



Sistema de Seguimento do Ponto de Potência Máxima em Painéis Fotovoltaicos com Conversão Termoelétrica de Energia

Ivo André Vieira Cleto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. José Fernando Alves da Silva

Júri

Presidente: Prof. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Orientador: Prof. José Fernando Alves da Silva

Vogal: Prof. Luís José Lamy Rocha da Encarnação

Novembro 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Esta Dissertação de Mestrado encerra um percurso académico com 17 anos, feito de muitos sucessos, ensinamentos, vitórias e também derrotas, que me ajudaram a crescer enquanto pessoa.

Mas como, nesta vida, é muito difícil alcançar algo sem a ajuda de outros, seja de que forma for, gostaria em primeiro lugar de agradecer ao Professor Doutor José Fernando Alves da Silva, meu orientador, por me ter permitido efetuar esta Dissertação, com toda a sua disponibilidade, semana após semana, no esclarecimento de dúvidas e resolução de problemas.

Gostaria de agradecer também ao meu pai, Luís Cleto, à minha mãe, Maria Cleto e ao resto de toda a minha família pelo apoio, carinho e incentivo que me foi dado na realização desta dissertação, de todo o curso, mas também ao longo destes 17 anos de estudos.

Aos meus amigos e colegas por toda amizade, pelos bons momentos passados e memórias inesquecíveis que me permitiram superar as dificuldades ao longo destes últimos 5 anos.

E por último, um obrigado muito especial à minha namorada, Andreia Monteiro, pela compreensão e apoio ao longo de todos estes meses de preparação e desenvolvimento da Dissertação, tendo sido um pilar fundamental do meu sucesso.

Resumo

A presente Dissertação surge no contexto atual do crescimento na procura de energia proveniente de fontes renováveis. É estudado e projetado um sistema fotovoltaico híbrido, PV-TEG, que associa em conjunto painéis fotovoltaicos (PV) e geradores termoelétricos (TEG).

Esta solução foi pensada de modo a que pudesse ser aumentada a eficiência global de conversão de energia solar (em parte luminosa, em parte térmica) uma vez que, em sistemas fotovoltaicos geralmente não se recupera a energia perdida através do calor. Assim, oferece-se a possibilidade de aumentar a eficiência do sistema, uma vez que essa energia passa a ser aproveitada.

São feitos os cálculos e dimensionamentos para os filtros dos conversores presentes no sistema, bem como do painel fotovoltaico e dos módulos termoelétricos. Existe ainda um algoritmo MPPT baseado no método da condutância incremental que permite que o painel apresente a potência máxima de saída perante as condições presentes num dado momento.

De modo a que o sistema se possa interligar à rede, é necessário garantir a qualidade da energia a injetar nesta, havendo um controlo da tensão e da corrente de saída, efetuadas no inversor a jusante do sistema.

Por último, são feitas as simulações, analisados e discutidos resultados e a viabilidade do sistema em contexto real.

Palavras-Chave: Sistema fotovoltaico híbrido PV-TEG, energia solar, MPPT, condutância incremental, conversores, controlo.

Abstract

This Thesis appears in the current context of the growth in the demand of energy from renewable sources. An hybrid photovoltaic system, PV-TEG, is studied and designed, which combines photovoltaic panels (PV) and thermoelectric generators (TEG) together.

This solution was designed so that the overall efficiency of solar energy conversion (partly luminous, partly thermal) could be increased, since in photovoltaic systems it is not usual to recover the energy lost through heat. Thus, the possibility of increasing the efficiency of the system is offered, making this energy more convenient to be used.

Calculations and sizing are made for the filters of the converters present in the system, as well as the photovoltaic panel and the thermoelectric modules. There is also an MPPT algorithm based on the incremental conductance method that allows the panel to always present the maximum output power under the conditions present at a given moment.

In order for the system to be able to interconnect the grid, it is necessary to guarantee the quality of the energy to be injected into it, with a control of the output voltage and current, carried out in the inverter downstream of the system.

Finally, simulations are carried out, results are analyzed and the feasibility of the system in real context is discussed.

Keywords: Hybrid PV-TEG photovoltaic system, solar energy, MPPT, incremental conductance, converters, control.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract	viii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Acrónimos	xv
Lista de Variáveis	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Contribuições Originais	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Estrutura do Estado da Arte	6
2.2 Efeito Fotovoltaico	6
2.3 Painéis Fotovoltaicos	7
2.3.1 Modelos Matemáticos	7
2.4 Sistema Fotovoltaico	11
2.4.1 Topologias de sistemas fotovoltaicos	11
2.5 Seguimento do Ponto de Potência Máxima (MPPT)	12
2.5.1 Método Perturbar e Observar (P&O)	13
2.5.2 Método da Condutância Incremental	15
2.6 Gerador Termoelétrico	16
2.6.1 Efeito Termoelétrico	17
2.6.2 Produção de Energia utilizando o Efeito de <i>Seebeck</i>	17
2.6.3 Estimação da Potência Termoelétrica	19
2.7 Conversores CC-CC	20
2.7.1 Conversor elevador (<i>Boost</i>)	21
2.7.2 Conversor redutor-elevador (<i>Buck-Boost</i>)	23
2.8 Conversores CC-CA	25
3 Topologia de Painéis Fotovoltaicos e Geradores Termoelétricos	29
3.1 Solução escolhida (Lente de Fresnel)	30
3.2 Outras possíveis soluções	32
3.2.1 <i>Heat Pipes</i>	32
3.2.2 Sistemas Termo-Fotovoltaicos	34
3.2.3 Filtro de Radiação Infravermelha	35

