

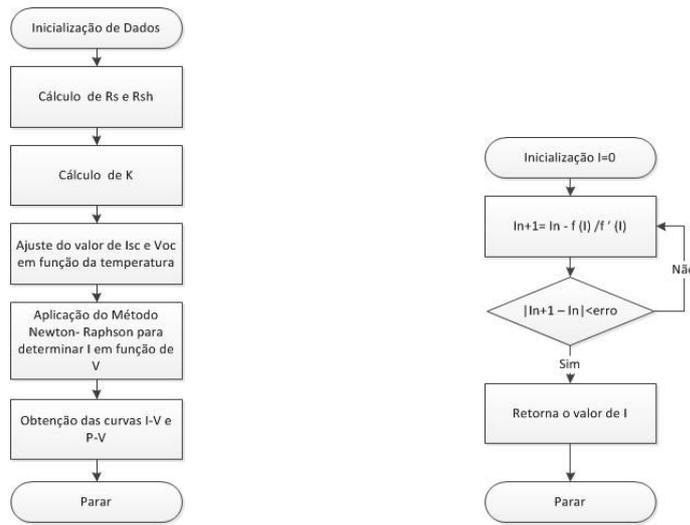
$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (3.25)$$

A Fig. 3.5 mostra graficamente a técnica utilizada para a determinação das raízes. A partir da função, da sua derivada e de uma solução inicial é possível determinar as raízes dessa mesma função para um determinado ponto de funcionamento, como ilustra a equação 3.25.

O algoritmo para o código e determinação dos parâmetros $I - V$ e $P - V$ assim como o algoritmo para o método de *Newton-Raphson* são apresentados na Fig. 3.6b.

3.3.2 Influência da Irradiância

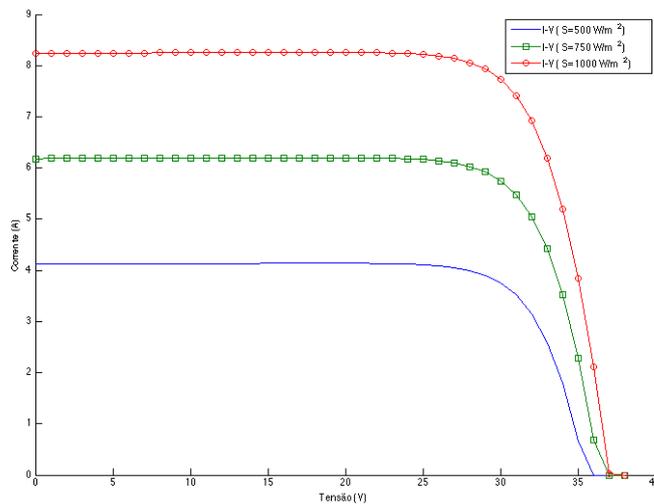
Na simulação deste modelo, o painel fotovoltaico em causa foi sujeito, através das equações do modelo elétrico 3.1 a diversas condições de irradiância. Desta forma é possível verificar o comportamento tanto da corrente como da potência em função da tensão para diferentes níveis de irradiância. Neste caso o painel fotovoltaico foi sujeito a três radiações solares distintas, $500W/m^2$,



(a) Algoritmo código implementado

(b) Algoritmo *Newton-Raphson*Figura 3.6: Algoritmos implementados para determinação das curvas $I - V$ e $P - V$

$750\text{W}/\text{m}^2$ e $1000\text{W}/\text{m}^2$, a temperatura constante, 25°C . A variação da corrente em relação à tensão, curva $I - V$, em função dos diferentes níveis de irradiância pode ser visto na Fig. 3.7.

Figura 3.7: Influência da irradiância na curva $I - V$ do painel

A variação da potência em relação à tensão, curva $P - V$, em função dos diferentes níveis de irradiância pode ser visto na Fig. 3.8.

Da análise destas duas figuras pode-se concluir que quanto maior a irradiância maior será a corrente e conseqüentemente a potência gerada pelo painel. Porém é necessário ter em conta o aumento da temperatura com o nível de irradiância, assunto abordado na secção a seguir.

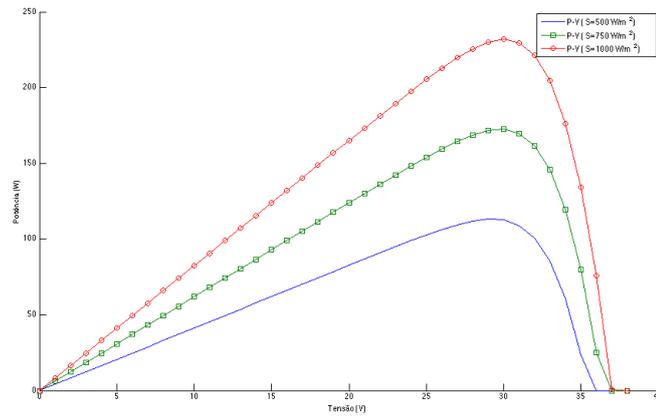


Figura 3.8: Influência da irradiância na curva P-V do painel

3.3.3 Influência da Temperatura

Na simulação deste modelo, o painel fotovoltaico em causa, foi sujeito, através das equações do modelo elétrico 3.1 a diversas condições de temperatura. Desta forma é possível verificar o comportamento tanto da corrente como da potência em função da tensão para diferentes temperaturas. Neste caso o painel fotovoltaico foi sujeito a três temperaturas distintas, 25°C , 50°C e 75°C , a irradiância constante, $1000\text{W}/\text{m}^2$. A variação da corrente em relação à tensão, curva $I - V$, em função das diferentes temperaturas pode ser vista na Fig. 3.9.

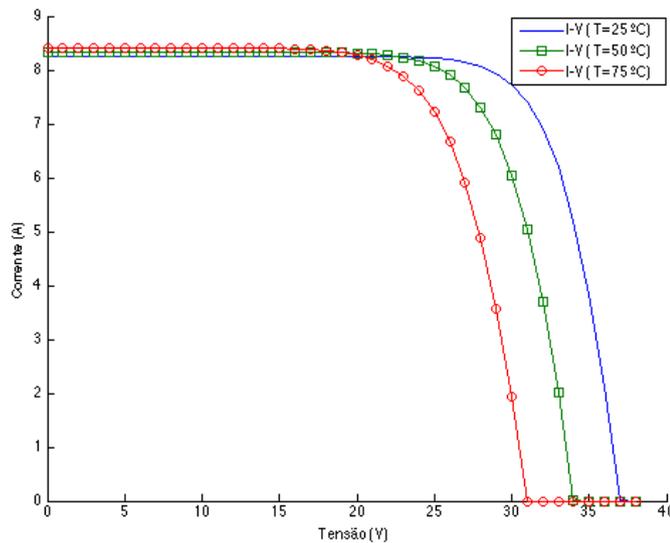


Figura 3.9: Influência da temperatura na curva I-V do painel

A variação da potência em relação à tensão, curva $P - V$, em função das diferentes temperaturas pode ser vista na Fig. 3.10.

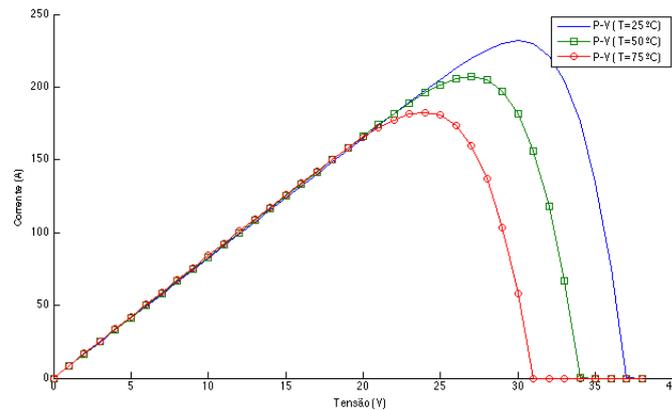


Figura 3.10: Influência da temperatura na curva P-V do painel

Como se pode constatar, a temperatura tem um efeito nefasto no painel fotovoltaico diminuindo o seu rendimento. Como visto anteriormente, dependendo do tipo de instalação do sistema 3.1, o painel está sempre sujeito às variações de temperatura que para além de diminuir a eficiência do mesmo também provocam um aceleramento da degradação do painel.

3.4 Implementação em PSIM

A atual versão do PSIM possui dois modelos por definição de painéis fotovoltaicos. O modelo funcional e o modelo físico. A principal diferença entre os dois modelos prende-se com a maior polivalência do modelo físico. Este permite simular com maior aproximação o comportamento do painel fotovoltaico para além de permitir ter em conta a irradiância e a variação de temperatura.

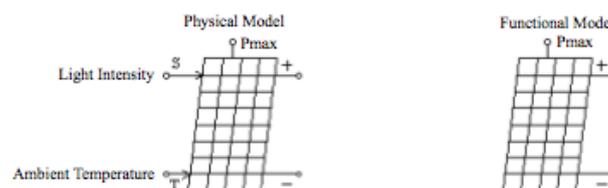


Figura 3.11: Modelo físico e funcional dos módulos disponíveis no PSIM [41]

Para que o modelo físico possa funcionar de acordo com a realidade é necessário introduzir alguns parâmetros [41]

- *Número de células* N_s - Número de células solares em série num módulo solar;
- *Irradiância em STC*, S_{ref} - Irradiância em condições STC, em W/m^2 . Tem o valor típico de $1000W/m^2$;
- *Temperatura de referência* T_{ref} - Temperatura em condições STC, em $^{\circ}C$;

- *Resistência em série* R_s - Resistência em série de cada célula solar, em Ohm;
- *Resistência de shunt* R_{sh} - Resistência de shunt de cada célula solar, em Ohm;
- *Corrente de curto-circuito* I_{sc} - Corrente de curto circuito do módulo solar à temperatura de referência, em Ampere ;
- *Corrente de saturação* I_s - Corrente de saturação do díodo do modelo, em Ampere;
- *Energia de banda* E_g - Energia de banda de cada célula solar, em eV;
- *Fator ideal* A - Fator ideal, também denominado como coeficiente de emissão, do díodo do modelo;
- *Coeficiente de Temperatura* C_t - Coeficiente de temperatura, em Ampere/Kelvin;
- *Coeficiente* K_s - Coeficiente que define a temperatura da célula solar com base na irradiância.

O esquema elétrico deste modelo físico é semelhante ao apresentado anteriormente 3.1, porém as equações que o definem não são exatamente as mesmas:

$$i = i_{ph} - i_d - i_r \quad (3.26)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} + C_t(T - T_{ref}) \quad (3.27)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{AKT}} - 1 \right) \quad (3.28)$$

$$I_0 = I_s \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.29)$$

$$i_r = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (3.30)$$

$$V_d = \frac{v}{N_s} + iR_s \quad (3.31)$$

$$T = T_a + k_s S \quad (3.32)$$

Onde q representa a carga do eletrão ($q = 1.6 * 10^{-19}C$); k é a constante de *Boltzmann* ($k = 1.3806505 * 10^{-23}$); S é a irradiância; T_a é a temperatura ambiente; v é a tensão de todo o módulo solar; e i é a corrente aos terminais do painel solar.

O PSIM também dispõe de uma ferramenta onde os parâmetros podem ser obtidos diretamente das *datasheets* dos construtores, sendo os restantes parâmetros obtidos por tentativa-erro. Esta ferramenta é de fácil uso e tem uma interface bastante apelativa que permite inserir os principais dados e características de um dado painel fotovoltaico. Através desta informação é possível

determinar as características I_V e P_V assim como informa o utilizador das condições de MPP para diversas situações de irradiância e temperatura. Tem ainda uma secção onde, através dos dados introduzidos, é possível calcular os parâmetros do modelo tais como a resistência em série, a corrente de curto-circuito, a corrente de saturação e ainda o coeficiente de temperatura.

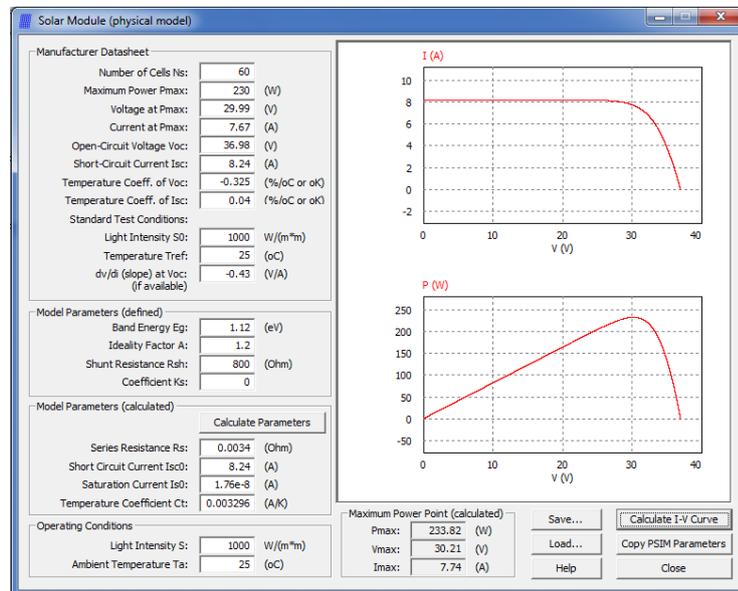


Figura 3.12: Layout da interface gráfica da ferramenta: *Solar Module (physical model)* [41]

Esta ferramenta constrói ainda as curvas $I - V$ e $P - V$. De acordo com a *datasheet* do painel fotovoltaico em causa foi possível traçar estas curvas tendo sido obtido o seguinte resultado:

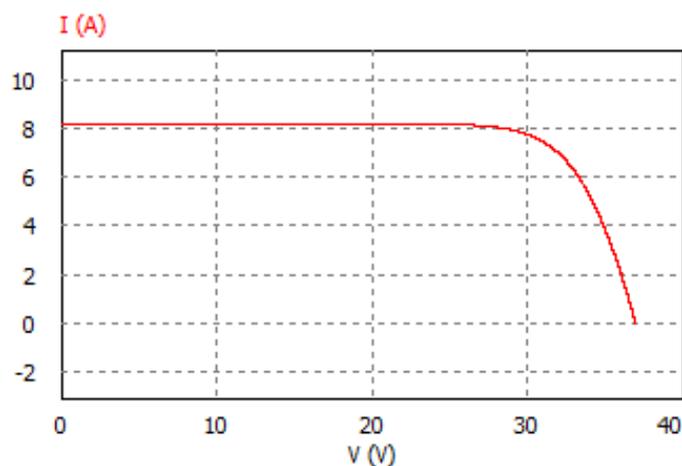


Figura 3.13: Curva $I - V$ com $S = 1000W/m^2$ e $T = 25^\circ C$

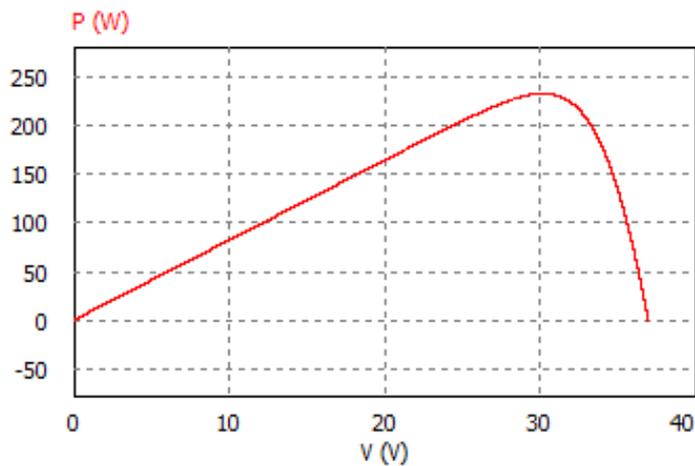


Figura 3.14: Curva $P - V$ com $S = 1000W/m^2$ e $T = 25^{\circ}C$

3.4.1 Influência da temperatura e irradiância

Como visto anteriormente a temperatura e irradiância desempenham um papel fundamental no funcionamento do painel fotovoltaico. O aumento de temperatura provoca uma diminuição da potência de saída. Este aumento de temperatura é provocado pelo tipo de instalação do painel, como visto na 3.1. É também provocado pelo maior ou menor nível de irradiância que incide no painel.

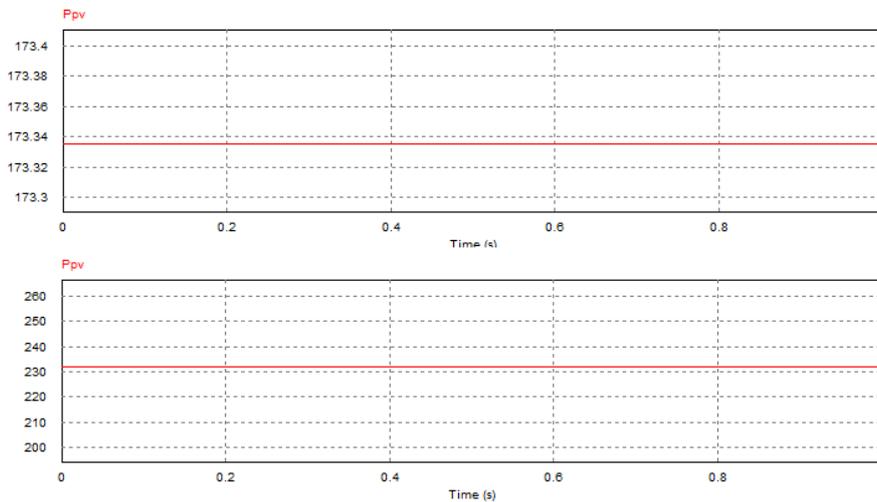


Figura 3.15: Valor de potência para irradiância constante, $1000w/m^2$, com coeficientes de Ross de 0.058, imagem superior, e de 0, na imagem inferior.

Como é possível observar na Fig. 3.15, o valor da potência é significativamente afetado pela temperatura no painel fotovoltaico.

A irradiância contribui também, de forma ativa, para a potência de saída do painel. Como visto nas secções anteriores, verifica-se, que com um aumento da temperatura, existe uma diminuição da tensão.

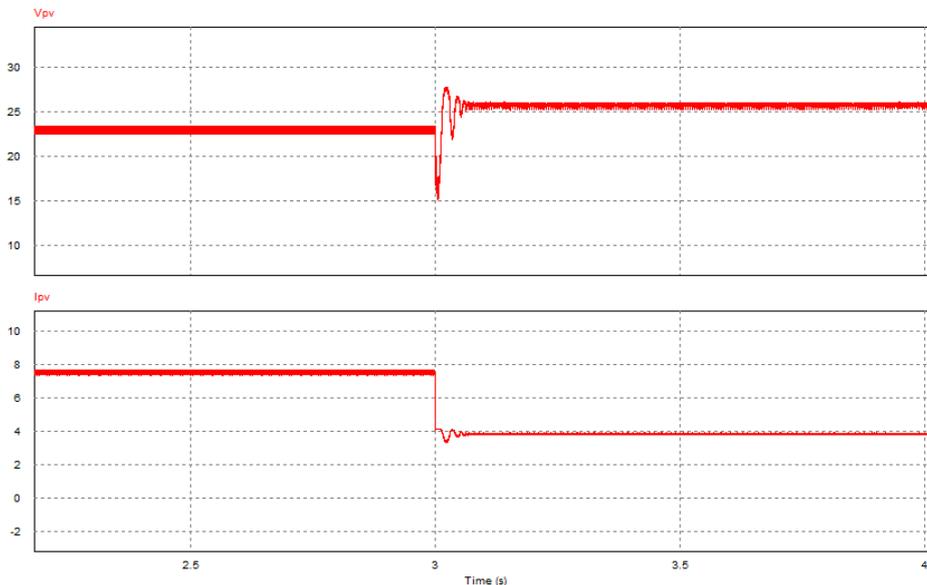


Figura 3.16: Resposta do painel fotovoltaico a variações de irradiância com um algoritmo *MPPT*

Na Fig. 3.16 verifica-se que, com uma diminuição da irradiância de $1000W/m^2$ para $500W/m^2$, a tensão do painel aumenta ligeiramente, pois a temperatura também diminui. A variação na irradiância provoca uma diminuição na potência de saída graças à considerável redução da corrente de saída do painel. O funcionamento do algoritmo *MPPT* e a sua resposta às variações de irradiância será explicada na secção 5.3.