4	Modelação e controlo da associação de painéis fotovoltaicos e geradores termoelétricos	37
4.1	Painel Fotovoltaico e Conversor Elevador	38
4.2	Gerador Termoelétrico	40
4.3	Algoritmo MPPT	43
4.4	Inversor	44
4.4.1	Controlo de Corrente	47
4.4.2	Controlo de Tensão	50
5	Simulação e Discussão dos Resultados	53
5.1	Painel Fotovoltaico e MPPT	54
5.2	Gerador Termoelétrico	58
5.3	Inversor	60
5.4	Sistema Final	61
6	Conclusão	67
6.1	Conclusões a retirar	68
6.2	Trabalho Futuro	68

Lista de Figuras

1	Comparação entre o crescimento da energia solar e eólica até 2018 [1].	2
2	Modelo de um díodo ideal (3 parâmetros).	8
3	Modelo de dois díodos (7 parâmetros). Adaptado de [4].	8
4	Modelo prático de um díodo (5 parâmetros).	8
5	Curvas PV e IV de uma célula fotovoltaica. Adaptado de [5].	9
6	Topologia utilizando dois andares de conversão, não isolado. Adaptado de [7].	12
7	Topologia utilizando um andar de conversão, não isolado. Adaptado de [7].	12
8	Representação gráfica do método Perturbar e Observar [10].	13
9	Fluxograma representativo do Método Perturbar e Observar. Adaptado de [10].	14
10	Curva P-V do painel escolhido, com representação das zonas importantes para o método da condutância incremental.	15
11	Fluxograma representativo do Método da Condutância Incremental [11].	16
12	Representação do Efeito Termoelétrico.	17
13	Módulo Termoelétrico aquecido por um concentrador solar [14].	18
14	Conversor CC-CC.	20
15	Conversor Elevador (<i>Boost</i>) [19].	21
16	Formas de onda do conversor elevador no modo contínuo. Adaptado de [20].	22
17	Conversor Redutor-Elevador (<i>Buck-Boost</i>) [19].	23
18	Formas de onda do conversor redutor-elevador no modo contínuo. Adaptado de [22].	24
19	Conversor CC-CA (Inversor).	25
20	Inversor monofásico de onda completa [19].	25
21	Formas de onda do inversor monofásico de onda completa, utilizando modulação sinuoidal a 3 níveis. Adaptado de [19].	26
22	Representação teórica do modelo a implementar no sistema (PV-TEG com lente de Fresnel). Adaptado de [25].	30
23	Representação teórica do modelo PV-TEG-MCHP. Adaptado de [26].	33
24	Representação das duas abordagens existentes a um sistema TPV [27].	34
25	Representação teórica do sistema Filtro IV (1 - Módulo Fotovoltaico; 2 - Módulo Termoelétrico; 3 - Dissipador de calor; 4 - Filtro IV) [28].	36
26	Painel fotovoltaico e conversor elevador com algoritmo MPPT.	39
27	Modelo matemático do Gerador Termoelétrico [30].	41
28	Modelo Gerador Termoelétrico com conversor elevador.	42
29	Diagrama do MPPT implementado no sistema.	43
30	Influência do MPPT na estabilização da potência perante uma redução na irradiância.	44
31	Representação da tensão V_{pwm} , tensão V_0 e corrente i_L [19].	45
32	Implementação do inversor a utilizar no programa de simulação numérica utilizado.	46
33	Circuito de entrada do inversor.	47
34	Diagrama de blocos do controlador de corrente.	47
35	Modelo do controlador de corrente.	48
36	<i>Root Locus</i> do controlador de corrente.	49
37	Diagrama de blocos do controlador de tensão.	50
38	Modelo do controlador de tensão.	52
39	<i>Root Locus</i> do controlador de tensão.	52

40	Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do painel fotovoltaico para o sistema incluindo MPPT.	54
41	Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do <i>Boost</i> para o sistema incluindo MPPT.	55
42	Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do painel fotovoltaico para o sistema incluindo MPPT e com variação de irradiância.	56
43	Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do <i>Boost</i> para o sistema incluindo MPPT e com variação de irradiância.	57
44	Formas de onda de tensão, corrente e potência no Gerador Termoelétrico.	58
45	Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do <i>Boost</i> a jusante do paralelo PV-TEG.	59
46	Formas de onda de tensão e corrente à saída do modelo ideal (sem perdas) do inversor a implementar.	60
47	Formas de onda à saída do painel fotovoltaico e do sistema PV-TEG.	62
48	Formas de onda à saída do sistema.	63
49	Formas de onda à saída do sistema, perante uma diminuição da irradiância.	64
50	Formas de onda à saída do sistema ao alimentar uma carga perante diminuição da irradiância.	65
51	Formas de onda à saída do sistema ao alimentar uma carga perante aumento da irradiância.	66

Lista de Tabelas

1	Tabela representativa dos diferentes valores da onda modulante de acordo com os dispositivos à condução [19].	26
2	Parâmetros elétricos do módulo PV.	38
3	Valores calculados dos parâmetros do modelo matemático do módulo PV.	38
4	Valores do Coeficiente de <i>Seebeck</i> para diferentes temperaturas.	41

Lista de Acrónimos

AC	Alternating Current
CC-CC	Corrente Contínua para Corrente Contínua
CC-CA	Corrente Contínua para Corrente Alternada
DC	Direct Current
I-V	Corrente-Tensão
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IV	Infravermelho
MCHP	Micro Channel Heat Pipe
MPPT	Seguimento do Ponto de Potência Máxima
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
PV-TEG	Painel Fotovoltaico e Gerador Termoelétrico
P-V	Potência-Tensão
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Standard Testing Conditions
TEG	Gerador Termoelétrico
TPV	Termo-Fotovoltaico
UV	Ultravioleta

Lista de Variáveis

- A Área
- C Condensador
- c Capacidade térmica mássica
- D Fator de ciclo
- dT Gradiente de temperatura
- dX Comprimento do condutor
- E_P Força Eletromotriz
- eV Eletrão-Volt
- f_{rede} Frequência na rede
- f_{PWM} Frequência de modulação
- G Irradiância
- G_i Ganho controlador corrente
- G_v Ganho controlador tensão
- H Ganho de realimentação
- I Corrente
- I_{CC} Corrente de curto circuito
- I_D Corrente no díodo
- I_i Corrente no inversor
- I_{MPP} Corrente no ponto de potência máxima
- I_{PV} Corrente gerada pelos fotões
- I_S Corrente de uma junção p-n no escuro
- K Constante de Boltzmann
- k_{FV} Fator de distorção do inversor
- K_i Coeficiente de integração para controlo de corrente
- K_{iv} Coeficiente de integração para controlo de tensão
- K_p Ganho proporcional para controlo de corrente
- K_{pv} Ganho proporcional para controlo de tensão
- L Bobina
- m Fator de não idealidade do díodo
- N_S Número de células em série
- N_P Número de células em paralelo

-
- P Potência
 - P_{MPP} Potência no ponto de potência máxima
 - P_{PV} Potência do Painel Fotovoltaico
 - P_{TEG} Potência no Gerador Termoelétrico
 - R_0 Resistência de carga
 - R_P Resistência Paralelo
 - R_S Resistência Série
 - T Temperatura
 - T_c Temperatura do lado frio
 - T_d Tempo de atraso no controlador de corrente
 - T_{dv} Tempo de atraso no controlador de tensão
 - THD Taxa de distorção harmónica
 - THD_{Pesada} Taxa de distorção harmónica pesada
 - T_h Temperatura do lado quente
 - T_p Tempo de crescimento no controlo de corrente
 - T_{pv} Tempo de crescimento no controlo de tensão
 - T_z Tempo para o cancelamento do zero do controlador de corrente
 - T_{zv} Tempo para o cancelamento do zero do controlador de tensão
 - V Tensão
 - V_a Tensão à entrada do inversor
 - V_{aref} Tensão de referência à entrada do inversor
 - V_{CA} Tensão de circuito aberto
 - V_L Tensão na bobina
 - V_o Tensão na carga
 - V_T Potencial Térmico
 - V_{MPP} Tensão no ponto de potência máxima
 - V_{pRMS} Valor eficaz da tensão de pico
 - V_{p1RMS} Valor eficaz da 1ª harmónica da tensão de pico
 - V_{PWM} Tensão modulante
 - V_{rede} Tensão na rede
 - V_{RRMS} Tensão eficaz na rede
 - α Coeficiente termodinâmico de Seebeck
 - δ_D Fator de ciclo do conversor elevador
 - η Rendimento

1 Introdução

Neste primeiro capítulo irá ser efetuada uma breve introdução à dissertação, passando pela motivação e pelos objetivos da mesma.

1.1 Motivação

Desde o início da existência da Humanidade que a obtenção, utilização e recentemente o armazenamento de energia têm sido fundamentais para o desenvolvimento humano, sendo a energia calorífica do fogo a primordial forma de energia descoberta, que permitiu um desenvolvimento sem precedentes.

A Revolução Industrial (meados do século XVIII a meados do século XIX), trouxe uma nova abordagem ao quotidiano, que passou então a ser muito mais dependente do uso de energia.

Desde então, tem-se observado um aumento no consumo de combustíveis de origem fóssil, o que tem feito com que os níveis de gases de efeito de estufa a nível mundial escalassem para um patamar extremamente perigoso, não só para o planeta como para o ser humano.