3.5 Conclusões

Neste capítulo foi abordado, fundamentalmente, a resposta de um painel fotovoltaico sobre várias condições de temperatura, irradiância e ângulo de incidência da radiação solar. Com base no comportamento do painel, é possível concluir que o seu rendimento será tanto melhor quanto maior for o nível de irradiância, quanto mais baixa for a sua temperatura e quanto mais perpendicular for a incidência da radiação solar no painel.

É possível também constatar, pela análise do modelo em PSIM em comparação com o modelo simulado em MATLAB, uma grande proximidade de resultados tendo em conta que as equações que definem cada modelo são ligeiramente diferentes.

Capítulo 4

Sistema Termoelétrico

Neste capítulo será apresentado e estudado um sistema termoelétrico. Será apresentado um enquadramento temporal dos principais efeitos - *Seebeck* e *Peltier* - assim como a constituição de um gerador termoelétrico. À semelhança do capítulo anterior também irá ser estudado o seu modelo elétrico e a sua implementação em MATLAB e PSIM. Irá ser também estudada a necessidade de refrigeração neste sistema como forma de otimizar a sua potência de saída.

4.1 Efeito de Seebeck

O efeito de *Seebeck* foi descoberto por *Thomas Seebeck* em 1821 e está relacionado com a produção de energia num condutor sujeito a uma diferença de temperatura. *Seebeck* constatou que a deflexão provocada na agulha, elemento utilizado na experiência, dependia da diferença de temperatura entre as junções e dos materiais utilizados como condutores [42]. Desta forma, pode-se dizer que a existência de um gradiente de temperatura (ΔT) num determinado condutor, produz uma diferença de potencial elétrico (ΔV) e, por conseguinte, um fluxo de corrente elétrica quando o circuito se encontra fechado, fazendo com que os eletrões se desloquem da zona mais quente para a zona mais fria. Esta diferença de potencial por unidade de diferença de temperatura é conhecida por Coeficiente de *Seebeck* e é dada pela equação 4.1:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (4.1)$$

Onde α vem em (V/C°). Este efeito tem diversas aplicações sendo as mais comuns os sensores de temperatura, essencialmente termo-pares, e os geradores termoelétricos.

4.2 Efeito de Peltier

Cerca de uma década mais tarde foi descoberto pelo físico francês *Jean Charles Peltier* um efeito semelhante. *Peltier* observou que quando uma corrente atravessa uma junção entre dois condutores de materiais diferentes, existe um aumento da diferença de temperatura entre os condutores [42]. *Peltier* verificou também que, dependendo do sentido da corrente, é possível determinar qual

Tabela 4.1: Coeficientes *Seebeck* a 0°C de diversos materiais termoelétricos [13]

Material	Coeficiente de <i>Seebeck</i> ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Alumínio	3.5
Antimônio	47.0
Bismuto	-72.0
Cádmio	7.5
Carbono	3.0
Chumbo	4.0
Cobre	6.5
Ferro	19.0
Germânio	300.0
Ouro	6.5
Platina	0.0
Prata	6.5
Tântalo	4.5
Telúrio	500.0
Tungstênio	7.5

das junções liberta ou absorve calor. O efeito de *Peltier* pode ser utilizado nas mais diversas áreas que englobem a refrigeração, desde câmaras frigoríficas até à eletrônica existe uma variedade muito grande de aplicações; o efeito de Peltier pode ser utilizado como princípio de refrigeração ativo [27].

Anos mais tarde, *Thomson*, estabeleceu uma relação entre estes dois efeitos, *Seebeck* e *Peltier* [13]. Assim define-se o coeficiente de *Peltier*, $\pi(\text{V})$, como o produto entre o coeficiente de *Seebeck*, α , pela temperatura absoluta T .

$$\pi = \alpha.T \quad (4.2)$$

4.3 Constituição de um Gerador Termoelétrico

Como dito anteriormente, os geradores termoelétricos têm como princípio a conversão de energia térmica em energia elétrica. Quando existe um circuito formado por dois metais termoelétricos 4.1, este passa a ser uma fonte de uma diferença de potencial logo que são sujeitas a diferentes temperaturas. O modo de funcionamento de um gerador termoelétrico é também muito simples. Uma fonte de calor aquece a junção quente dos materiais provocando assim um movimento de elétrons. Os elementos constituintes de um TEG têm também diferentes características. Os materiais que possuem um coeficiente de *Seebeck* positivo são elementos termoelétricos do tipo P. Os materiais com um coeficiente de *Seebeck* negativo constituem os elementos do tipo N. A junção fria do gerador termoelétrico tem como principal função dissipar o calor. Para executar esta função pode-se recorrer à convecção natural ou a outras formas *forçadas* de refrigeração como por exemplo o recurso a dissipadores de calor ou refrigeração a água [13].

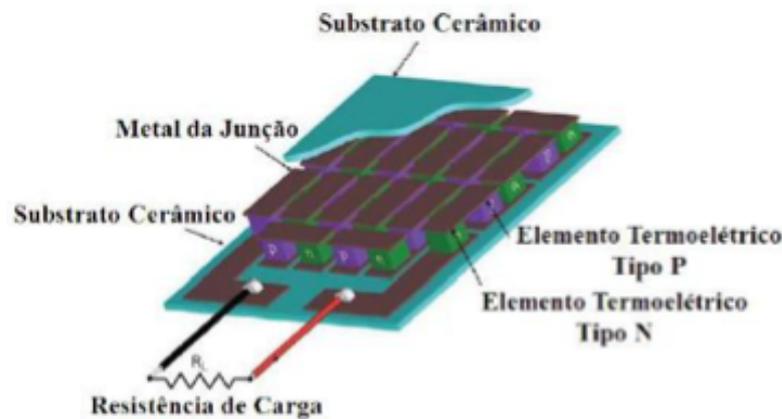


Figura 4.1: Estrutura típica de um gerador termoelétrico [13]

Para maximizar a diferença de potencial à saída do circuito é feita a ligação elétrica das junções em série, fazendo com que a diferença de potencial à saída seja a soma da diferença de potencial em cada junção. Termicamente é feita uma ligação das junções em paralelo para que estas tenham uma diferença de temperatura aproximadamente constante entre elas. Atualmente os materiais mais utilizados na constituição dos elementos termoelétricos dos geradores são os que apresenta a tabela 4.2.

4.3.1 Dissipadores de Calor

Os dissipadores de calor são, hoje em dia, uma parte vital na constituição de circuitos eletrônicos. Estes permitem que se melhorem rendimentos e consequentes aumentos de potência evitando que os componentes trabalhem a níveis de temperatura insatisfatórios e, por essa razão, aumentem o seu tempo de vida útil. Componentes que atingem elevadas temperaturas de funcionamento como os díodos, transístores e microprocessadores devem possuir dissipadores de calor pois acima de uma determinada temperatura começam a sofrer alterações no seu funcionamento. A refrigeração é portanto um elemento essencial no que toca à eletrónica.

Existem diversas formas de se proceder à refrigeração. Pode-se utilizar refrigeração *forçada* através de água que por meio da condução dissipa o calor de um determinado componente. Porém, a forma de refrigeração mais recorrente é a utilização de dissipadores de calor que absorvem o

Tabela 4.2: Coeficientes *Seebeck* à temperatura ambiente de diversos materiais termoelétricos [43]

Material	Coeficiente de <i>Seebeck</i> ($\mu V/^{\circ}C$)
Níquel	-18
Crómio	18
Bismuto	-60
Antimónio	40
Telureto de Bismuto	-240
Telureto de Antimónio	92

calor de um determinado componente por condução e dissipam esse mesmo calor por convecção. Os dissipadores de calor devem ter uma boa capacidade de condução térmica, como são o caso do Cobre ($401W/mK$ a $300K$) e das ligas de alumínio ($237W/mK$ a $300K$) [44]. Normalmente os dissipadores de calor possuem uma forma que permite que exista uma superfície de contacto ajustada ao componente em questão por forma a existir um aumento na transferência de calor e uma forma que permita o aumento da área de dissipação.

No que toca à dissipação podem ser utilizados dispositivos de ventilação para melhorar a refrigeração de determinado componente. A utilização destes dispositivos em geradores termoelétricos é de vital importância pois permitem refrigerar a junção fria por forma a obter melhores diferenças de temperatura no módulo.

4.3.2 Figura de Mérito

Todavia ambos os efeitos dependem fortemente dos materiais utilizados e das suas características. Estes materiais são determinantes para a eficiência dos módulos termoelétricos. A eficiência de um dispositivo termoelétrico depende da temperatura de operação dos materiais assim como das características dos materiais, o que pode ser expresso pela figura de mérito, Z :

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} \quad (4.3)$$

Onde α representa o coeficiente de Seebeck, ρ a resistividade elétrica, k a condutividade térmica. Pela equação 4.3 é possível verificar que quanto maior é a resistividade elétrica e a condutividade térmica do material, maior é o aquecimento por efeito de joule prejudicando a figura de mérito. O efeito de Joule verifica-se quando uma corrente atravessa um condutor e é gerado calor.

A figura de mérito pode ser expressa também na forma adimensional ZT :

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} \cdot T \quad (4.4)$$

Como se constata, um material termoelétrico deve ter um elevado coeficiente de *Seebeck*, baixa resistividade e condutividade térmica. Quanto maior for a figura de mérito maior será a diferença de potencial gerada para uma mesma unidade de diferença de temperatura. Apesar do grande investimento que se tem vindo a fazer para conseguir materiais que possuam estas características por forma a melhorar a figura de mérito, esta ainda tem valores reduzidos ($ZT = 1$ à temperatura ambiente). A tabela 4.3 mostra alguns dos materiais utilizados nos geradores termoelétricos assim como as suas características.

Como se pode ver, à temperatura ambiente os compostos Telúrio (*Te*), Bismuto (*Bi*) e Antimónio (*Sb*), são os materiais semicondutores que apresentam a maior figura de mérito. Para outras temperaturas utilizam-se outros materiais como por exemplo as ligas de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) muito utilizadas a baixas temperaturas ($200K - 400K$) e constituem também o material

Tabela 4.3: Figura de mérito dos principais materiais termoelétricos [44]

Material	Coef. de Seebeck ($\mu V/^{\circ}C$)	Res. Elétrica ($\mu\Omega m$)	Cond. Térmica ($W/m^{\circ}C$)	Fig. de Mérito (300K)	de ZT
Níquel	-18	0.07	91	0.015	
Crómio	18	0.13	94	0.008	
. Bismuto	-60	1.15	8.4	0.110	
Antimónio	40	0.42	18.5	0.062	
Telureto de Bis- muto	-240	10	2.02	0.860	
Telureto de An- timónio	92	3.23	1.63	0.480	

mais utilizado no fabrico de geradores termoelétricos. A figura de mérito, porém, sofre uma variação com a temperatura sendo, portanto, essencial fazer uma seleção cuidadosa dos materiais em função da sua aplicação.

4.4 Modelo elétrico

Um módulo termoelétrico com base no efeito de Seebeck, como referido na secção 4.1 gera uma tensão a partir da diferença de temperatura de duas junções de um material semiconductor e quanto maior é a diferença de temperaturas maior será a tensão de saída [4, 25, 26] e é dada pela seguinte equação:

$$V = N \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT \quad (4.5)$$

Onde α_A e α_B são os coeficientes de Seebeck e T_1 e T_2 são as temperaturas das duas junções e N o número de junções.

Os geradores termoelétricos, à semelhança dos painéis fotovoltaicos, podem ser ligados em série por forma a obter maiores valores de tensão na saída ou em paralelo para elevar os níveis de corrente entregues.

Assumindo que $\Delta T = T_1 - T_2$, a diferença de temperatura entre as junções, e $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$, o coeficiente de Seebeck expresso em $V/^{\circ}C$, α_B e α_A os coeficientes de Seebeck respeitantes aos materiais p e n de cada módulo, então pode-se obter a seguinte expressão:

$$V_i = \alpha \Delta T \quad (4.6)$$

Sendo V_i a tensão gerada na entrada.

O circuito elétrico equivalente para um módulo termoelétrico pode ser visto na figura que a seguir se apresenta. A tensão de saída é a tensão aos terminais do módulo, V_i a tensão gerada (V) e R_1 a resistência interna do módulo.

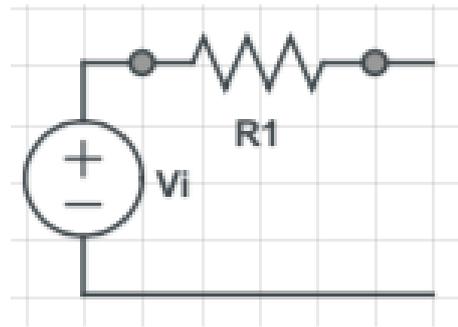


Figura 4.2: Esquema de elétrico de um módulo termoelétrico

Este circuito não está ligado a nenhuma carga e, por isso, não existirá corrente elétrica a percorrer o circuito e portanto a tensão de saída será nula. Se por ventura se ligar uma carga R_L aos terminais do circuito, então existirá uma corrente I_L que fluirá pela carga. Esta corrente é determinada pela queda de tensão nas duas resistências em série.

$$I_L = \frac{V_i}{R_1 + R_L} \quad (4.7)$$

A tensão na resistência R_L pode ser escrita em função da temperatura e do coeficiente de *Seebeck* obtendo a seguinte expressão:

$$V_L = \alpha \Delta T - \frac{\alpha \Delta T \cdot R_i}{R_i + R_L} \quad (4.8)$$

Por análise do circuito é também possível determinar potência dissipada na carga pela equação 4.9.

$$P_L = I_L^2 \cdot R_L \quad (4.9)$$

Desta forma é possível determinar a potência gerada em função da tensão gerada substituindo I_L da equação 4.7.

$$P_L = \frac{V_i^2 R_L}{(R_1 + R_L)^2} \quad (4.10)$$

4.4.1 Potência Máxima de Saída

A potência máxima entregue à carga (P_{max}) é obtida derivando a expressão da potência elétrica em ordem a R_L por forma a obter o máximo da função [13].

$$P_L = \frac{V_i^2 R_1 - R_L}{(R_1 + R_L)^3} \quad (4.11)$$

Determinando os zeros da derivada é possível determinar o máximo da função.

$$\frac{V_i^2 R_1 - R_L}{(R_1 + R_L)^3} = 0 \quad (4.12)$$

Obtendo-se $V_i = 0$ e $R_L = R_1$, pois ambas as resistências têm valor não nulo. Assim o valor máximo da potência entregue à carga é obtido quando a resistência $R_L = R_1$ e, portanto, pode escrever-se a equação da potência máxima onde $R_i = R_1 = R_{max}$.

$$P_{L,max} = \frac{V^2}{4R_{max}} \quad (4.13)$$

4.4.2 Rendimento do gerador termoeletrico

A eficiência de um módulo termoeletrico pode, então, ser definido na equação 4.14.

$$\eta_e = \eta_{Carnot} \frac{\sqrt{1 + ZT_M} - 1}{\sqrt{1 + ZT_M} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (4.14)$$

Onde T_c é a temperatura do lado frio, T_h a temperatura do lado quente e ZT_M o valor efetivo de ZT do material termoeletrico entre T_c e T_h [4]

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (4.15)$$

Fazendo uma breve análise da equação acima, é de fácil constatação que quanto maior for a diferença de temperatura e quanto maior for a figura de mérito ZT, maior será a eficiência do dispositivo termoeletrico. Os melhores materiais disponíveis para comercialização ainda têm um ZT de aproximadamente 1. Porém, recentes avanços na mecânica quântica e nos nano-materiais permitiram que este ZT fosse elevado até 2.4 [27] e, inclusivamente, atingisse o valor de 4 como reportado por Tavkhelidze em 2002 [31]. Os dispositivos termoeletricos têm um elevado potencial e com a evolução da engenharia dos materiais, da mecânica quântica e dos nano-materiais vai ser possível aumentar a sua eficiência. Estes dispositivos têm também a vantagem de serem relativamente compactos e facilmente adaptáveis a qualquer solução.

4.4.3 Modelo do TEG

O gerador termoeletrico é um dos pontos essenciais deste estudo. Decorrente deste facto foi realizado um estudo do mercado onde foram analisadas diferentes soluções. Este estudo procurou, sobretudo, escolher o gerador termoeletrico tendo em conta fatores como o preço, a temperatura de funcionamento e a potência máxima. Assim escolheu-se, para efeito de validação do modelo, o gerador do fabricante *Eureca* - TEG1-40-40-10/100 [45]. Este gerador termoeletrico tem um coeficiente de *Seebeck* de $0.082V/K$, uma resistência interna de 1.6Ω e uma temperatura máxima de operação de $120^\circ C$.

4.4.3.1 Modelo em Matlab

Por forma a estudar o comportamento teórico do TEG escolhido, desenvolveu-se um algoritmo matemático com o objetivo de avaliar o comportamento do gerador termoelétrico sobre diferentes condições de temperatura.

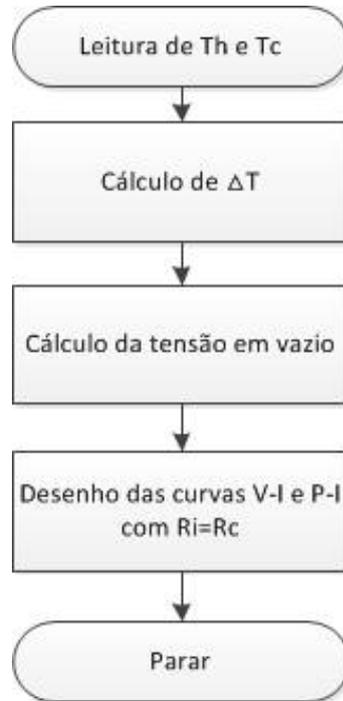


Figura 4.3: Algoritmo implementado para determinação das características do TEG com $T_c = 20^\circ\text{C}$

Desta forma foi possível desenhar as curvas $V - I$ e $P - I$ em função de diferentes temperaturas. Para a determinação destas curvas considerou-se uma resistência de carga igual à resistência interna do gerador termoelétrico. Para calcular a tensão de saída V_L recorreu-se à equação 4.8. De referir ainda que se considerou a resistência interna constante ao longo da simulação. Esta resistência tem o valor da situação de máxima potência. Como se pode observar pela equação 4.16

$$R_i = \frac{\alpha^2 \Delta T_{ins}^2}{4P_{L,max}} \quad (4.16)$$

Na equação 4.16, a resistência interna diminui à medida que a diferença de temperatura diminui, portanto os resultados foram obtidos por defeito, esperando-se resultados ligeiramente melhores na realidade.

As figuras 4.4 e 4.5 mostram o comportamento da tensão em relação à corrente e da potência em relação à corrente para diversos estados de funcionamento, ou seja, a diferentes diferenças de temperatura.

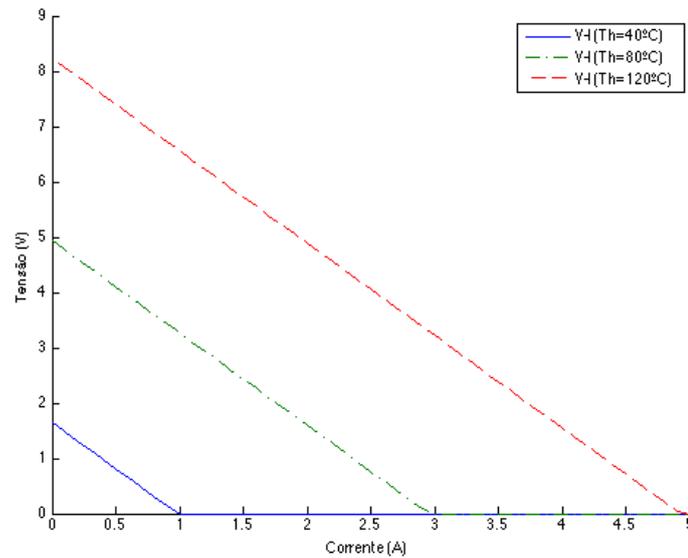


Figura 4.4: Curva V-I para diferentes diferenças de temperatura com $T_c = 20^\circ\text{C}$

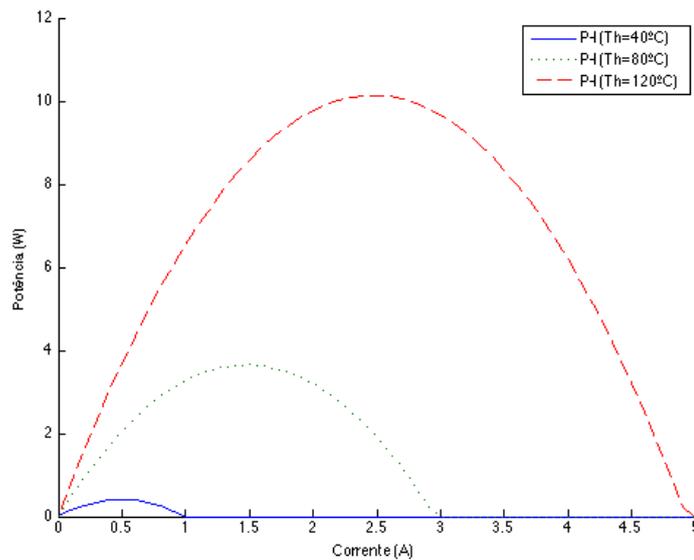


Figura 4.5: Curva P-I para diferentes diferenças de temperatura com $T_c = 20^\circ\text{C}$

4.4.3.2 Modelo em PSIM

Para reproduzir o modelo elétrico no PSIM recorreu-se a uma fonte de tensão controlada e a uma resistência representativa da resistência interna do gerador termoelétrico. A fonte de tensão controlada tem como entrada uma determinada tensão que é determinada por um *Simplified C-Block*. Este bloco permite, consoante as entradas, gerar um valor de tensão. Este valor de tensão

é determinado a partir da equação 4.6. Desta forma, é possível, através das entradas - coeficiente de *Seebeck*, coeficiente de *Ross*, temperatura ambiente e irradiância - determinar a tensão V_i do gerador termoelétrico. Para fazer uma representação o mais aproximada possível do sistema foi colocada uma resistência, como se pode ver na Fig. 4.6, que pretende reproduzir a resistência interna do TEG.

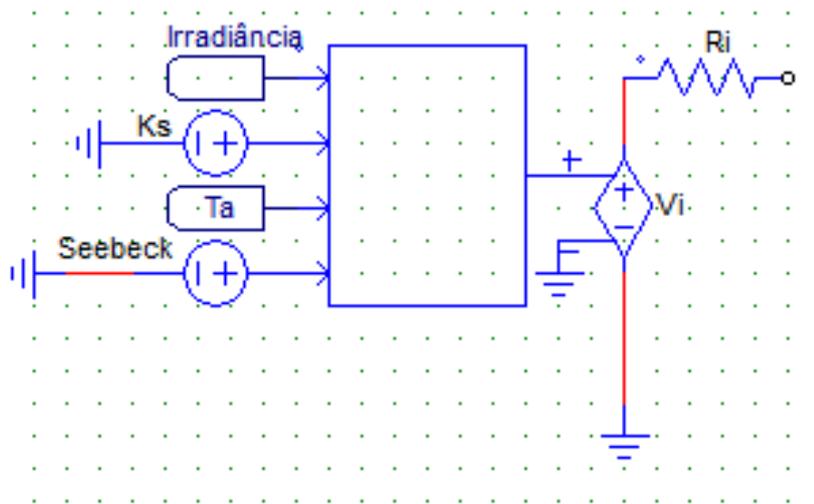


Figura 4.6: Esquema utilizado para a representação do Gerador Termoelétrico em PSIM

4.4.3.3 Influência da temperatura

Visto o funcionamento de um gerador termoelétrico depender da diferença de temperatura aos seus terminais, foi realizada uma simulação para validação do modelo.

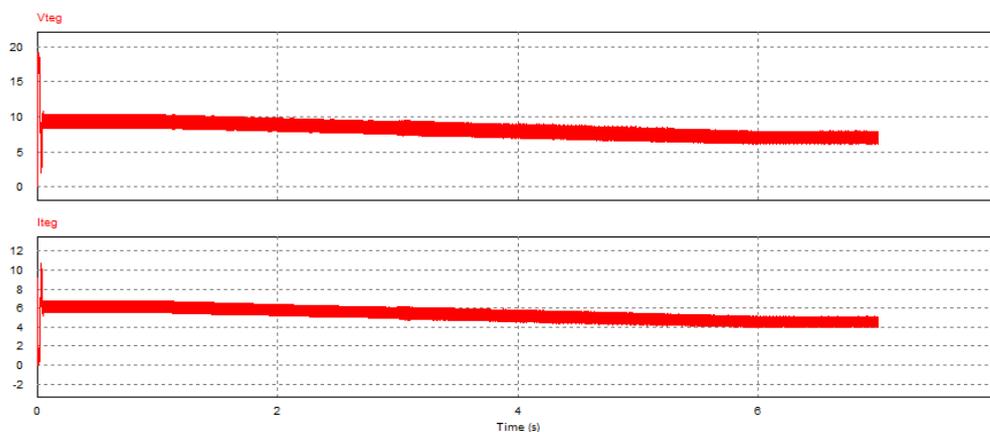


Figura 4.7: Influência da temperatura na tensão e na corrente de saída do TEG

Na Fig. 4.7, foi variada a temperatura do TEG de uma forma lenta e sob a forma de variação de irradiância. Em variações instantâneas de irradiância, o valor da temperatura não varia instantaneamente, mas sim de uma forma lenta. Assim, pode-se verificar que com uma diminuição progressiva da irradiância, de $2000W/m^2$ para $1500W/m^2$, verifica-se uma diminuição tanto da tensão como da corrente aos seus terminais.

4.5 Conclusões

Neste capítulo foram abordados os principais efeitos que podem ser verificados num gerador termoelétrico e as suas potenciais aplicações. Foi feita uma análise ao modelo elétrico concluindo-se que quanto maior a diferença de temperatura entre as junções do gerador maior será a tensão de saída e que os materiais constituintes do gerador protagonizam um papel essencial nesta. Estes materiais devem ter um elevado coeficiente de *Seebeck*, baixa resistividade e elevada condutividade térmica. As simulações realizadas permitem confirmar, de acordo com o modelo elétrico, estas mesmas conclusões. Um algoritmo *MPPT* deve também ser implementado quando a este sistema estiver ligado um conversor.

Capítulo 5

Conversor DC-DC e respetivo controlo

Neste capítulo vai ser discutido o dimensionamento dos conversores e a sua resposta em frequência assim como será feita uma análise ao sistema por forma a escolher o controlo adequado tendo em conta a sua aplicação. Os esquemas utilizados para efetuar as simulações dos diferentes métodos de controlo baseiam-se na arquitetura do sistema que vai ser apresentada com um maior detalhe na secção 6.1. A principal diferença para esse modelo é a não utilização de um barramento.

5.1 Arquitetura simplificada do sistema

Numa primeira fase foi utilizado um esquema simplificado do sistema. Um esquema composto pelo painel fotovoltaico e gerador termoelétrico, e respetivos conversores ligados, a uma carga comum, como se pode ver na Fig. 5.1. Este sistema permite, de uma forma simplificada, retirar algumas conclusões importantes tais como o método de controlo do conversor e o *MPPT* a utilizar. A carga, uma resistência que pretende simular as exigências da rede, tem como objetivo, numa primeira fase, criar uma exigência de potência ao sistema para que possam ser efetuados alguns estudos preliminares.

5.2 Dimensionamento do Conversor

Como referido em capítulos anteriores, este conversor tem como objetivo elevar a tensão para um determinado valor desejado. Tendo em conta as entradas de tensão de cada um dos sistemas, fotovoltaico e termoelétrico, estas são aproximadamente iguais e assim pode ser utilizado o mesmo conversor.

Num conversor *step-up*, o *duty-cycle* é ajustado por forma a regular a tensão de saída que se pretende de 100V. A tensão de entrada varia entre 25 e 30V. A potência máxima de saída do painel é 230W. Por razões de estabilidade e para o bom funcionamento do conversor, pretende-se que este opere em modo de condução contínua. A frequência de comutação é de 10kHz e assumiu-se que os componentes são ideais e que o condensador tem uma capacidade muito grande.

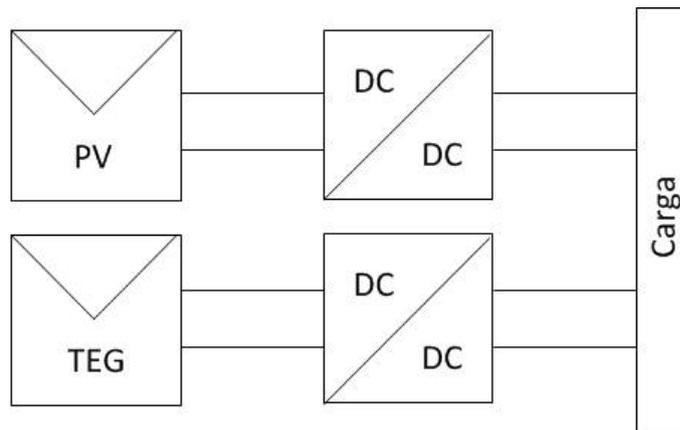


Figura 5.1: Arquitetura simplificada do sistema

Para descobrir o menor valor da indutância para manter a corrente em modo de condução contínua é necessário considerar que esta está no limiar da condução contínua-descontínua. De acordo com a equação 2.11, verifica-se que o *duty-cycle* é $D = 0.75$, que pela Fig. 2.12 corresponde ao valor mais baixo que I_{oB} pode assumir antes de entrar em descontinuidade.

Assim, utilizando a equação 2.14, com $D = 0.75$ e $I_{oB} = I_{o,max} = \frac{P_{max}}{V_o}$,

$$L = \frac{10 * 10^{-6} * 100}{2 * 2.3} 0.75(1 - 0.75)^2 = 10\mu H \quad (5.1)$$

Com uma indutância de $10\mu H$ o conversor está a funcionar no limite da condução contínua. Por essa razão, para assegurar um modo de condução contínua é necessário que uma indutância de valor superior seja utilizada.

Resumindo, os resultados obtidos foram:

- *Duty-Cycle*

$D = 0.75$ de acordo com a equação 2.11

- Bobina

$I_L = 2A$ (considerou-se $I_L = I_i$)

$\Delta I_L = I_L * 5\% = 0.1A$

$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = 2.1A$

$L_{min} = 10\mu H$ (da equação 2.29)

- MOSFET

$I_d > I_{L,max} > 2.1A$ (corrente de dreno)

$V_{DS} > 1.5V_o > 150V$ (tensão dreno-fonte)

- Díodo

$I_{F(AV)} > I_{L,max} > 2.1A$ (Corrente média)

$V_r > V_o > 100V$ (Tensão de bloqueio DC)

5.2.1 Resposta em frequência

O comportamento dos conversores pode ser estudado de diversas formas. Contudo, o recurso ao diagrama de Bode para analisar o comportamento da amplitude e da fase em função da frequência é um dos métodos mais utilizados. A partir deste diagrama é possível prever o comportamento do conversor assim como, através da sua análise, projetar um conversor que permita otimizar a sua forma de atuação.

O conversor *Step-Up* tem como função de transferência a equação 5.2 [46],

$$G_{vd}(s) = G_{d0} \frac{\left(1 - \frac{s}{w_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{Qw_0} + \left(\frac{s}{w_0}\right)^2\right)} \quad (5.2)$$

G_{d0} representa o ganho DC e é definido como,

$$G_{d0} = \frac{V_o}{1-D} \quad (5.3)$$

Q representa o fator de qualidade,

$$Q = (1-D) \cdot R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5.4)$$

w_z representa a frequência angular do zero,

$$w_z = \frac{(1-D)^2 R}{L} \quad (5.5)$$

w_0 representa a frequência angular de corte,

$$w_0 = \frac{1-D}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (5.6)$$

Desta forma, e de acordo com o dimensionamento, estes parâmetros assumem os seguintes valores, para uma carga de 10 Ω :

- $G_{d0} = 400V \Rightarrow 53dBV$
- $Q = 5.96 \Rightarrow 35dB$
- $w_z = 6.25 \times 10^4 \text{ rad/s}$
- $f_z = \frac{w_z}{2\pi} = 9.93 \text{ kHz}$
- $w_0 = 1.047 \times 10^4 \text{ rad/s}$
- $f_0 = \frac{w_0}{2\pi} = 1.66 \text{ kHz}$

A função de transferência adquire a forma:

$$G_{vd}(s) = 400 \frac{\left(1 - \frac{s}{6.25 \cdot 10^4}\right)}{\left(1 + \frac{s}{5.96 \cdot 1.047 \cdot 10^4} + \left(\frac{s^2}{1.096 \cdot 10^8}\right)\right)} \quad (5.7)$$

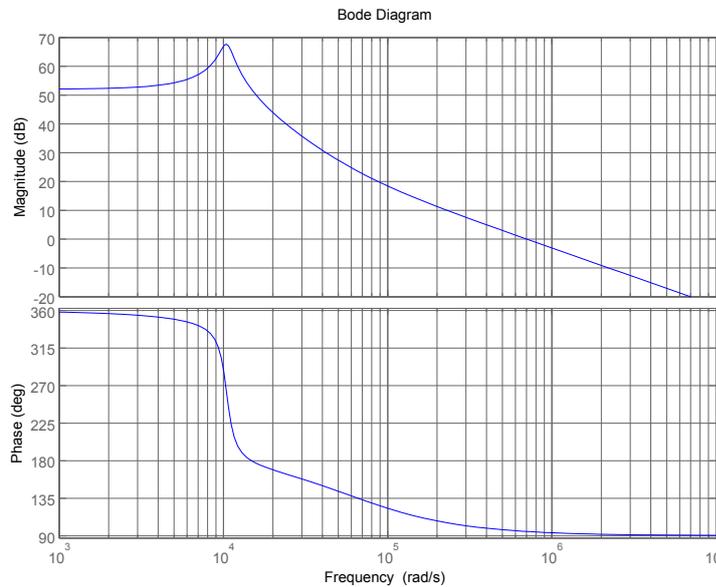


Figura 5.2: Diagrama de Bode em amplitude e fase do *step-up* para uma carga de 10 Ω

Na Fig. 5.2 a amplitude começa em G_{d0} , 52dBV, e continua até atingir ω_0 , $1.047 \cdot 10^4$ e aumenta em 35dB, correspondente ao valor de Q . A partir deste ponto, amplitude máxima, o declive do gráfico passa a ser de $-40\text{dB}/\text{dec}$ devido à influência dos dois polos. A partir de $\omega_z = 6.25 \cdot 10^4$ a influência do zero atenua este decaimento para $-20\text{dB}/\text{dec}$.

No traçado da fase, os polos têm influência em $10^{\frac{-1}{2Q}}$ e em $10^{\frac{-1}{2Q}}$. A influência dos zeros é sentida uma década antes, $(\omega_z/10)$, e termina uma década depois, $(10\omega_z)$.

5.3 Controlo

O sistema de controlo de um conversor baseia-se, fundamentalmente, no controlo do interruptor de potência. Este controlo pode ser feito recorrendo ao método de Modulação por Largura de Pulso - *PWM*, como referido na secção 2.5.1. Outro método que também permite controlar o interruptor de potência é através da utilização de um algoritmo de *MPPT* que forneça o valor do *duty-cycle* a ser utilizado para a comparação com a onda dente de serra.

Na Fig. 5.3 controlo é efetuado com base numa tensão de referência que é comparada com um valor de tensão medido. Desta comparação, resulta um sinal de erro, que, após passar por um bloco PI e por um bloco limitador, é comparado com uma onda dente de serra. Resulta, desta forma, o sinal de comando para o interruptor de potência. O bloco PI - *Proportional Integral* - multiplica o erro pelo ganho proporcional, K_p , e depois adiciona o integral do erro multiplicado pelo ganho

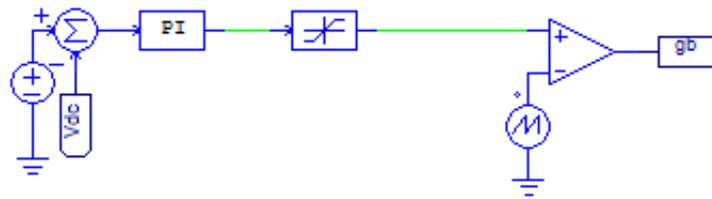


Figura 5.3: Controlo PWM com tensão de referência

integral, K_i . Este último termo acelera o processo no sentido do ponto desejado e elimina o erro residual do controlo proporcional. Assim, é necessário chegar a um compromisso entre o ganho proporcional e integral para que o sistema seja suficientemente rápido a corrigir o erro e que não se torne instável. O bloco limitador tem como objetivo, como o próprio nome indica, limitar o valor corrigido pelo PI para que este possa ser comparado com a onda dente de serra.

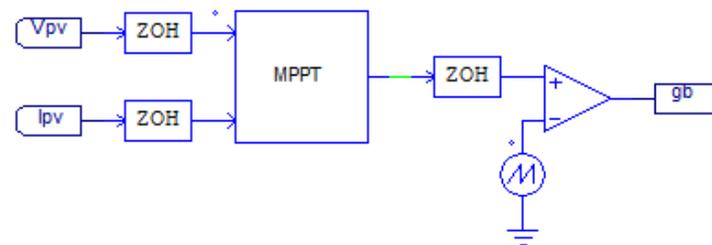


Figura 5.4: Controlo do *duty-cycle* com algoritmo *MPPT*

Na Fig. 5.4 é utilizado um controlo que tem por base um algoritmo *MPPT* que fornece o valor de *duty-cycle* para ser comparado com a onda dente de serra e desta forma produzir o sinal de comando do interruptor de potência. Este algoritmo é baseado nos algoritmos apresentados na secção 2.6.