Foi nesta perspetiva que foi elaborado o Acordo de Paris (2015) que visa conter o aquecimento global abaixo de 2 °C, preferencialmente em 1,5 °C, e reforçar a capacidade dos países de responder ao desafio, num contexto de desenvolvimento sustentável. Nesta perspetiva, as principais alternativas encontradas aos combustíveis fósseis e consequente emissão de gases de efeito de estufa e alterações climáticas, são fontes de energia renovável.

Estas fontes podem ser de vários tipos, tais como a eólica, solar, geotérmica, hidroelétrica, biomassa e das ondas e marés. De todas as fontes de energia renovável, a energia solar tem vindo a ganhar relevância ao longo dos anos, isto porque a energia proveniente do sol é, à escala humana, inesgotável. No entanto, este tipo de energia ainda não alcançou, nem de perto, todo o potencial que tem, devido principalmente à relação preço/rendimento dos sistemas fotovoltaicos, pois as células fotovoltaicas apresentam baixos rendimentos (na ordem dos 15% a 20%).

Assim sendo, a investigação e desenvolvimento do aproveitamento da energia solar é fundamental a curto, médio e longo prazo, sendo uma das principais fontes de "esperança" para que se alcance sucesso no Acordo de Paris, chegando a uma situação de sustentabilidade energética, tal como se pode observar na figura (1), onde estão presentes as evoluções de crescimento na produção de energia solar e energia eólica, até ao ano de 2018.

Neste sentido, a motivação desta dissertação prende-se precisamente com a importância, em termos futuros, deste desenvolvimento e investigação.

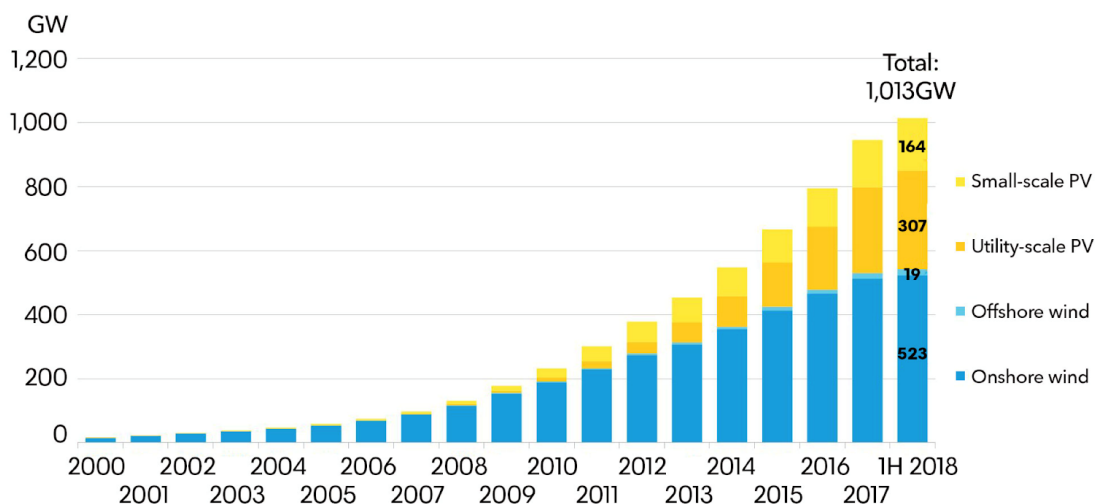


Figura 1: Comparação entre o crescimento da energia solar e eólica até 2018 [1].

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma estrutura de painéis fotovoltaicos e geradores termoelétricos acoplados a conversores de potência, comandados por um sistema de seguimento de ponto de potência máxima (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*). A estrutura inclui ainda um sistema de conversão termoelétrica de energia.

Os objetivos fundamentais do projeto serão:

- Definir a estrutura de painéis fotovoltaicos e conversores;
- Definir a estrutura de conversão da energia térmica;
- Projetar o sistema de seguimento de potência máxima, interligando-o a todos os outros subsistemas, de modo a aumentar o rendimento global do sistema;
- Obter os modelos dos vários subsistemas (fotovoltaico, conversores, MPPT e gerador termoelétrico);
- Realizar simulações comparativas para os elementos constituintes do sistema.

1.3 Contribuições Originais

A contribuição original desta Dissertação é o desenvolvimento de um sistema que permita o funcionamento no ponto de potência máxima (MPPT) da transformação direta de energia térmica (que é desperdiçada nos painéis fotovoltaicos) em energia elétrica, a partir da utilização de um Gerador Termoelétrico, que permita efetuar este processo com a maior eficiência possível.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro destes contém a introdução, que engloba em si a motivação, os objetivos, as contribuições originais e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo trata acerca do estado da arte, sendo que neste capítulo é abordada toda a fundamentação teórica sobre a qual a dissertação é desenvolvida, incluindo informação pertinente acerca de todos os subsistemas que são abordados nesta, incluindo o efeito fotovoltaico, os painéis fotovoltaicos, o sistema fotovoltaico, o MPPT, o gerador termoelétrico e ainda os conversores a utilizar.