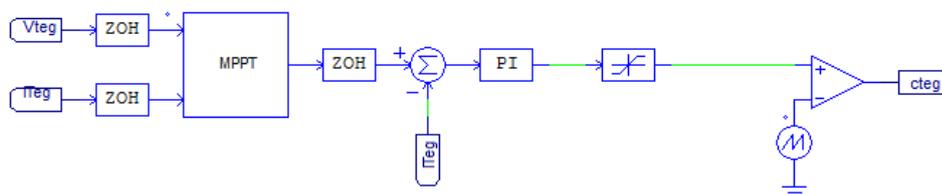


Figura 5.5: Controlo PWM com algoritmo *MPPT* a gerar uma referência de corrente

Na Fig. 5.5 o controlo é efetuado de uma forma ligeiramente diferente ao analisado anteriormente. O controlo passou a ser feito tendo por base valores de corrente, sendo apenas necessário modificar as medições e o sinal de referência. Este sinal é agora gerado por um algoritmo *MPPT*, que de acordo com as situações instantâneas gera o valor ótimo de corrente nesse determinado instante. Na figura pode-se ver um bloco denominado *ZOH - Zero Order Hold*. Este é um bloco

de amostragem, pois permite que sejam efetuadas leituras a uma determinada frequência ou que sejam fornecidos, neste caso, valores de referência a determinada frequência. O restante controlo é semelhante ao já apresentado. As simulações realizadas, neste e no capítulo 6, foram realizadas tendo em conta conversores ideais, tempos de comutação nulos e variações instantâneas da temperatura do gerador termoelétrico.

5.3.1 Controlo de tensão na saída

Nesta simulação pretende-se controlar a tensão entregue à carga de 100Ω . Esta foi fixada, através de uma tensão de referência no controlo do conversor, em $100V$ e foi recorrido ao controlo da Fig. 5.3. Existe uma variação da irradiância no momento $0.1s$ de $500W/m^2$ para $1000W/m^2$.

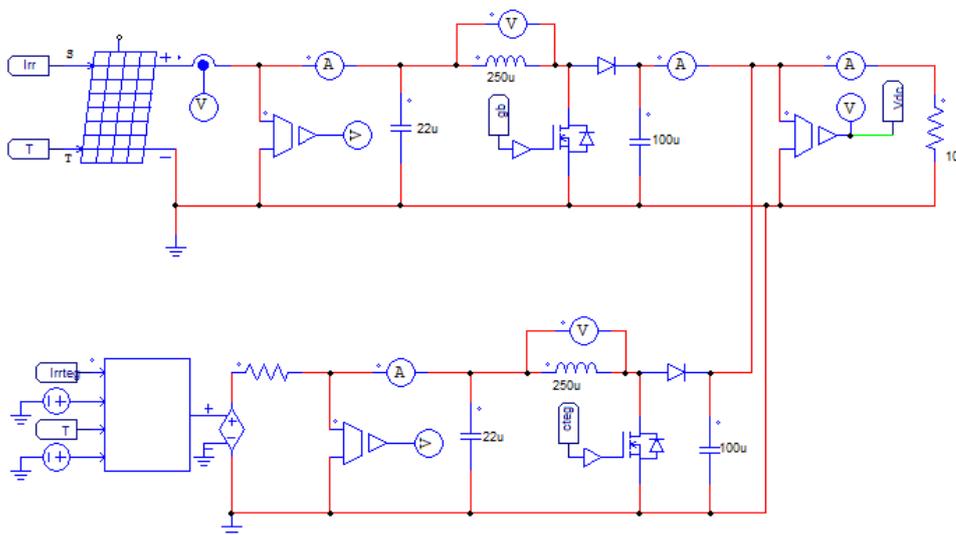


Figura 5.6: Esquema utilizado para efetuar o controlo de tensão de saída

Como se pode observar na Fig. 5.6, o esquema utilizado para executar esta simulação, a medição e aquisição da tensão para as funções de controlo é feita à saída do conversor ou à entrada da carga. Este valor irá, posteriormente, ser comparado com o valor de referência de $100V$. Desta forma, o sinal de comando do interruptor de potência vai ser ajustado para se obter o valor de referência na saída. É possível também visualizar alguns dados interessantes, de acordo com o ponto de funcionamento, referentes às saídas em corrente e tensão dos dois sistemas assim como a tensão e corrente nas bobinas e condensadores.

No que toca aos resultados obtidos, como se pode constatar na Fig. 5.7, verifica-se que existe uma evolução da tensão do painel e do gerador termoelétrico, V_{inpv} e V_{integ} , respectivamente. Esta variação deve-se à atuação do controlador nos instantes iniciais. Pode-se ver que a tensão de saída atinge o valor pretendido ao fim de $0.05s$, acontecendo o mesmo com a corrente. No momento $0.1s$ dá-se a mudança no nível de irradiância. Esta mudança, apesar de na realidade não se verificar, pretende ilustrar como o sistema reagiria às mudanças instantâneas e bruscas da irradiância.

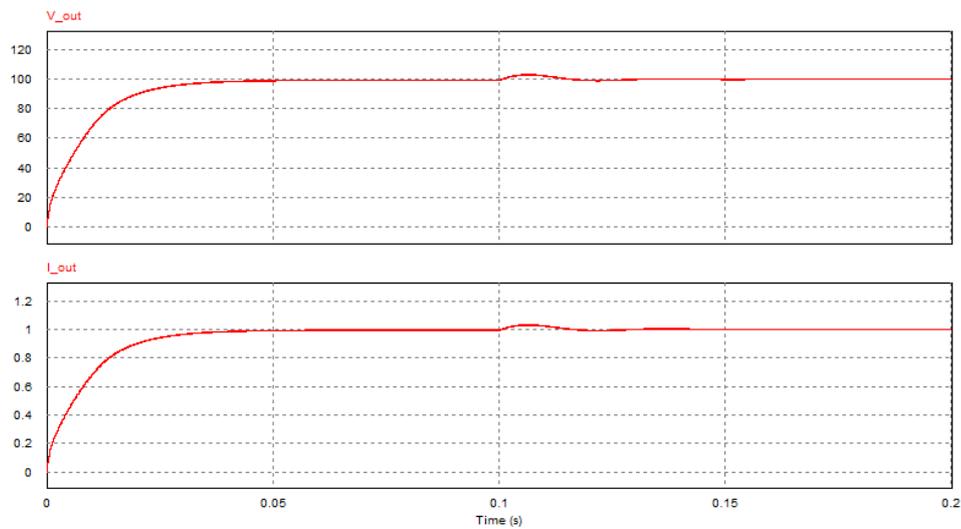


Figura 5.7: Evolução da tensão de saída e a corrente entregue à carga de 100Ω

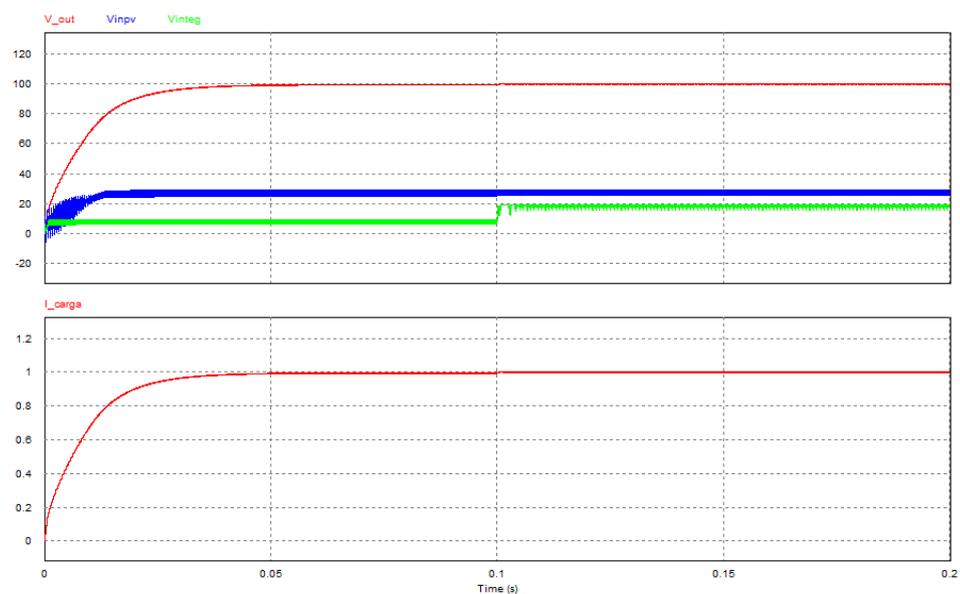


Figura 5.8: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada no PV, tensão de entrada no TEG e da corrente entregue à carga de 100Ω

É possível ver, na Fig. 5.8, que existe um aumento do nível de tensão do gerador termoeletrónico, como seria de esperar. Este aumento de tensão deve-se à variação da temperatura nesse instante. Esta variação corresponde na realidade, a um aumento lento e gradual da diferença de temperatura no *TEG*. Existe também uma variação ligeira da tensão no painel fotovoltaico que não é significativa. De notar que quanto mais pequena for a carga maior será o valor de corrente que esta vai exigir ao sistema e pode dar-se o caso de o sistema entrar em condução descontínua caso este valor seja superior ao que se pode obter na entrada. Em sentido inverso quanto maior for a

carga menor será o valor de corrente exigido ao sistema como se pode ver pela Fig. 5.9

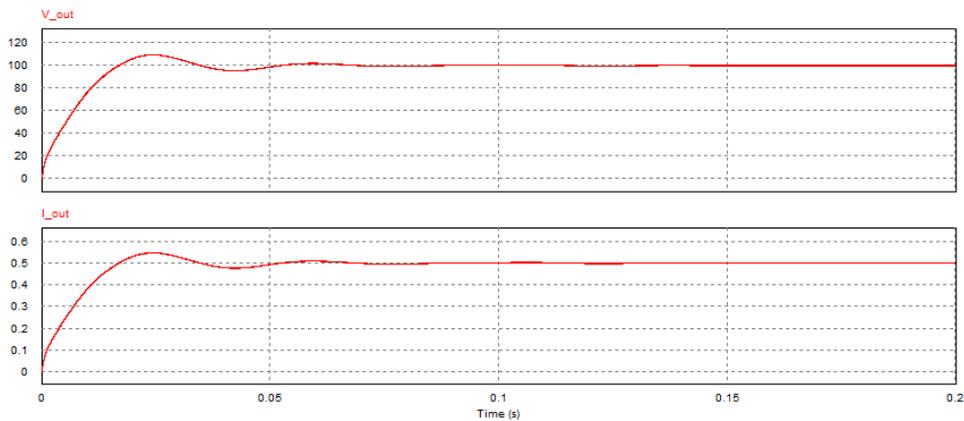


Figura 5.9: Evolução da tensão de saída e a corrente entregue à carga de 200Ω

5.3.2 Controlo do *duty-cycle* por Algoritmo *MPPT*

Nesta simulação o controlo foi realizado de acordo com os algoritmos de *Hill-Climbing* e de *Conduância Incremental* presentes na secção 2.6. O esquema utilizado foi o apresentado na Fig. 5.14. Estes algoritmos produzem o valor de *duty-cycle* a ser comparado com a onda dente de serra por forma a produzir o sinal de comando do interruptor de potência. Nesta fase foi realizada a mesma simulação para cada um dos métodos *MPPT*. A principal diferença foi a frequência de aquisição dos dados. Numa primeira fase utilizou-se uma frequência de 100Hz e, posteriormente, a frequência do sistema - 10kHz .

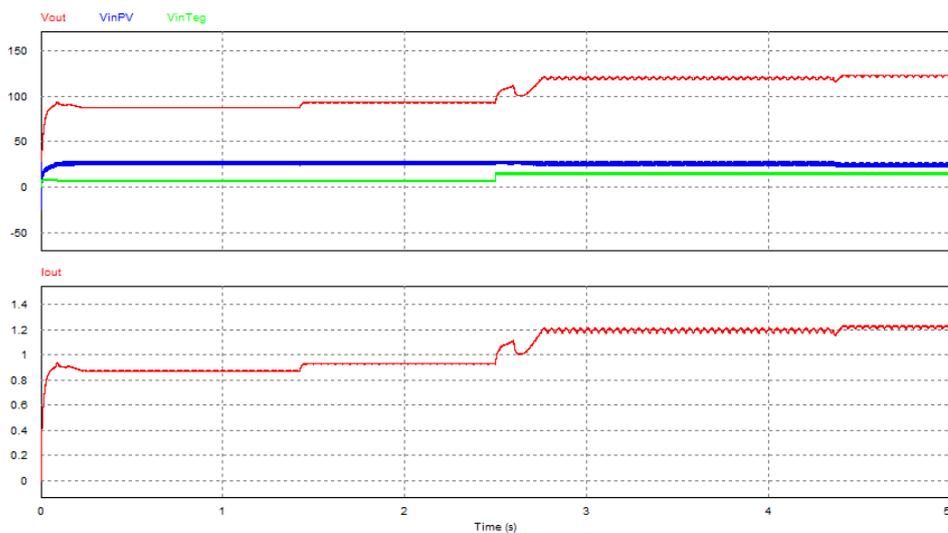


Figura 5.10: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 100\text{Hz}$ - Hill Climbing

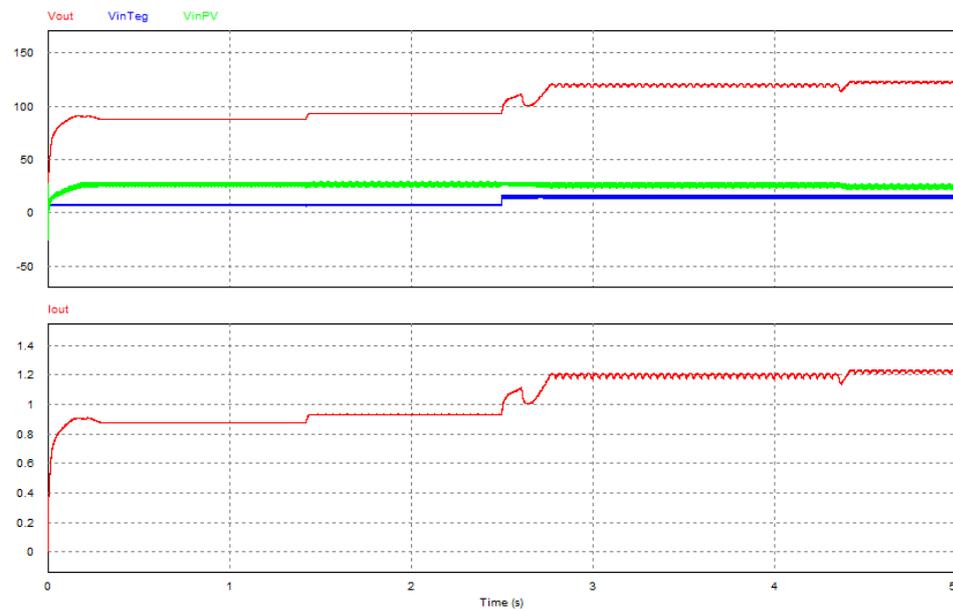


Figura 5.11: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 100Hz$ - Condutância Incremental

Como se pode observar pelas Figs. 5.10 e 5.11 o sistema reage de uma forma relativamente lenta quando sujeito às variações das condições externas, demorando a atingir o ponto ótimo. Nas mesmas condições, e apesar de os resultados serem muitíssimo semelhantes, nota-se que o método de Condutância Incremental apresenta uma menor oscilação em torno do ponto de funcionamento. Esta diferença nota-se sobretudo nos instantes iniciais.

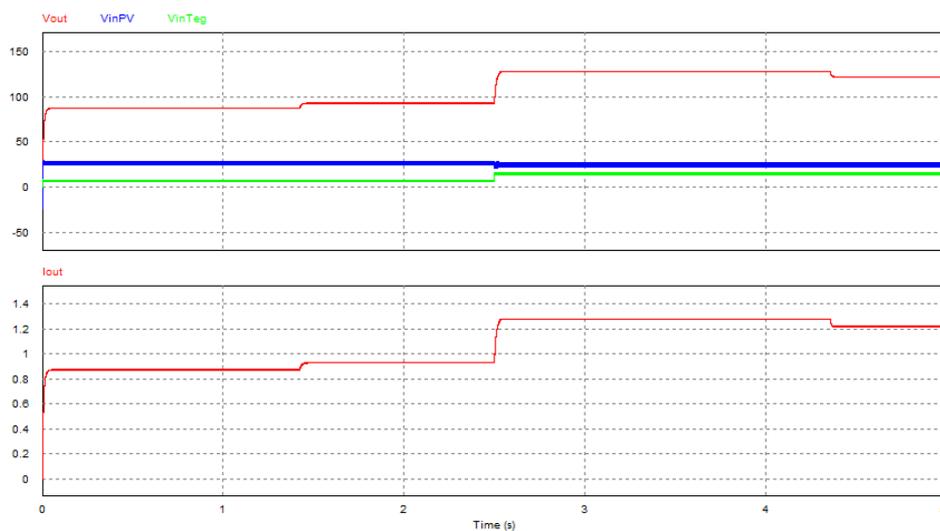


Figura 5.12: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH = 10kHz$ - Hill Climbing

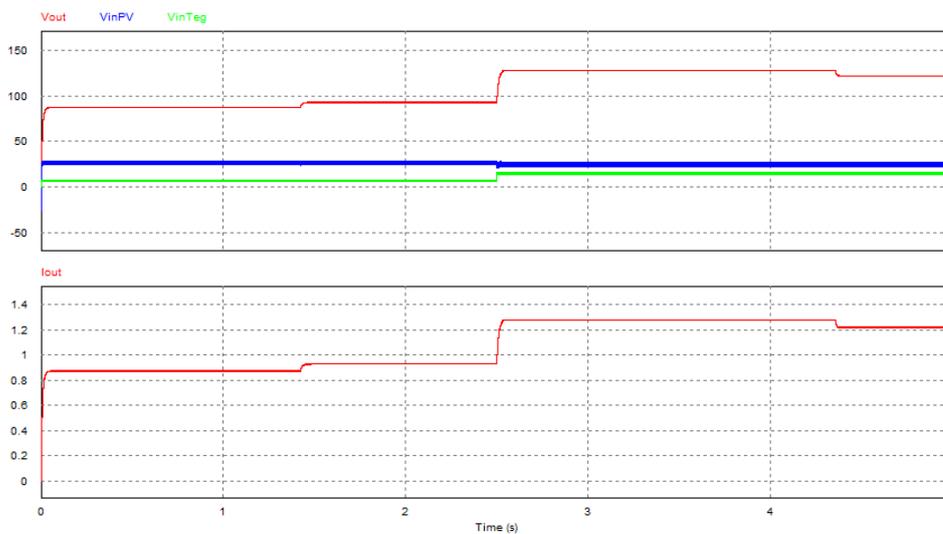


Figura 5.13: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH=10kHz$ - Condutância Incremental

Quando se acelera a velocidade de aquisição dos dados a performance dos dois algoritmos melhora substancialmente, sendo praticamente impercetível a diferença entre os dois algoritmos como se pode ver nas Figs. 5.12 e 5.13

5.3.3 Controlo MPPT com PWM

Esta simulação segue a mesma lógica da simulação anterior - carga de 100Ω e variação da irradiância aos 2.5s de $500W/m^2$ para $1000W/m^2$. Como se pode ver na Fig. 5.14 existem fundamentalmente duas grandes diferenças face ao esquema anterior. O controlo utilizado passou a ser o da Fig. 5.5 e, como este necessita dos valores de entrada no conversor, a aquisição dos valores de tensão e corrente é feita à entrada de cada um dos conversores. O controlo também passou a ser feito com uma referência de corrente. Na saída de cada um dos conversores existe ainda uma bobina que tem como principal objetivo baixar o *ripple* de corrente à entrada da carga. Esta bobina foi colocada aqui em antecipação à bateria que vai ser colocada numa fase posterior.