No capítulo três é abordada a topologia do sistema, no que diz respeito à parte fotovoltaica do mesmo e também à parte termoelétrica e o modo como estes dois sistemas independentes se podem interligar entre si.

No quarto capítulo é efetuada a modelação do sistema, efetuando-se a análise de cada um dos sistemas separadamente, sendo estes o painel fotovoltaico, o conversor elevador, o gerador termoelétrico, o algoritmo MPPT e ainda o inversor a utilizar, incluindo neste os mecanismos de controlo utilizados.

No capítulo cinco, é efetuada a simulação e análise do sistema em geral, considerando as diferentes interligações entre os diferentes subsistemas, de modo a garantir o maior aproveitamento de energia produzida das diferentes formas (fotovoltaica e termoelétrica). Descrevem-se ainda todas as considerações efetuadas de modo a chegar a tais resultados, comparando os valores teóricos com os obtidos nas simulações, verificando por fim a viabilidade do sistema.

No sexto e último capítulo desta dissertação, serão efetuadas as conclusões necessárias, fazendo uma reflexão generalizada acerca dos resultados obtidos, da viabilidade do sistema e do seu possível uso em contexto de aplicação na vida real, como uma forma de produzir energia "verde", de forma segura e fiável.

2 Estado da Arte

Neste segundo capítulo irá ser tratado o estado da arte, contemplando toda a teoria que servirá de base à dissertação.

2.1 Estrutura do Estado da Arte

Este capítulo tem como objectivo apresentar, de uma forma geral, os conceitos básicos e as tecnologias e algoritmos utilizados usualmente em sistemas fotovoltaicos, tendo em atenção a descrição detalhada acerca dos subsistemas que serão utilizados na composição do sistema que será objeto de estudo nesta dissertação.

Primeiramente, na secção 2.2, será efetuada uma breve abordagem ao efeito fotovoltaico. Na secção 2.3 explica-se o funcionamento dos painéis fotovoltaicos, tendo em conta os modelos matemáticos que os descrevem.

Na secção 2.4 é feita uma descrição sobre os constituintes de um sistema fotovoltaico e são apresentadas algumas das topologias existentes para estes. Na secção 2.5, faz-se uma descrição geral dos vários tipos de algoritmos MPPT existentes, focando principalmente naquele que será utilizado neste sistema.

Na secção 2.6 será descrito no que consiste um gerador termoelétrico, e de que forma se interliga a um sistema fotovoltaico. Na secção 2.7, será analisada a topologia e a utilização de conversores comutados CC-CC no contexto de sistemas fotovoltaicos. Por fim, na secção 2.8 serão abordados de forma breve os conversores CC-CA.

2.2 Efeito Fotovoltaico

Parte fundamental de um sistema de produção de energia eléctrica a partir da radiação solar é o efeito fotovoltaico, pois sem este, não seria possível a conversão direta da energia solar em energia eléctrica. Assim, em primeiro lugar o que é, e como se caracteriza o efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico foi descoberto inicialmente por Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, sendo posteriormente comprovado por Albert Einstein, em 1921. Permite obter uma tensão eléctrica num material, a que poderá corresponder uma corrente eléctrica num circuito exterior, após a sua exposição à luz.

O efeito fotovoltaico está diretamente relacionado com o efeito fotoelétrico, no entanto, tratam-se de processos diferentes. No efeito fotoelétrico, os eletrões são ejetados da superfície de um material após exposição a radiação com energia suficiente.

O efeito fotovoltaico é diferente porque os eletrões são transferidos entre bandas diferentes (das bandas de valência para bandas de condução) dentro do próprio material, resultando no desenvolvimento de tensão eléctrica entre dois elétrodos, deixando na banda de valência aquilo que se designa por buraco. Esta energia de transição entre bandas é designada por hiato (*Band Gap Energy*), tendo para o silício o valor de 1.12 eV [2].

As células fotovoltaicas são formadas pela junção de duas camadas de silício dopadas do tipo n e do tipo p. O seu funcionamento baseia-se no efeito fotovoltaico, ou seja, a radiação solar que incide sobre as células leva a que alguns eletrões na banda de valência adquiram energia suficiente para passarem para a banda de condução e com isto fazerem parte de uma corrente eléctrica.

Se a junção p-n for sujeita a uma radiação, ocorre a absorção de fótons na camada do tipo n e conseqüente formação de pares eletrão-buraco, o que irá levar ao aumento da concentração de eletrões e buracos/lacunas, sendo que estas concentrações situam-se, no caso dos eletrões, na camada do tipo n e, no caso dos buracos, na camada do tipo p. Desta forma, é gerada uma tensão nos terminais externos da junção p-n, criando uma corrente eléctrica num circuito exterior [3].

2.3 Painéis Fotovoltaicos

Um painel fotovoltaico é uma associação de células fotovoltaicas em série e/ou paralelo, sendo que as células têm como material base o silício.