Como se pode observar na Fig. 5.16 existe também uma variação da tensão do painel e do gerador termoelétrico nos primeiros instantes. Mais uma vez, esta evolução deve-se à atuação do controlador que, agora, engloba um valor de referência gerado por um algoritmo MPPT. Este valor de referência é então comparado com o valor de corrente medido à entrada de cada um dos conversores, sendo o erro corrigido pelo bloco PI. Desta forma a precisão do controlo aumenta face ao método do controlo do *duty-cycle*. O método apresentado anteriormente tem variações fixas no valor do MPPT e por essa razão não atinge o ponto ótimo de funcionamento. Como pode ser visto na Fig. 5.16 o ponto de funcionamento em tensão e em corrente é substancialmente melhor que o método apresentado anteriormente.

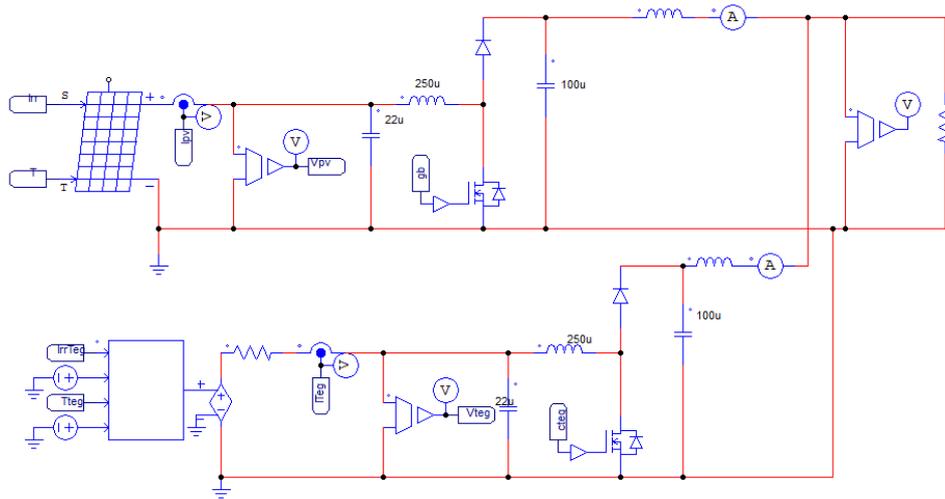


Figura 5.14: Esquema utilizado para realizar o controlo através de um algoritmo *MPPT*

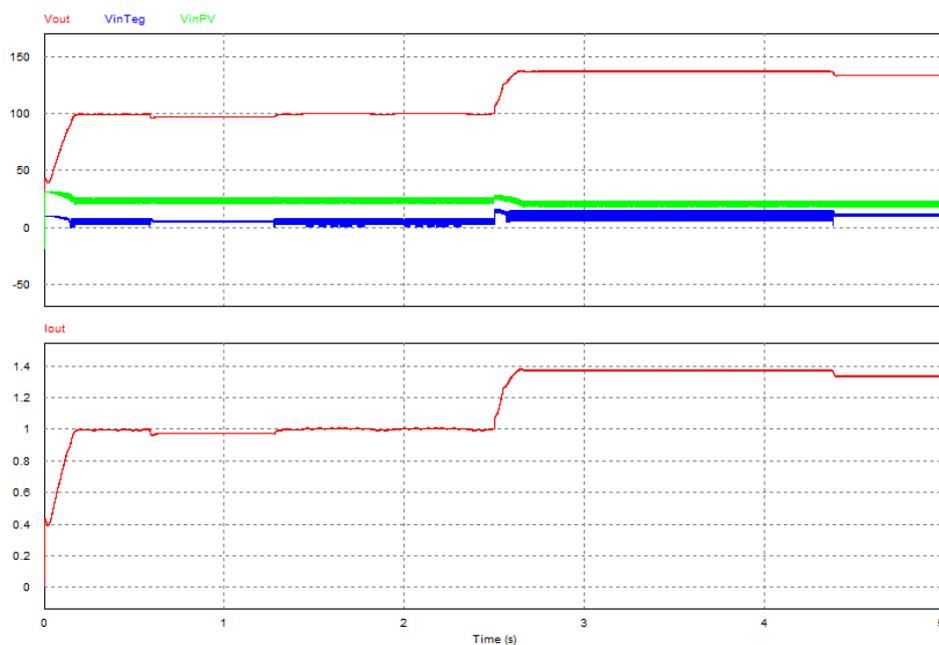


Figura 5.15: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH=500Hz$

Mais uma vez, por comparação das Figs. 5.15 e 5.16 observa-se a rapidez de resposta do sistema aos valores de referência gerados pelo algoritmo *MPPT* e a frequência com que estes são fornecidos como referência. Aumentando a velocidade do *MPPT* o sistema reage de uma forma "suave" às variações de irradiância e relativamente rápido. Assim, aumenta-se de forma significativa a potência média extraída ao painel e ao gerador termoelétrico.

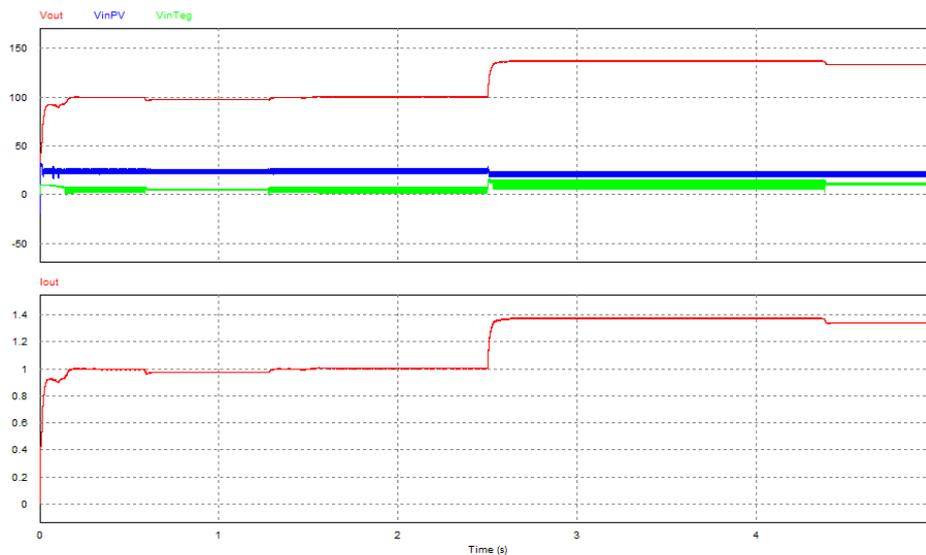


Figura 5.16: Evolução da tensão de saída, tensão de entrada nos dois conversores e a corrente entregue à carga de 100Ω com $ZOH=10kHz$

5.4 Conclusões

As simulações apresentadas tiveram como principal objetivo selecionar um modelo de controlo para o conversor. Foi analisado um modelo de controlo onde é feita a comparação entre um valor de referência, desejado, e um valor medido. Desta comparação surge um sinal de erro que é corrigido pelo PI e que, após comparação com uma onda triangular, fornece um sinal de comando para o interruptor de potência. Este método tem como principal vantagem a obtenção, na saída, de um valor de tensão desejado independentemente da carga apresentada sendo apenas variável a corrente entregue à carga. Esta situação constitui, porém, uma desvantagem pois não é possível extrair a potência máxima dos sistemas produtores.

Outro método estudado foi o controlo do *duty-cycle* através de dois algoritmos de *MPPT*. Os dados adquiridos para executar o algoritmo são, agora, recolhidos à entrada do conversor. Este método possui uma vantagem relativamente ao anterior pois permite que o sistema funcione num ponto relativamente próximo do ponto de potência máxima. Porém, devido ao funcionamento do algoritmo, o valor do *duty-cycle* é variado em intervalos fixos. Esta limitação permite, como referido, que o sistema trabalhe perto da potência máxima mas sem que nunca o atinja.

Por último foi testado um método de controlo que, basicamente, é a junção dos dois explicado anteriormente. É utilizado um algoritmo *MPPT*, neste caso *Perturbação e Observação*, para fornecer um valor de referência. O controlo passou a ser efetuado em corrente e como tal é comparado um valor de referência, fornecido pelo algoritmo *MPPT*, com um valor medido de corrente. Desta comparação surge um erro que vai ser corrigido pelo PI, e comparado com a onda dente de serra, resultando o sinal de comando do interruptor. Este método permite extrair a potência máxima - tal como pretendido.

Capítulo 6

Análise do Sistema

6.1 Arquitetura do Sistema

O sistema é, de uma forma geral, a junção de dois sistemas de produção de energia que partilham da mesma fonte energética, neste caso o Sol. Os sistemas adotados nesta dissertação constituem soluções comerciais. Para otimizar o seu rendimento optou-se por uma topologia em que cada um dos sistemas, fotovoltaico e termoelétrico, apresenta um conversor aos seus terminais. É também recomendado um sistema seguidor solar para que seja aproveitado o máximo de radiação incidente, como visto na secção 3.2.3. Desta forma é possível extrair a potência máxima de cada um deles. Cada conversor está ligado a um barramento, constituído por uma bateria, cuja tensão varia com a tensão na bateria. Esta topologia permite, como dito anteriormente, satisfazer objetivos e necessidades distintas.

Como referido no capítulo 2, existe a necessidade de elevar a tensão de saída de cada um dos sistemas, fotovoltaico e termoelétrico. para a tensão do barramento, neste caso representado por baterias. Esta tensão varia com a tensão da bateria e tendo em atenção a tipologia de cada um dos conversores, escolheu-se o conversor *Step-Up*. O conversor irá ter um controlador, que tem como base a Modulação por Largura de Impulso, controlado em corrente e que possui um algoritmo *MPPT* a produzir um valor de referência em cada instante, como se pode concluir na secção 5.3.

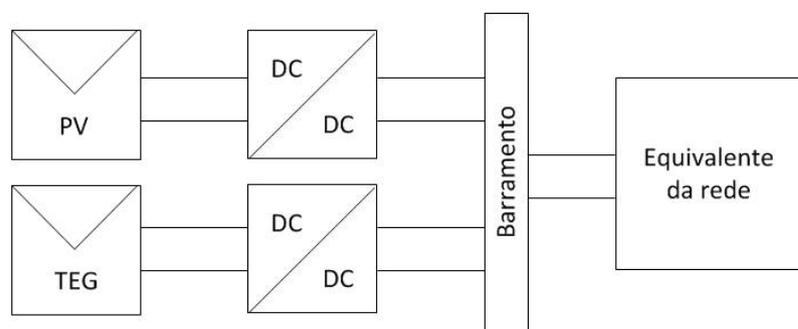
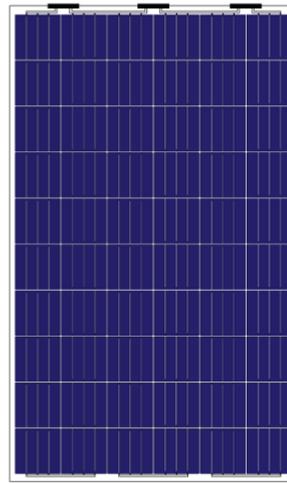


Figura 6.1: Arquitetura do sistema

O equivalente da rede é constituído por um conversor DC/AC que tem como principal objetivo fornecer energia à rede a uma frequência de 50Hz e uma carga. O conversor não foi abordado nesta dissertação por ser um tema discutido com relativa frequência quando o sistema é constituído por produção de origem renovável, nomeadamente através de painéis fotovoltaicos e geradores termoelétricos. Um modelo deste conversor pode ser encontrado em [16]. A carga será, numa primeira fase, constituída por uma resistência e na fase final por uma fonte de corrente variável.



(a) Exemplo de uma lente de *Fresnel* [10]



(b) Painel fotovoltaico [39]

Figura 6.2: Exemplos de uma lente de *Fresnel* e de um painel fotovoltaico

Um dos principais motivos para a escolha de uma lente de *Fresnel* é o facto de esta ser leve e compacta. Apesar de se perder na quantidade de irradiância que vai incidir no gerador termoelétrico, também não deve ser demasiado elevada sob o risco de ultrapassar a capacidade do gerador termoelétrico. A estrutura, constituída pela lente e o gerador termoelétrico, pode, então, ser facilmente acoplada a um painel fotovoltaico sem que seja necessário um aumento significativo na área de ocupação dos dois sistemas.

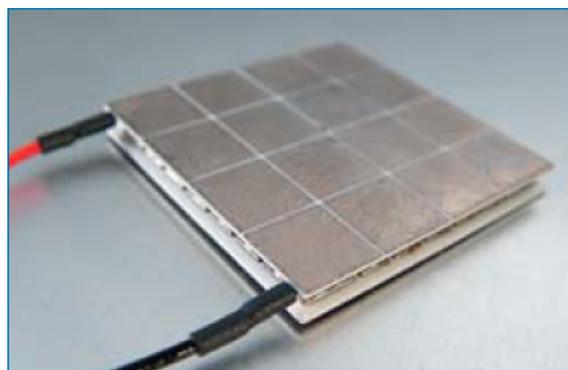


Figura 6.3: Exemplo de um gerador termoelétrico [45]

O gerador termoelétrico, como visto anteriormente, possui uma superfície destinada a ser

aquecida - a junção quente - e no sentido inverso uma junção fria. O *TEG* deve ser colocado no ponto de foco da lente por forma a aumentar a densidade energética na superfície do gerador. Esta energia pode ser mais bem aproveitada, caso se coloque um reservatório de óleo na junção quente do *TEG* [47]. Esta configuração permite melhorar o rendimento do sistema mesmo depois do pôr-do-sol. O reservatório de óleo vai ter um tempo de arrefecimento superior, ou seja, a diferença de temperatura entre junções vai diminuir de forma lenta. Assim, o gerador vai continuar a fornecer energia por um maior período de tempo face àquele que iria acontecer se não existisse reservatório. Um esquema do enunciado acima pode ser visto na Fig. 6.4

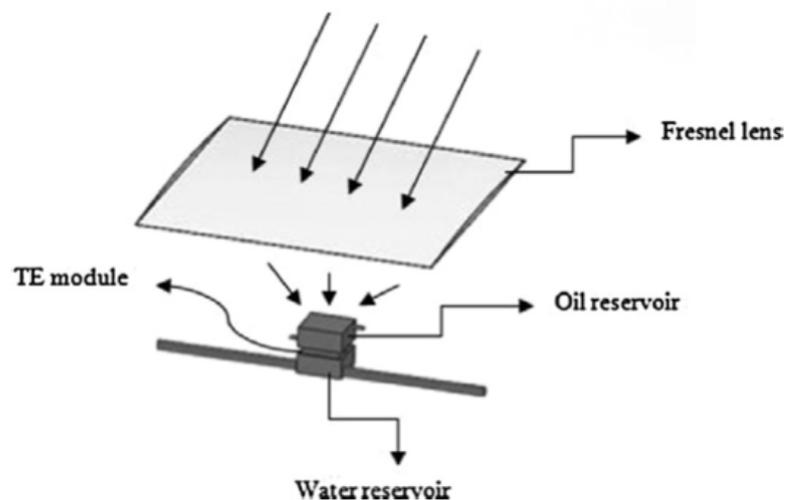


Figura 6.4: Proposta do esquema para o gerador termoelétrico [47]

Como pode ser observado na Fig. 6.4 existe, à semelhança da junção quente, um reservatório de água destinado a arrefecer a junção fria do gerador. Este tipo de refrigeração obriga a um emprego de um sistema refrigerador relativamente complexo, embora sejam obtidas melhorias significativas no rendimento do *TEG*. Este tipo de refrigeração poderia ser utilizado não só para o gerador termoelétrico mas também para o painel fotovoltaico - que perde rendimento com o aumento de temperatura. Este sistema engloba um maior investimento e como tal não é o recomendado. A proposta engloba um dissipador de calor ajustado ao gerador termoelétrico. Este deve ter uma boa capacidade de condução térmica e uma forma que proporcione um aumento da área de dissipação de calor. São utilizados, normalmente, dissipadores de calor em cobre ou em ligas de Alumínio, como visto na secção 4.3.1. Esta solução não é a ideal, mas aproveita a convecção natural e é substancialmente mais barata. Outros dispositivos de refrigeração forçada podem ser tidos em conta como, por exemplo, ventoinhas que extraíam o calor da junção fria do *TEG*.

6.2 Dimensionamento da bateria

Atendendo ao estudo efetuado na secção 2.7, a escolha da bateria baseada em iões de lítio foi natural. As suas características, elevada densidade energética e de potência, o número de ciclos

de vida, o seu baixo efeito de memória e a possibilidade de serem recicláveis foram critérios preponderantes para a sua escolha. Este tipo de baterias permite ainda que sofram cargas e descargas parciais sem que se danifiquem.

A bateria neste sistema funciona como um elemento que se pretende que tenha várias aplicações. O armazenamento de energia é, sem dúvida, a sua principal aplicação mas também servirá como barramento de tensão DC. A bateria utilizada é uma solução comercial e baseia-se no modelo de *Rint*.

Como se pretende que a tensão no barramento oscile em torno de 100V escolheu-se um conjunto de baterias onde a tensão mínima é de 3.0V, a tensão máxima de 4.2V e a tensão nominal de 3.7V. Estas características permitem, que num conjunto de 27 baterias, a tensão oscile entre 81V e 113.4V.

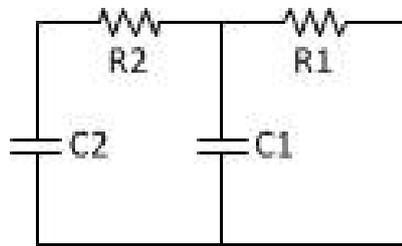


Figura 6.5: Esquema equivalente do conjunto de baterias

A bateria tem $R_1 = 5m\Omega$ e $R_2 = 25m\Omega$ e $C_2 = 0.5C_1$ e uma capacidade de 10Ah.

Sendo a energia num condensador,

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (6.1)$$

A energia da bateria,

$$E_b = V * I * t = 3.7 * 10 * 3600 = 133200 \quad (6.2)$$

Então,

$$\frac{1}{2}C(V_f^2 - V_i^2) = E_b \quad (6.3)$$

Daqui resulta,

$$C = \frac{2E_b}{[(V_f + V_i)(V_f \cdot V_i)]} = 30833F \quad (6.4)$$

Da bateria conclui-se e simplificando que $C_1 = 10333$ e $C_2 = 20666$, as resistências equivalentes resultam em $R_1 = 5 * 27 * 10^{-3} = 135m\Omega$ e $R_2 = 25 * 27 * 10^{-3} = 675m\Omega$.