Em termos da construção de um painel, depois da junção p-n ser produzida, para servir de base à célula, aplica-se uma camada de metal condutor na parte superior da junção, com o objetivo de funcionar como contacto físico para a ligação de condutores. Essa camada de metal necessita de ser muito fina e transparente para que a radiação solar possa incidir no material semiconductor mas que ao mesmo tempo, possa conduzir a corrente que está a ser injetada num circuito exterior. Na parte inferior da célula é colocada uma camada de metal em toda a sua área, visto que não existe incidência de radiação solar.

Dos vários tipos de painéis produzidos, há 3 tipos que são os mais utilizados, sendo eles os painéis compostos por silício mono-cristalino (maior pureza, maior rendimento, na ordem dos 13% a 18%), silício poli-cristalino (menor rendimento, na ordem dos 11% a 15%) e silício amorfo (silício não cristalino, rendimento de 8% a 10%).

As principais aplicações dos painéis fotovoltaicos podem ser para Alta Potência (acima das centenas de kW) e Baixa Potência (abaixo das centenas de kW). No primeiro caso, para a produção descentralizada ligada à rede. No segundo caso, para alimentar sinais de trânsito, centrais de telecomunicações, ou alimentação de sistemas eletrónicos em lugares remotos e produção habitacional [3].

2.3.1 Modelos Matemáticos

Como referido anteriormente, um painel fotovoltaico é composto pela combinação de células fotovoltaicas em série e paralelo. As células ligadas em série (N_s) são responsáveis pelo valor de tensão do painel, enquanto que a ligação em paralelo (N_p) de várias células, faz aumentar a corrente do painel para os valores desejados. Estes valores de tensão e corrente são estipulados pelo fabricante do painel.

Os modelos matemáticos que melhor descrevem o comportamento de um painel fotovoltaico, para que se possa implementar um MPPT são três [3]:

- Modelo de um díodo ideal (modelo de 3 parâmetros);
- Modelo prático de um díodo (modelo de 5 parâmetros);
- Modelo de dois díodos (modelo de 7 parâmetros).

À medida que aumenta o número de parâmetros, aumenta também a complexidade do sistema e das equações envolvidas, sendo que, de todos estes, o de 3 parâmetros é o mais básico, no entanto mostra pouco grau de exatidão no que toca à aproximação com a realidade das curvas I-V e P-V do painel.

O modelo ideal e equivalente de uma célula solar, geralmente conhecido como modelo de um díodo e 3 parâmetros, é delimitado pelos três seguintes parâmetros: corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar (I_{PV}), corrente de uma junção p-n no escuro (I_S) e o fator de não-idealidade do díodo (m).

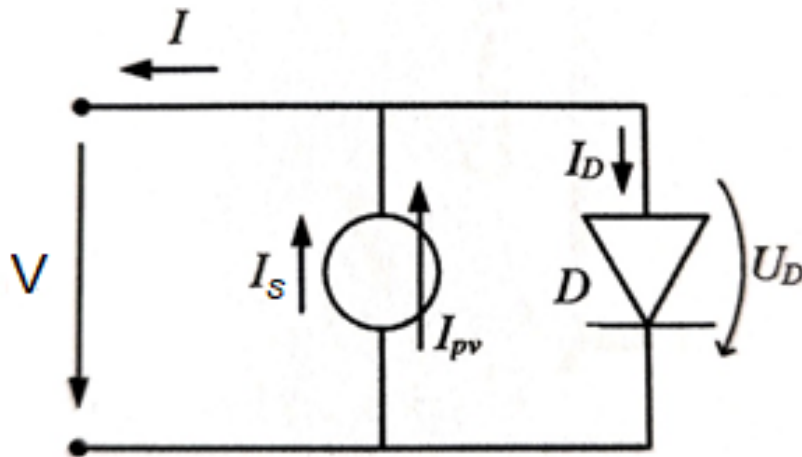


Figura 2: Modelo de um díodo ideal (3 parâmetros).

O modelo de 7 parâmetros tem um elevado grau de proximidade com os valores reais, no entanto, é bastante complexo o que faria com que tivesse de haver um elevado número de iterações para se chegar aos resultados. Este modelo encontra-se representado na figura (3).

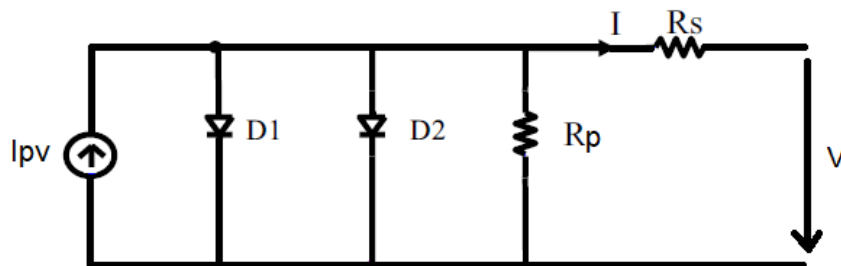


Figura 3: Modelo de dois díodos (7 parâmetros). Adaptado de [4].

Por ser relativamente simples, e com um bom grau de aproximação a um modelo real, o mais utilizado é o modelo de 5 parâmetros. Neste modelo de 5 parâmetros, os parâmetros desconhecidos são I (corrente), V (tensão), m (fator de não idealidade), R_p (resistência paralelo) e R_s (resistência série).

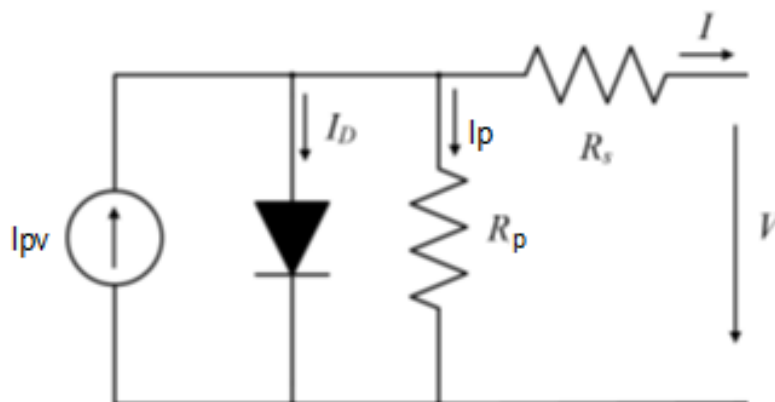


Figura 4: Modelo prático de um díodo (5 parâmetros).

O modelo mais aceito, e que será utilizado no estudo do sistema a implementar nesta dissertação, é o de 5 parâmetros que assume que as variações de m , R_P e R_S são independentes das variações ambientais sob as quais o painel se encontra.

Ainda assim, as variações destes 3 parâmetros são tão pequenas quando comparadas com as variações de I_{CC} e V_{CA} , que se consideram valores constantes de modo a simplificar o modelo.

Note-se que, tanto o valor de I_{CC} como V_{CA} são sensíveis às variações quer de temperatura, quer de irradiância, no entanto, I_{CC} tem uma maior sensibilidade à variação de irradiância e V_{CA} tem uma maior sensibilidade à variação de temperatura [3].

Existem dois conjuntos de valores normalizados para os quais se obtém as curvas I-V de um painel ou de uma célula fotovoltaica. Esses conjuntos são os valores obtidos em STC (*Standard Testing Conditions* – 25 °C e 1000W/m²) e em NOCT (*Normal Operating Cell Temperature* – 20 °C e 800W/m²).

Um exemplo de curvas características de um painel fotovoltaico encontram-se representadas na figura (5).

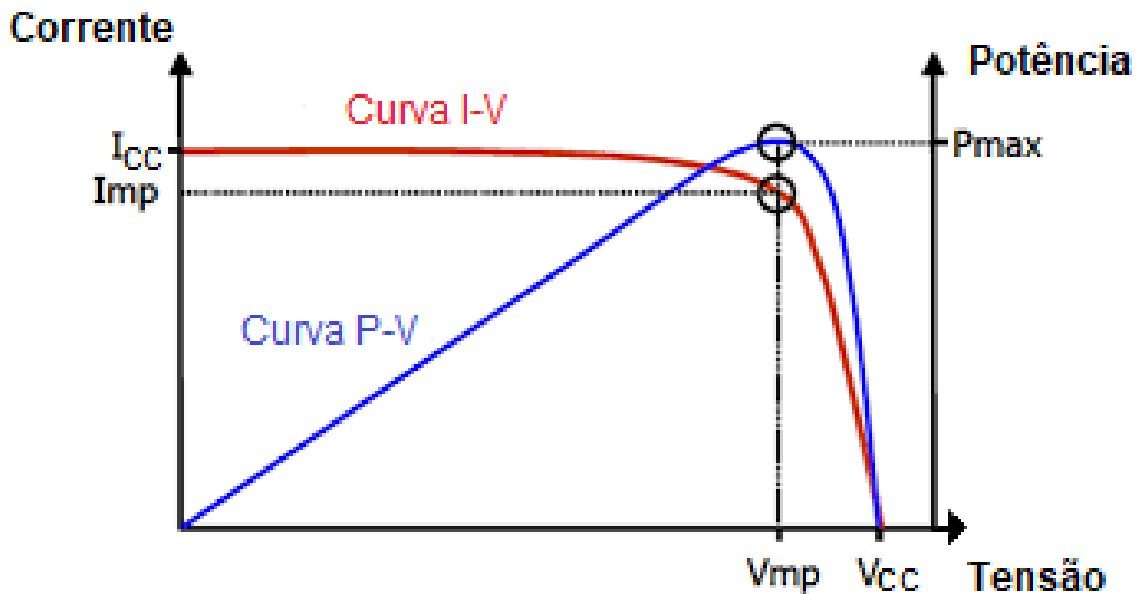


Figura 5: Curvas PV e IV de uma célula fotovoltaica. Adaptado de [5].