6.2.1 Barramento DC

O barramento DC constitui uma parte integrante deste projeto. A possibilidade de inclusão de novas formas de produção permite que este seja um sistema polivalente. Através deste pode ser feita uma ligação à rede à rede através de um conversor DC-AC. Esta configuração tem o potencial para ser alargada a um sistema de geração fotovoltaica e termoelétrica, como dito anteriormente. Permite ainda a inclusão de dispositivos de armazenamento, as baterias e super-condensadores, mas também de cargas conectadas a este barramento. Este tipo de configuração irá ser uma solução eficaz para futuras aplicações de geração fotovoltaica [48].

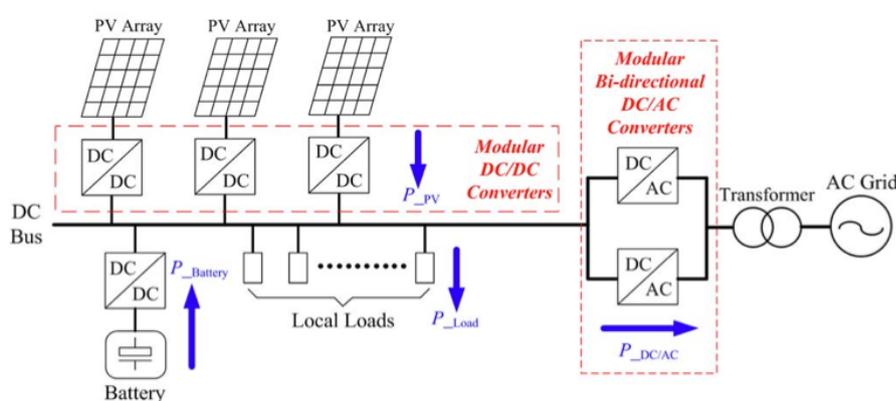


Figura 6.6: Barramento DC com produção fotovoltaica e ligação à rede [48]

Na Fig. 6.6 é possível ver um esquema similar ao apresentado na secção 6.1. É possível constatar a polivalência dum sistema deste tipo. Os módulos fotovoltaicos e as baterias têm capacidade para alimentar as cargas locais, mas também vender energia à rede através dos inversores. Em sentido inverso, a rede também tem capacidade para colmatar as necessidades do sistema produtor, alimentando as baterias e as cargas ligadas ao barramento DC. À semelhança de módulos fotovoltaicos, outras formas de produção podem ser adicionadas ao barramento. Esta configuração permite uma diminuição considerável nos custos, sendo necessários menos inversores.

A maior parte dos inversores comercializados, atualmente, têm um intervalo de operação bastante significativo no que toca à tensão de entrada [49]. Desta forma, conseguem suportar variações de tensão no barramento DC, como as que vão ser observadas posteriormente.

No barramento DC existe outro componente essencial que são as baterias. O uso destas permite aumentar a potência e/ou tensão no barramento. Como não se pretende que a tensão aumente, mas sim a potência, o acoplamento de módulos de baterias, à posteriori, deve ser efetuado com ligações em paralelo. Assim confere-se uma maior capacidade ao barramento e uma maior independência.

6.3 Algoritmo *MPPT*

O algoritmo *MPPT* utilizado usa um controlo em corrente e baseia-se no algoritmo de Perturbação e Observação analisado na secção 2.6.

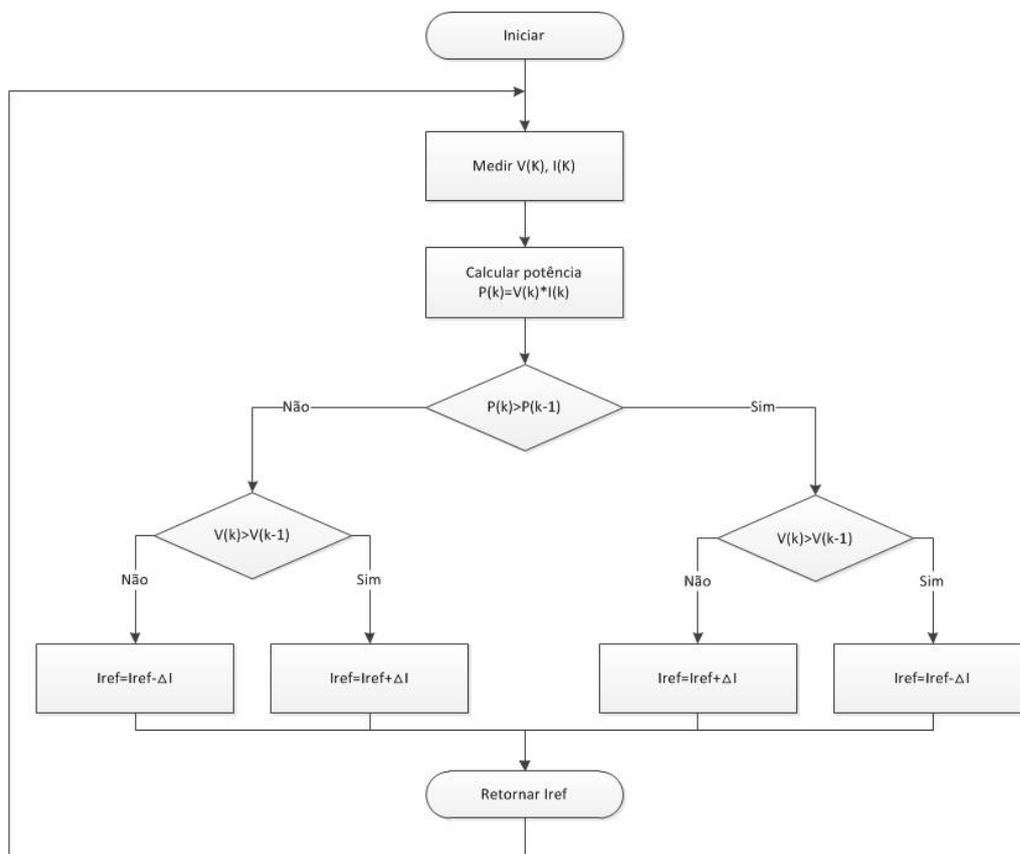


Figura 6.7: Algoritmo *MPPT* utilizado

Este algoritmo, como explanado, fornece o valor ótimo de corrente num dado instante 6.7. Utiliza, à semelhança dos algoritmos *MPPT* que tiram partido da variação do *duty-cycle* para o controlo do interruptor de potência, ligeiros incrementos. Beneficia da utilização do PI para a correção do erro entre o valor de referência e o valor medido, fornecendo, assim, um valor que irá ser comparado com a onda dente de serra. Desta forma o valor do sinal de comando do interruptor possui um valor mais preciso, aumentando a potência média extraída do painel e do gerador termoelétrico. A temperatura na junção quente do TEG é calculada de acordo com a temperatura no painel fotovoltaico. Para o modelo proposto a temperatura quente é calculada tendo em conta uma superfície com o mesmo nível de emissividade do painel fotovoltaico e o respetivo coeficiente de *Ross*, correspondente ao tipo de instalação. Desta forma, a temperatura da junção quente acompanha a temperatura do painel fotovoltaico para os mesmos níveis de irradiância.

6.4 Simulação

Desta forma é possível realizar as simulações e observar os resultados obtidos. Estando escolhido o controlador a ser utilizado, 5.3.3, o algoritmo *MPPT*, 6.3 e a bateria que servirá de barramento, 6.2, pode-se proceder à simulação. Devido à elevada capacidade da bateria utilizou-se uma capacidade inferior em 100 vezes para que as simulações tivessem uma duração relativamente curta por forma a observar as perturbações de tensão no barramento.

O esquema utilizado é o da Fig. 6.8,

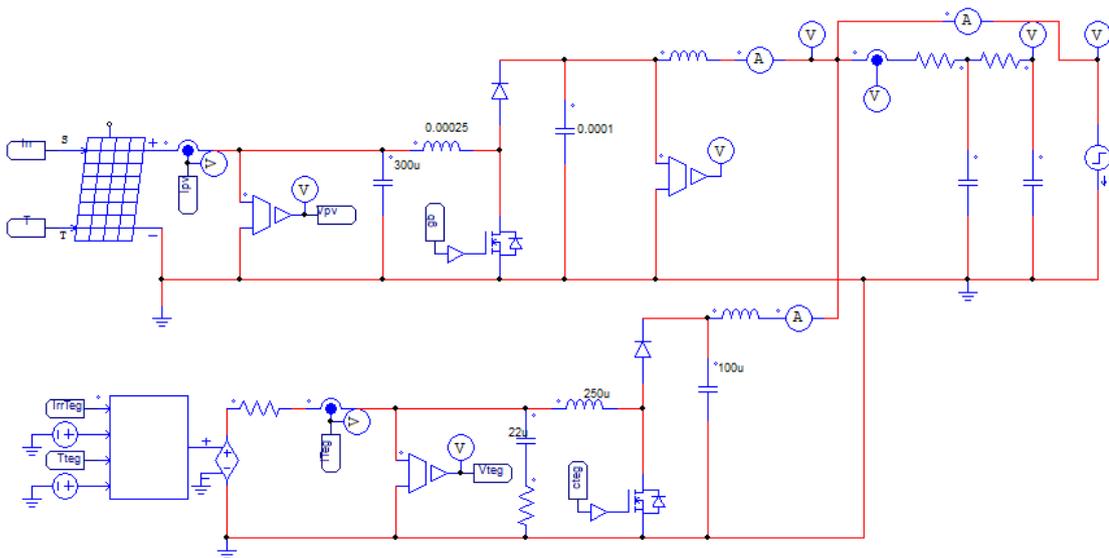


Figura 6.8: Esquema utilizado

Neste esquema são utilizados dois geradores termoeletricos, sob a forma de ganho na fonte de tensão controlada. É possível alterar, também, a quantidade de corrente que a carga existe, neste caso representado por uma fonte de corrente variável. O controlo da irradiância é feito através de uma fonte de tensão também esta variável e assume-se a temperatura ambiente de 25°C.

6.4.1 Irradiância constante e carga constante

Numa primeira fase, considera-se que a bateria está completamente descarregada assumindo por isso a tensão mínima - 81V. É ainda considerado um comportamento constante da carga, que requisita ao sistema 1A.

Como se pode visualizar na Fig. 6.9 a bateria começa lentamente a carregar, elevando a tensão do barramento. Nesta simulação a irradiância mantém-se constante durante todo o período tendo um valor de $S = 1000W/m^2$ para o painel fotovoltaico e de $S = 2000W/m^2$ para o gerador termoeletrico, fruto da lente *Fresnel* que multiplica por 2 a radiação incidente.

Como se pode observar na Fig. 6.10 a bateria continua a carregar mesmo após ultrapassar a meia carga. Esta situação é particularmente importante pois permite aferir o bom funcionamento

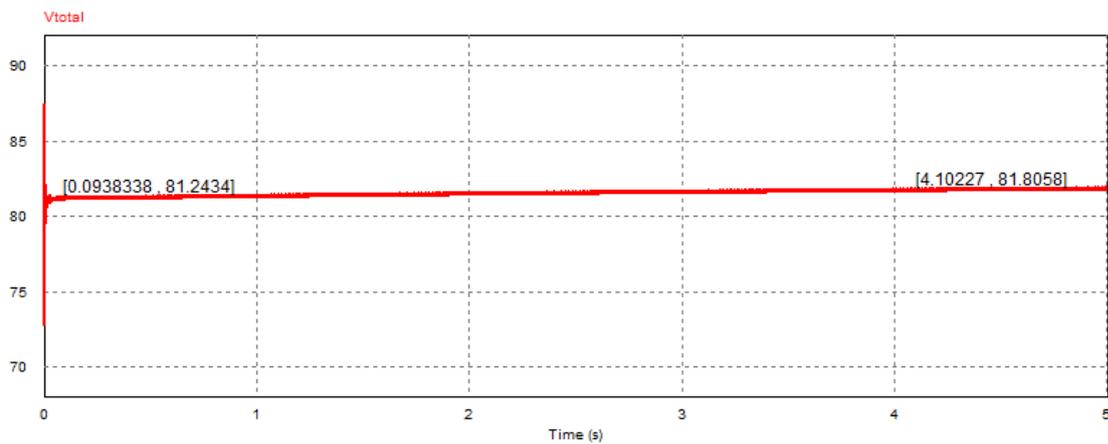


Figura 6.9: Tensão no barramento quando a bateria se encontra descarregada

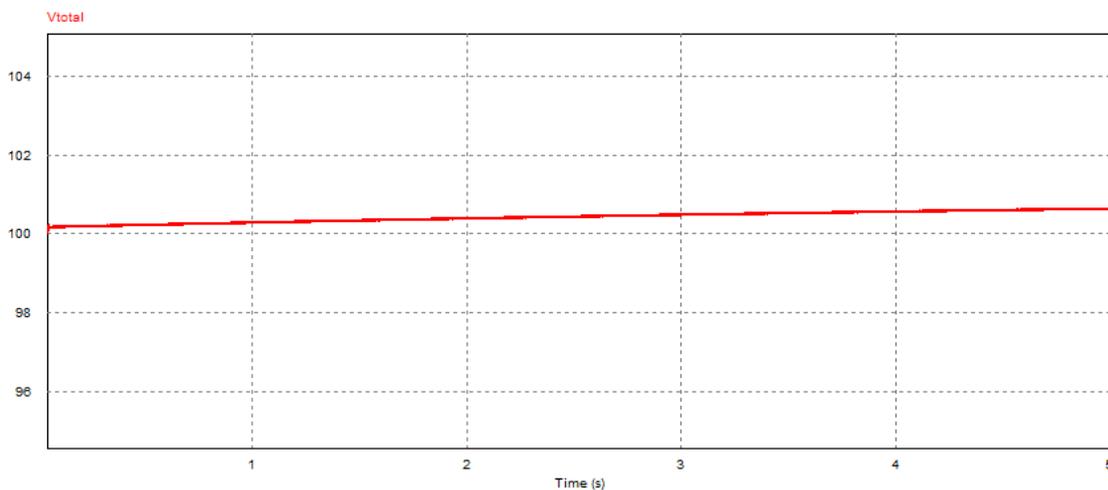


Figura 6.10: Tensão no barramento quando a bateria se encontra a meia carga

do controlador, que tem a capacidade necessária para suportar o sistema quando a tensão do barramento se situa acima dos 100V. Verifica-se também que a tensão do barramento irá oscilar entre os valores de tensão da bateria - o seu mínimo, 81V, e o seu máximo, 113V.

Por observação da Fig. 6.11 é possível verificar que dependendo do estado de carga da bateria, esta exige um valor maior ou inferior de corrente. Quando esta atinge o estado de carga máximo deve existir um controlo que corte a alimentação da bateria evitando, assim, sobrecargas.

6.4.2 Irradiância constante e variação na carga

Nesta simulação pretende-se analisar a resposta do sistema a uma variação brusca de carga. Para que tal acontecesse, alterou-se o valor da fonte de corrente, que está a servir de carga, de 1A para 5A no instante 2.5s.

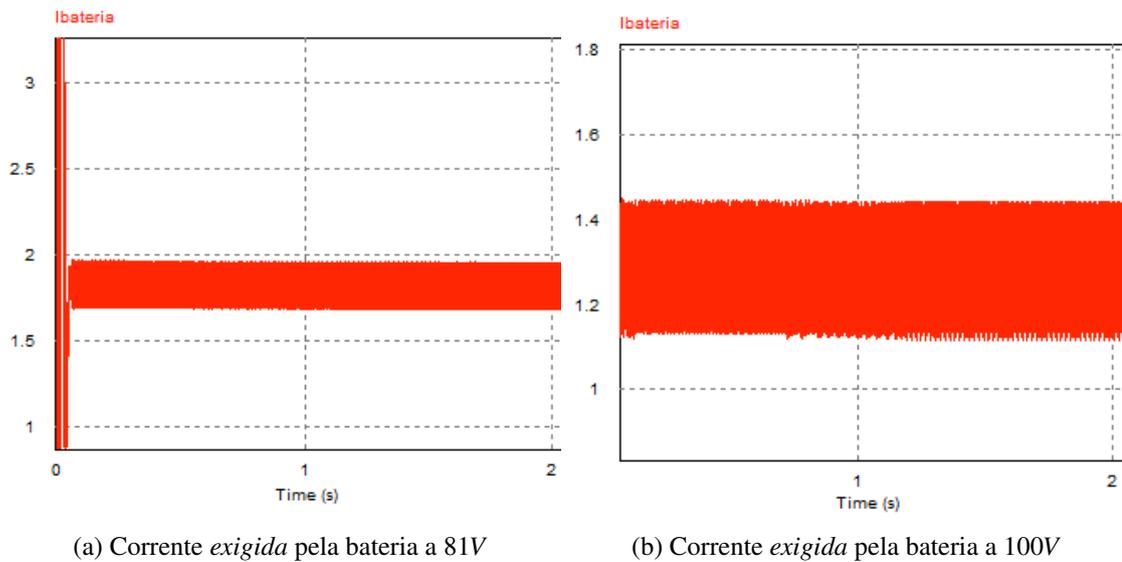


Figura 6.11: Comparação das correntes exigidas pela bateria para diferentes níveis de tensão

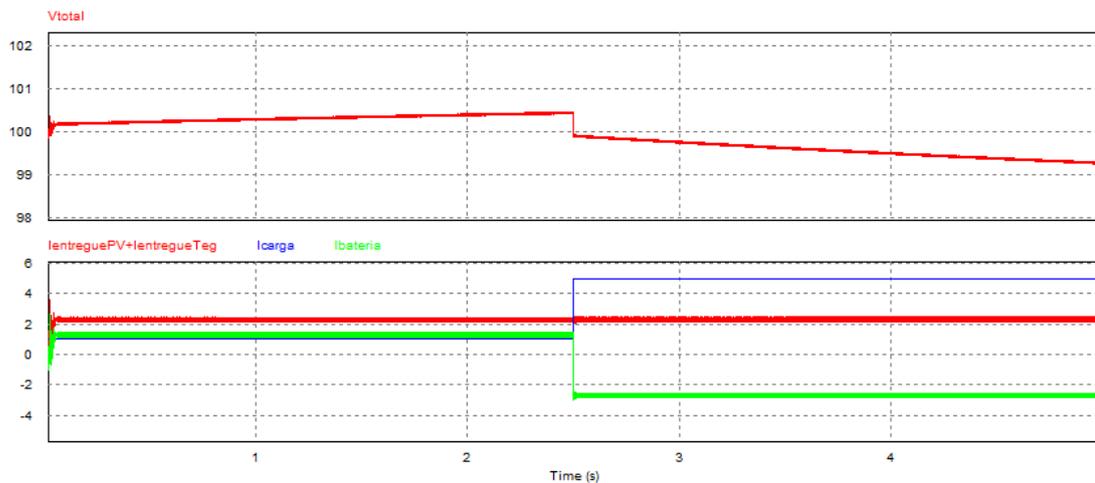


Figura 6.12: Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de carga

Pela análise da Fig. 6.12, nos instantes iniciais, até 2.5s, verifica-se que a corrente disponibilizada pelo painel fotovoltaico e pelo gerador termoeletrico é suficiente para alimentar a carga enquanto se procede ao carregamento da bateria - corrente positiva a entrar na bateria e tensão do barramento a aumentar. Quando existe a variação de carga, o sistema deixa de ter capacidade para alimentar a carga enquanto carrega a bateria. Como tal, a bateria vê-se obrigada a compensar este *deficit*. A bateria começa então a descarregar - corrente negativa e diminuição gradual da tensão do barramento. É possível também verificar, através de uma maior perturbação na onda de corrente, que o sistema tenta *dar mais* para colmatar esta diferença mas não é capaz.

6.4.3 Variação da irradiância e carga constante

Na presente simulação analisou-se a resposta do sistema quando sujeito a variações de irradiância. Para que fosse possível, alteraram-se os valores de entrada de irradiância tanto no painel fotovoltaico como no gerador termoelétrico. Como seria de esperar e olhando para a Fig. 6.13 é possível verificar que, quando acontece a variação da irradiância - $1000W/m^2$ para $500W/m^2$, no PV, e de $2000W/m^2$ para $1000W/m^2$, no TEG, existe uma quebra na potência entregue ao conjunto bateria mais carga. Esta variação permite, no limite, que o sistema continue a alimentar a carga e a bateria. A bateria passa a ser alimentada com uma corrente menor e, portanto, demorará mais tempo a carregar. A tensão do barramento cresce, então, de forma muito lenta.

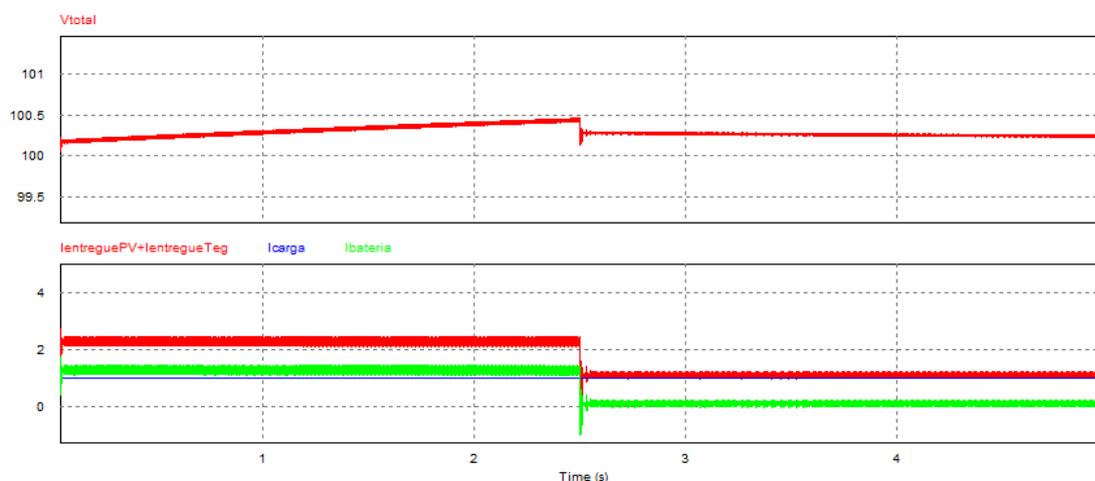


Figura 6.13: Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância

Na Fig. 6.14 é possível analisar com mais detalhe a variação de irradiância e os efeitos que ela provoca no sistema. Existe uma diminuição da corrente entregue pelo sistema que provoca que a bateria passe a fornecer energia à carga. Desta forma a tensão do barramento desce ligeiramente. Em regime permanente o sistema estabiliza e dado o sistema fornecer ligeiramente mais corrente do que a carga exige, a tensão do barramento vai aumentar gradual e mais lentamente.

6.4.4 Variação da irradiância e variação na carga

Neste conjunto de simulações pretende-se analisar, mais uma vez, a resposta do sistema quando sujeito a variações de carga e irradiância. É, resumidamente, uma junção das 3 simulações vistas anteriormente.

Na Fig. 6.15 é possível verificar que, quando existe variação da carga, a necessidade de energia é maior do que o sistema pode dar e portanto a bateria colmata esta diferença. Quando, para além de uma variação da carga, existe posteriormente uma variação na irradiância, a necessidade energética torna-se ainda mais forte, obrigando a bateria a fornecer mais e consequentemente a descarregar mais rapidamente.

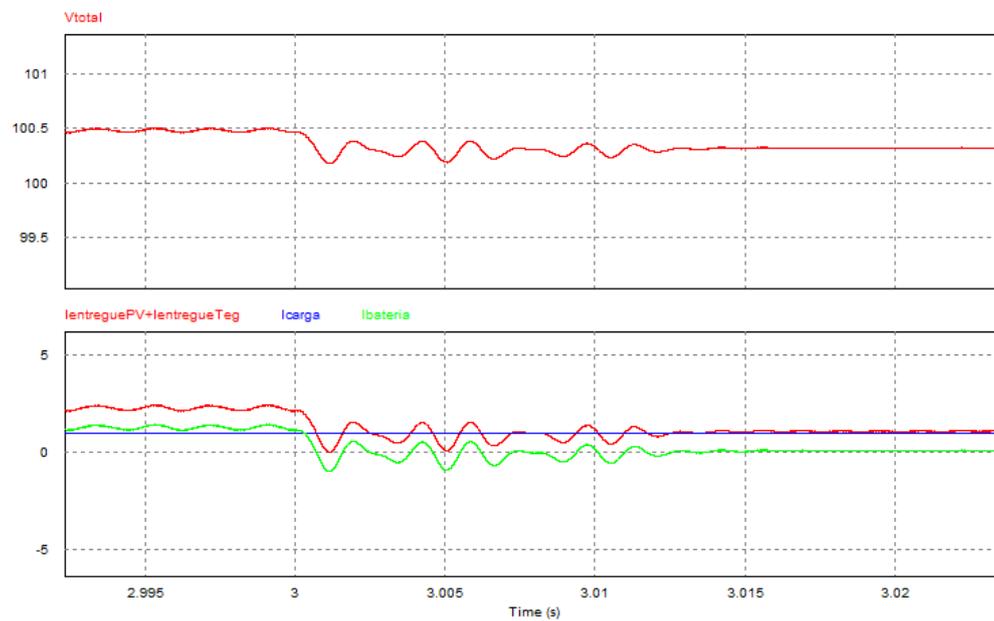


Figura 6.14: Pormenor da variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância

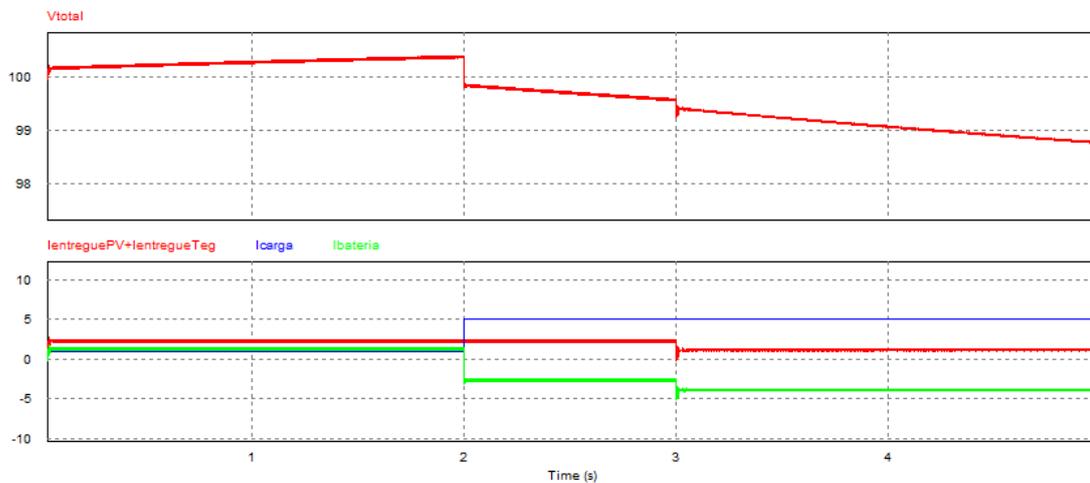


Figura 6.15: Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregues pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância gradual e carga

Na Fig. 6.16 existe uma variação da carga acompanhada por uma variação gradual da irradiância - de $1000W/m^2$ para $500W/m^2$ no PV e de $2000W/m^2$ para $1000W/m^2$ - no TEG. Esta variação faz com que, mais uma vez, exista uma dependência da bateria para alimentar a carga, crescendo com a diminuição da irradiância no sistema.

Na Fig. 6.17 foi mantida uma carga constante de 1A e efetuada uma variação gradual da irradiância. Analisando a figura, verifica-se que o sistema tem uma dependência natural do painel

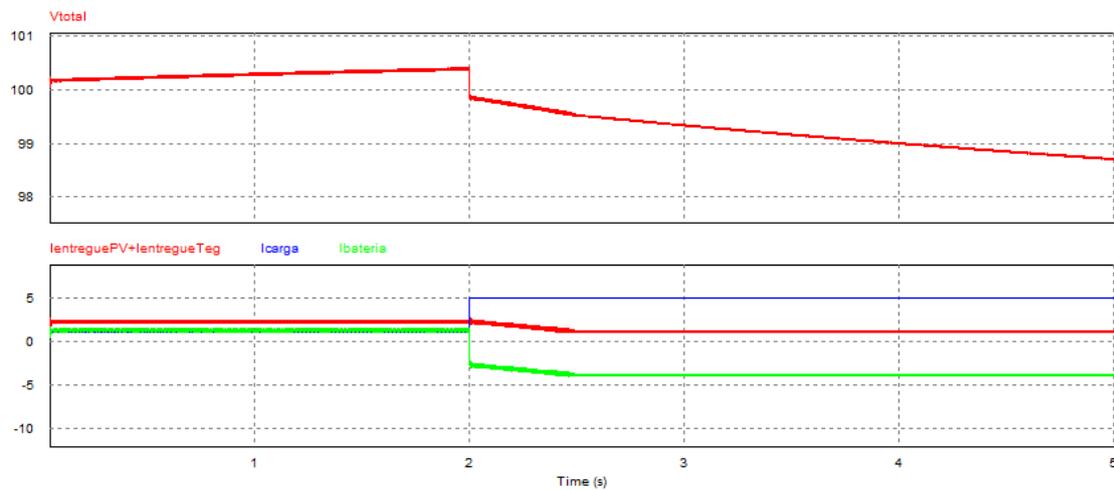


Figura 6.16: Variação da tensão no barramento e correntes na bateria, na carga e entregas pelo sistema quando sujeito a uma variação de irradiância e carga

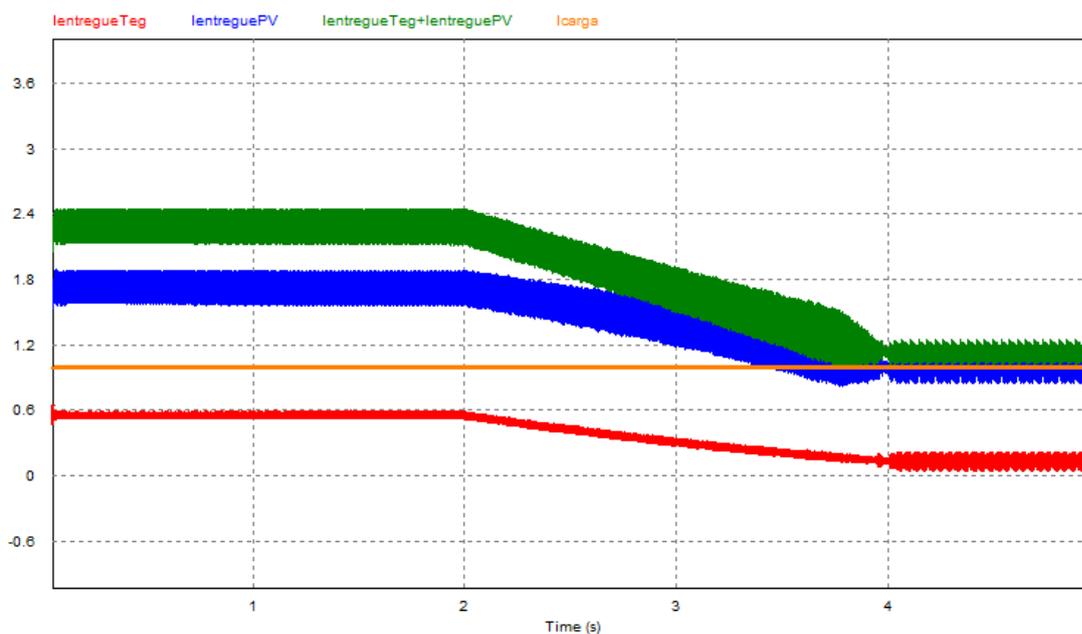


Figura 6.17: Variação das correntes na bateria, na carga e entregas pelo sistema quando sujeito a uma variação irradiância no sistema com variação gradual da temperatura no TEG e carga constante

fotovoltaico apesar de o gerador termoeletrico representar cerca de 25% da produção do sistema. Como visto no capítulo 4, a elevada dependência da diferença de temperatura é determinante para uma *boa* produção por parte do gerador termoeletrico. Com a variação da irradiância, de $2000W/m^2$ para $1000W/m^2$, e consequentemente da temperatura do TEG, a produção baixa significativamente.

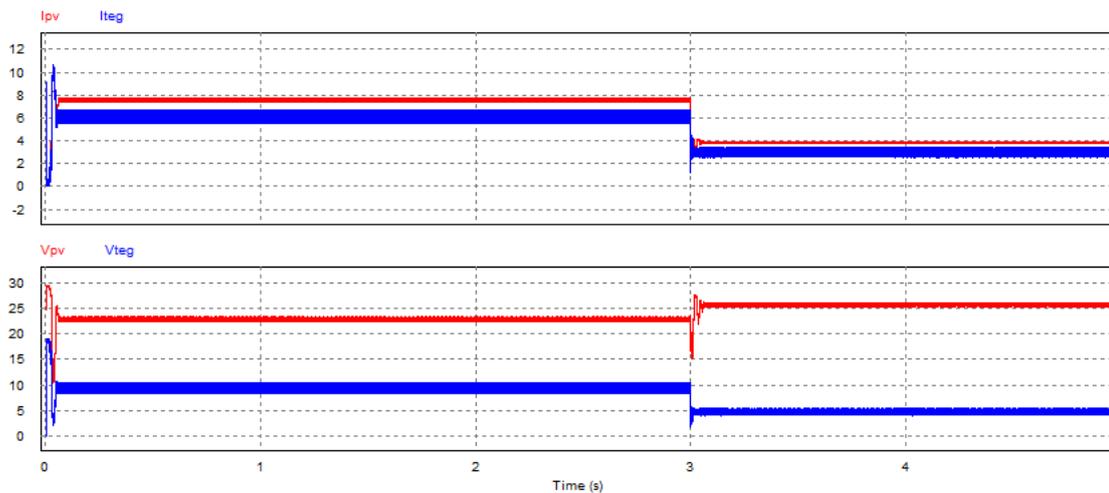


Figura 6.18: Tensão e corrente à saída do painel fotovoltaico e dos geradores termoelétricos quando sujeitos a variações de carga, aos 2s, e a variações de irradiância, aos 4s

Na Fig. 6.18 é possível analisar a resposta do sistema produtor, PV+TEG, às variações de carga e de irradiância. Quando a carga varia, aos 2s de 1A para 5A, o sistema mantém a sua produção pois não existe qualquer influência da carga. Porém, quando o sistema está sujeito a uma variação da irradiância, aos 3s, verifica-se que este atinge o novo ponto de funcionamento ótimo quase instantaneamente. Verifica-se ainda uma diminuição para aproximadamente metade da corrente quando a irradiância diminui para metade. Como seria de esperar, e devido à influência da temperatura no painel fotovoltaico, a tensão aumenta ligeiramente, como visto no capítulo 3. Em sentido contrário a tensão nos geradores termoelétricos baixa com a diminuição da temperatura, como visto no capítulo 4.

6.5 Conclusões

Neste capítulo procurou-se analisar o sistema, a sua constituição assim como a sua resposta a diferentes condições de carga e irradiância. Concluiu-se que num sistema composto por um painel fotovoltaico e dois geradores termoelétricos, como o proposto, existe um elevado grau de dependência da irradiância, no caso do painel fotovoltaico, e da diferença de temperatura, provocada pela irradiância, no caso dos geradores termoelétricos - como seria de esperar.

Quando existe uma variação de carga, a qual o sistema produtor não tem capacidade de satisfazer, a bateria, que serve de barramento, pode ter disponibilidade para satisfazer a carga caso se encontre parcialmente carregada. Quando a carga requisita um valor baixo de corrente, o sistema consegue alimentar tanto a carga como carregar a bateria. Este tipo de montagem permite que durante as horas de Sol seja possível alimentar uma carga enquanto se carrega a bateria. Desta forma, é possível continuar a vender energia mesmo nas horas em que não existe Sol. Dado que

este é um sistema de pouca potência, a utilização de um algoritmo *MPPT* é essencial com vista a se conseguir extrair uma maior potência média do painel fotovoltaico e do gerador termoelétrico.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo tem como principal objetivo a reflexão sobre o trabalho desenvolvido e o que ainda pode ser feito neste campo.

A área das energias renováveis encontra-se em franca expansão. Como referido anteriormente a energia retirada do vento, da água e do sol já constitui uma parte importante do diagrama de cargas nacional, ibérico e inclusive internacional. Estas, relativamente novas formas de produção, são lideradas pelo vento e pela água que asseguram a quase total produção renovável. Na senda das energias renováveis, a energia aproveitada proveniente do Sol é ainda uma área por explorar. O Sol, considerada uma fonte de energia *ilimitada*, é dos recursos mais abundantes no planeta Terra, porém um dos mais sub-aproveitados. Esta situação prende-se sobretudo com os baixos rendimentos dos sistemas produtores que têm como *entrada* a radiação solar. A baixa eficiência destes sistemas, torna-os pouco atrativos economicamente pois implicam um retorno na ordem dos cinco a seis anos.

Assim, neste campo, existe ainda um vasto caminho a ser desbravado. A busca de novos materiais que permitam aproveitar o efeito fotovoltaico de uma forma mais eficiente é imperiosa. Porém existem outras formas de aproveitar a energia do sol, sobretudo tirando partido da sua capacidade energética sobre a forma de calor. Foi então introduzido o conceito de gerador termoelétrico, um sistema produtor capaz de utilizar diversas fontes de calor para produzir energia. Aplicando um TEG que tenha como fonte de calor o Sol e onde seja possível efetuar uma refrigeração ativa e eficaz da sua junção fria, é possível criar diferenças de temperatura significativas que, tirando partido do efeito de *Seebeck*, sejam capazes de produzir energia.

7.1 Conclusões

No decorrer desta dissertação e do estudo realizado no capítulo 2, concluiu-se que o simples acoplamento de um TEG a um painel fotovoltaico não era, por si só, suficiente para produzir diferenças de temperatura necessárias para tornar esta solução viável. Foi então adotado um sistema, que apesar de partilhar da mesma estrutura, tira proveito do funcionamento independente destes dois geradores que aproveitam a mesma *entrada*. Dada a influência da irradiância, temperatura e

ângulo de incidência no funcionamento do sistema produtor é proposto, com vista a um aproveitamento otimizado da produção, uma estrutura que consiga fazer o seguimento do Sol ao longo do dia. Esta solução pretende otimizar o rendimento do painel fotovoltaico, que apenas faz proveito da componente perpendicular dos raios solares, assim como aumentar a exposição do gerador termoelétrico à fonte de calor.

O controlo a realizar neste tipo de sistemas assume um papel determinante para a otimização e maximização da produção. A escolha de um conversor que tenha em atenção os requisitos do sistema é essencial. Neste trabalho a utilização de um painel fotovoltaico e de dois geradores termoelétricos *exigia* a utilização de um conversor *step-up*. A necessidade de elevar a tensão para níveis aceitáveis para carregar as baterias que servem de barramento foi o principal motivo da escolha. O controlo do conversor é feito sobretudo no controlo do interruptor de potência que deve ter em conta um algoritmo *MPPT* adequado para que se possa extrair o máximo de potência média do sistema. A escolha do conversor, do seu controlo e o algoritmo *MPPT* foram as fases mais morosas desta dissertação. Nota-se, portanto, a versatilidade e as vantagens de um sistema como este - dependendo da carga, permite carregar uma bateria ao mesmo tempo satisfazer as necessidades da mesma. Como referido anteriormente, escalar este sistema é relativamente simples através da escolha de um outro conversor que satisfaça os seus requisitos, normalmente um conversor *buck-boost*.

A junção de uma bateria diminuiu a dependência de uma constante produção de energia elétrica sendo possível armazená-la durante o dia para poder ser utilizada e/ou vendida em períodos coincidentes, ou não, com os de produção. Desta forma foi necessário desenvolver um sistema que englobasse o sistema produtor, o conversor e respetivo controlo, a bateria e um equivalente da rede - uma carga. Da análise deste sistema verificou-se que o acoplamento de um sistema termoelétrico - gerador, lentes de *Fresnel* e dissipador de calor - pode ser uma mais valia. De acordo com as diversas condições de simulação a que este sistema foi sujeito - variação de irradiância e de carga - verifica-se que este sistema é atrativo, do ponto de vista energético, e que produz bons resultados.

Desta forma, e em jeito de conclusão, pode afirmar-se que os objetivos propostos no capítulo inicial desta dissertação foram cumpridos e que o presente trabalho constitui uma boa base fundamentada e aceitável para um projeto que permita a sua implementação

7.2 Trabalhos futuros

O trabalho aqui apresentado constitui uma boa base para um projeto onde seja feita a sua implementação. Existem alguns pontos abordados nesta dissertação que podem ser melhorados e que são apresentados de seguida:

- Implementação prática do sistema;
- Consideração de não idealidades no conversor, no seu controlo e na bateria;
- Otimização do sistema conversor e respetivo controlador;

- Estudo de uma estrutura no qual esteja inserido o gerador termoelétrico - refrigeração, TEG e lente de *Fresnel*;
- Estudo de um possível acoplamento de geradores termoelétricos a elementos dissipativos de calor.

Referências

- [1] Richard Williams. Becquerel photovoltaic effect in binary compounds. *Solar Energy*, 6(1):43, 1962. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X6290110X>, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(62\)90110-X](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(62)90110-X).
- [2] A. Smith. Status of photovoltaic power technology. *Journal of engineering for power*, 91(1):1–12, 1969. URL: <http://sfx.fe.up.pt/feup?sid=EI%3ACompendex&iissn=0022-0825&date=1969&volume=91&issue=1&spage=1&epage=12&title=Transactions%20of%20the%20ASME.%20Series%20A%2C%20Journal%20of%20Engineering%20for%20Power&atitle=Status%20of%20photovoltaic%20power%20technology&aualast=Smith&aufirst=A>.
- [3] REN Electricidade. Dados técnicos de 2012, 2012. URL: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/DadosTecnicos/REN%20Eletricidade%20-%20Dados%20Técnicos%202012.pdf>.
- [4] D. Kraemer, B. Poudel, H. P. Feng, J. C. Caylor, B. Yu, X. Yan, Y. Ma, X. Wang, D. Wang, A. Muto, K. McEnaney, M. Chiesa, Z. Ren, e G. Chen. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. *Nat Mater*, 10(7):532–8, 2011. Kraemer, Daniel Poudel, Bed Feng, Hsien-Ping Caylor, J Christopher Yu, Bo Yan, Xiao Ma, Yi Wang, Xiaowei Wang, Dezhi Muto, Andrew McEnaney, Kenneth Chiesa, Matteo Ren, Zhifeng Chen, Gang eng England Nat Mater. 2011 May 1;10(7):532-8. doi: 10.1038/nmat3013. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21532584>, doi:10.1038/nmat3013.
- [5] Hamidreza Najafi e Keith A. Woodbury. Optimization of a cooling system based on peltier effect for photovoltaic cells. *Solar Energy*, 91:152–160, 2013. doi:10.1016/j.solener.2013.01.026.
- [6] Filipe Fernandes dos Santos. Utilização de energia fotovoltaica para a eficiência energética de uma moradia. 2010. Bibliografia:123 -125 p. Filipe Fernandes dos Santos. URL: http://digitool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=234093.
- [7] João Paulo Gomes Alves. Requisitos para a certificação pv. 2010. Bibliografia: 109-111 p. João Paulo Gomes Alves. URL: http://digitool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=232139.
- [8] André Nelson Matias e Silva. Sistema de conversão de energia solar fotovoltaica. Julho 2008.

- [9] WT Xie, YJ Dai, RZ Wang, e K Sumathy. Concentrated solar energy applications using fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6):2588–2606, 2011.
- [10] Hulin Huang, Yuehong Su, Yibing Gao, e Saffa Riffat. Design analysis of a fresnel lens concentrating pv cell. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 6(3):165–170, 2011.
- [11] Keita O Ito, Hongtao Sui, Hidetoshi Hakozaki, Hiroshi Kinoshita, e Ryosuke O Suzuki. Using a water lens for light concentration in thermoelectric generation. *Journal of Electronic Materials*, 43(6):2086–2093, 2014.
- [12] Ned Mohan Tore M. Undeland, William P. Robbins. *Power Electronics*. John Wiley and Sons, INC, terceira edição, 2003.
- [13] Michael Neiva da Silva. Thermoelectric energy generator heat recovery system for gas water heaters. *Tese de Mestrado, Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2014.
- [14] Weidong Xiao, William G Dunford, Patrick R Palmer, e Antoine Capel. Regulation of photovoltaic voltage. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 54(3):1365–1374, 2007.
- [15] Frede Blaabjerg, Zhe Chen, e Soeren Baekhoej Kjaer. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 19(5):1184–1194, 2004.
- [16] José Pedro Pinto Teixeira Marques. Modelação e controlo de conversor dc/ac para interligação de painéis fotovoltaicos à rede. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 2009.
- [17] Kimiyoshi Kobayashi, Hirofumi Matsuo, e Yutaka Sekine. An excellent operating point tracker of the solar-cell power supply system. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(2):495–499, 2006.
- [18] DP Hohm e ME Ropp. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed. Em *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, páginas 1699–1702. IEEE, 2000.
- [19] REN. Diagrama de cargas ibérico [online]. Junho 2014. URL: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/DiagramadeCargasIbérico.aspx> [último acesso em 9 de Junho de 2014].
- [20] João Paulo Tomé Saraiva. *Amontamentos teóricos - Organização de Mercados de Electricidade*. FEUP, Fevereiro 2013.
- [21] Chris Naish, Ian McCubbin, Oliver Edberg, e Michael Harfoot. Outlook of energy storage technologies. *European Parliament's committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Tech. Rep*, 2008.
- [22] Alireza Khaligh e Zhihao Li. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(6):2806–2814, 2010.

- [23] Jason Leadbetter e Lukas G Swan. Selection of battery technology to support grid-integrated renewable electricity. *Journal of Power Sources*, 216:376–386, 2012.
- [24] Sónia Carina Lopes da Costa. Análise e desenvolvimento de um método de estimação de estado de carga de baterias baseado em filtros de kalman. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho 2014.
- [25] Taib Ibrahim M.M.M. Daud, Nursyarizal bin Mohd Nor. Novel hybrid photovoltaic and thermoelectric panel. *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference*, 2012.
- [26] K. T. Park, S. M. Shin, A. S. Tazebay, H. D. Um, J. Y. Jung, S. W. Jee, M. W. Oh, S. D. Park, B. Yoo, C. Yu, e J. H. Lee. Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices. *Sci Rep*, 3:2123, 2013. Park, Kwang-Tae Shin, Sun-Mi Tazebay, Abdullah S Um, Han-Don Jung, Jin-Young Jee, Sang-Won Oh, Min-Wook Park, Su-Dong Yoo, Bongyoung Yu, Choongho Lee, Jung-Ho eng England *Sci Rep*. 2013;3:2123. doi: 10.1038/srep02123. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23820973>, doi:10.1038/srep02123.
- [27] W. G. J. H. M. van Sark. Feasibility of photovoltaic – thermoelectric hybrid modules. *Applied Energy*, 88(8):2785–2790, 2011. doi:10.1016/j.apenergy.2011.02.008.
- [28] Yuan Deng, Wei Zhu, Yao Wang, e Yongming Shi. Enhanced performance of solar-driven photovoltaic–thermoelectric hybrid system in an integrated design. *Solar Energy*, 88:182–191, 2013. doi:10.1016/j.solener.2012.12.002.
- [29] Peng Li, Lanlan Cai, Pengcheng Zhai, Xinfeng Tang, Qingjie Zhang, e M Niino. Design of a concentration solar thermoelectric generator. *Journal of electronic materials*, 39(9):1522–1530, 2010.
- [30] Xing Ju, Zhifeng Wang, Gilles Flamant, Peng Li, e Wenyu Zhao. Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic–thermoelectric hybrid system. *Solar Energy*, 86(6):1941 – 1954, 2012. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12000886>, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.024.
- [31] E. A. Chávez-Urbiola, Yu V. Vorobiev, e L. P. Bulat. Solar hybrid systems with thermoelectric generators. *Solar Energy*, 86(1):369–378, 2012. doi:10.1016/j.solener.2011.10.020.
- [32] Yongliang Li, Sanjeeva Witharana, Hui Cao, Mathieu Lasfargues, Yun Huang, e Yulong Ding. Wide spectrum solar energy harvesting through an integrated photovoltaic and thermoelectric system. *Particuology*, 2013. doi:10.1016/j.partic.2013.08.003.
- [33] Widaly De Soto, SA Klein, e WA Beckman. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar energy*, 80(1):78–88, 2006.
- [34] K. Ding, X. Bian, H. Liu, e T. Peng. A matlab-simulink-based pv module model and its application under conditions of nonuniform irradiance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(4):864–872, 2012. cited By (since 1996)11. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84870293230&partnerID=40&md5=1ef94ee9c842fd48454702ef46197329>.

- [35] Ernest Matagne, Rachid Chenni, e Rachid El-Bachtiri. A photovoltaic cell model based on nominal data only. Em *Powereng 2007, International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives*, 2007.
- [36] Dezso Sera, Remus Teodorescu, e Pedro Rodriguez. Pv panel model based on datasheet values. Em *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, páginas 2392–2396. IEEE, 2007.
- [37] Kun Ding, Jingwei Zhang, Xingao Bian, e Junwei Xu. A simplified model for photovoltaic modules based on improved translation equations. *Solar Energy*, 101:40–52, 2014.
- [38] Stefan Krauter e Alexander Preiss. Comparison of module temperature measurement methods. páginas 000333–000338, 2009.
- [39] EGING PV. Eg-(series)p60-c-dg. *Catalog Sheet - EG-(SERIES)P60-C-DG*.
- [40] Rafael Amaral Shayani. Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células. 2006.
- [41] Powersim Inc. Psim user’s guide, March 2010.
- [42] CB MOCANU e K UZUNEANU. Modeling a thermo-electrical concentrating solar system for heat and electricity of a house. 2012. URL: <http://naun.org/multimedia/NAUN/energy/16-269.pdf>.
- [43] Diogo Amaral de Sousa. Reaproveitamento de calor em automóveis para geração de energia elétrica utilizando módulos termoeletrônicos. Tese de mestrado, Universidade do Minho, 2012.
- [44] Carlos Alfredo Rodrigues de Carvalho. Estudo de viabilidade do aproveitamento do calor de escape para geração de energia elétrica. Tese de mestrado, Universidade de Taubaté, São Paulo Brasil, 2012.
- [45] Eureka messtechnik gmbh, Junho 2014. URL: http://eureka.de/english/cooling_teg_eureka.html [último acesso em 20 de Junho de 2014].
- [46] Robert W Erickson e Dragan Maksimovic. *Fundamentals of power electronics*. Springer, 2001.
- [47] M. Hasan Nia, A. Abbas Nejad, A.M. Goudarzi, M. Valizadeh, e P. Samadian. Cogeneration solar system using thermoelectric module and fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, 84(0):305 – 310, 2014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414003458>, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.041>.
- [48] Kai Sun, Li Zhang, Yan Xing, e Josep M Guerrero. A distributed control strategy based on dc bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26(10):3032–3045, 2011.
- [49] Samil Power Expert for PV Grid-tied Inverters.

Anexo A

Implementação em MATLAB

A.1 Sistema PV

Nesta secção são apresentados os algoritmos utilizados para desenhar as curvas I-V e P-V respeitantes às condições de funcionamento dos painéis fotovoltaicos. A partir deste código é possível determinar as curvas de funcionamento em diversas condições de irradiância assim como de temperatura.

```
Ns= 60;           %Número de células
Voc=36.98;        %Tensão em Circuito Aberto STC
Isc=8.24;         %Corrente de CC em STC
Vm=29.99;         %Tensão MPPT
Im=7.67;         %Corrente MPPT

%Rs=x1, %Rsh=x2
f=@(x) [Vm-Im * x(2) - Im * x(1) +
(Vm - Im * x(1)) * ((Isc*x(2)-Voc) / (Vm+Im*x(1)-Voc)) *
((x(2)*Isc-x(2)*Im-Im*x(1)-Vm) / (Isc*x(2)-Voc)) *
log((x(2)*Isc-x(2)*Im-Im*x(1)-Vm) / (Isc*x(2)-Voc)), x(1)/x(2) +
((x(1)-x(2))/x(2)) * ((Isc*x(2)-Voc) / (Vm+Im*x(1)-Voc)) *
log((x(2)*Isc-x(2)*Im-x(1)*Im-Vm) / (Isc*x(2)-Voc)) *
((x(2)*Isc-x(2)*Im-Im*x(1)-Vm) / (Isc*x(2)-Voc)) ^
((Isc*x(1)-Voc) / (Vm+Im*x(1)-Voc))];
options = optimset('Algorithm','levenberg-marquardt',.005,
'TolFun',1e-20,'TolX', 1e-20, 'MaxIter',10000,'MaxFunEvals',10000);
x=fsolve(f,[0,1000],options);
Rs=x(1);
Rsh=x(2);
k= ((Rsh*Isc-Rsh*Im-Im*Rs-Vm) / (Isc*Rsh-Voc)) ^ (Voc / (Vm+Im*Rs-Voc)) -1;
```

```

Voc_ref=Voc;
Isc_ref=Isc;
Vm_ref=Vm;
Im_ref=Im;
Rs_ref=Rs;
Rsh_ref=Rsh;
k_ref=k;
alpha=0.0004;
beta=-0.00325;
c=0.06; % fator de correção de Voc com a Irradiância
Sref=1000;
Tref=25+273.25;

for S=500:500:1000
T=25+273.15; % temperatura back
T=T+S*0.058;
temp_ref=25;
temp_celula=T-273.15;

%Ajuste da corrente em curto-circuito e tensão em vazio
Isc=Isc_ref*(1+alpha*(T-Tref))*(S/Sref);
Voc=Voc_ref*(1+c*log(S/Sref)+beta*(T-Tref))
logk1=log(k_ref+1)*Voc*Tref/Voc_ref/T;
k=exp(logk1)-1;

I=0;
I_1=0;
z=0;
%Newton Raphson para determinar I
for j=0:38
for z=0:38
z=z+1; %Atualiza o número de iterações
I=I_1; %Atualizada a solução da iteração anterior
%Aplicação do método
I_1=I - (I + (Isc*Rsh-Voc)/(Rsh)*(k+1)^((j+Rs*I)/Voc - 1) -
(j+Rs*I)/Rsh - Isc)/(1 - (Rs*log(k + 1)*(Voc - Isc*Rsh)*
(k + 1)^((j + I*Rs)/Voc - 1))/(Rsh*Voc) - Rs/Rsh);
%Verificação da condição de paragem
if(abs(I_1-I)<0.001)

```

```

        z=1;
    end
    %Verificação se a corrente calculada não é inferior a 0
    if(I_1>=0)
        i(j+1,1)=I_1; %Corrente maior que 0; Valor calculado retornado
    else
        i(j+1,1)=0;%Corrente inferior a 0; Retornado 0
    end
    end
    end
    V(j+1,1)=j;
    j=j+1;
    P_calc=V.*i;
    V_I_P=[V,i,P_calc];

    end
    hold on
    [haxes,hline1,hline2] = plotyy(V,i,V,P_calc);
    set(haxes(1),'YLim',[0 10])
    set(haxes(1),'YTick',[0:0.5:10])
    set(haxes(2),'YLim',[0 250])
    set(haxes(2),'YTick',[0:20:250])
    ylabel(haxes(1),'Corrente (A)') % label left y-axis
    ylabel(haxes(2),'Potência (W)') % label right y-axis
    xlabel(haxes(2),'Tensão (V)') % label x-axis
    legend(hline1,'I-V (S=500)', 'I-V (S=1000)')
    legend(hline2,'P-V (S=500)', 'P-V (S=1000)')
    hold off

    end

```

A.2 Sistema TEG

Nesta secção são apresentados os algoritmos utilizados para desenhar as curvas V-I e P-I respeitantes às condições de funcionamento dos geradores termoelétricos. A partir deste código é possível determinar as curvas de funcionamento em diversas condições de temperatura.

```

for Th=313:40:393
    Tc=293; %%temperatura de referência
    seebeck=0.0823; %%Coeficiente de Seebeck

```

```

R=1.67;%%Resistência interna
if Th >= 393
    Th=393;
end

%%Cálculo da Diferença de Temperatura
dT = Th-Tc;

%%Cálculo da tensão em vazio
Voc=2*dT*seebeck;
i=0;
j=0;

%%Desenhar as curvas V-I e P-I com Ri=Rl
for j=0:50

    V=0.5*Voc - R*i;

    if V < 0
        V=0;
    end

    P=V*i;
    V_out(j+1,1)=V;
    I_out(j+1,1)=i;
    P_out(j+1,1)=P;
    Exit=[V_out,I_out,P_out];
    i=i+0.1;

end
hold on
[haxes,hline1,hline2] = plotyy(I_out,V_out,I_out,P_out);
set(haxes(1),'YLim',[0 10])
set(haxes(1),'YTick',[0:0.5:10])
set(haxes(2),'YLim',[0 11])
set(haxes(2),'YTick',[0:0.5:11])
ylabel(haxes(1),'Tensão (V)') % label left y-axis
ylabel(haxes(2),'Potência (W)') % label right y-axis
xlabel(haxes(2),'Corrente (A)') % label x-axis

```

hold off
end