Definam-se as expressões que permitem obter os parâmetros característicos do sistema. Comece-se pela expressão que permite obter a corrente de saída da célula para o modelo de 5 parâmetros, representada na equação (1).

$$I = I_{PV} - I_D - I_P \quad (1)$$

De onde se sabe que I_{PV} representa a corrente fotovoltaica gerada pela célula, que depende de I_{CCfab} (corrente de curto-circuito de referência do fabricante, que é dado em A), de G que é dado em W/m² e de G_{ref} que é dado por 1000 W/m².

$$I_{PV} = I_{CCfab} \frac{G}{G_{ref}} \quad (2)$$

A expressão que permite calcular I_D , que é a corrente que percorre o díodo é dada por

$$I_D = I_S(e^{\frac{mV}{V_T}} - 1) \quad (3)$$

Onde I_S é a corrente inversa máxima de saturação do díodo, V a tensão aos terminais da célula, m o fator de não idealidade do díodo (num díodo ideal $m = 1$, num díodo real $m > 1$), V_T é o potencial térmico ($V_T = \frac{KT}{q}$), onde $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzmann), T é a temperatura da célula em K e q é a carga do eletrão ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) [3].

Tendo em conta os valores de R_S e de R_P , a expressão da corrente toma o seguinte aspeto:

$$I = I_{PV} - I_S(e^{\frac{q(IR_S + V)}{mKT}} - 1) - \left(\frac{IR_S + V}{R_P}\right) \quad (4)$$

Sendo que é possível simplificar, resolvendo em ordem a I , obtendo-se

$$I = \frac{I_{PV} - I_S(e^{\frac{q(IR_S + V)}{mKT}} - 1) - \left(\frac{V}{R_P}\right)}{\frac{R_S}{R_P} + 1} \quad (5)$$

A partir desta expressão pode ser obtida a corrente de curto-circuito, que é dada quando $V=0$,

$$I_{CC} = I_{PV} - I_S(e^{\frac{q(I_{CC}R_S)}{nKT}} - 1) - \left(\frac{I_{CC}R_S}{R_P}\right) \quad (6)$$

Sendo que é possível simplificar, resolvendo em ordem a I_{CC} , obtendo-se

$$I_{CC} = \frac{I_{PV} - I_S(e^{\frac{q(I_{CC}R_S)}{nKT}} - 1)}{\frac{R_S}{R_P} + 1} \quad (7)$$

É possível também obter a tensão de circuito aberto, tendo em conta que o circuito aberto ocorre quando $I=0$,

$$V_{CA} = \frac{mK_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{PV}}{I_S} + 1\right) \quad (8)$$

Os parâmetros do modelo são obtidos, no caso da tensão de circuito aberto, sabendo que este é o valor de tensão máxima que o módulo solar pode entregar a uma carga sob determinadas condições de radiação e de temperatura, correspondentes a uma corrente de valor nulo e, conseqüentemente potência nula.

A corrente de curto circuito é o valor da corrente máxima que o módulo solar pode entregar a uma carga sob determinadas condições de radiação e temperatura correspondentes a um valor de tensão nula e, conseqüentemente, potência nula.

De modo a obter-se a Potência Máxima de saída da célula, calcula-se:

$$P_{MPP} = I_{MPP}V_{MPP} \quad (9)$$

Onde I_{MPP} e V_{MPP} são, respetivamente, os valores de corrente e tensão no ponto de máxima potência do painel. Este parâmetro é importante pois uma das partes da tese será focada no seguimento deste ponto de máxima potência.

Os parâmetros do modelo equivalente (R_P e R_S) são obtidos ao aplicar processos iterativos às equações (4) a (7), tendo em conta os valores presentes no *Datasheet* do painel fotovoltaico para V_{CA} , I_{CC} , V_{MPP} , I_{MPP} , I_S e I_{PV} .

2.4 Sistema Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é composto por um ou mais painéis fotovoltaicos, associados em série e/ou paralelo, por um ou vários conversores eletrónicos de potência, por um sistema MPPT, por um filtro de saída, pela rede de energia elétrica e por um conversor CC-CA que permite converter a tensão/corrente contínuas obtidas à saída do painel em grandezas alternadas, para que a potência de saída deste conversor possa ser utilizada em aplicações que utilizem corrente alternada.

No caso do sistema implementado nesta dissertação, o sistema fotovoltaico irá ainda comportar um gerador termoelétrico associado. Note-se que, caso necessário, há situações em que se utilizam também conversores CC-CC de modo a poder elevar o nível de tensão de saída do sistema (conversores elevadores).

Analisem-se então, as diferentes topologias utilizadas em sistemas fotovoltaicos, tendo em conta a passagem de corrente contínua para alternada (note-se que os conversores CC-CA serão abordados no sub-capítulo 2.8 quanto às suas características, enquanto que neste sub-capítulo apenas se abordam as topologias).

Existem diversas topologias que podem ser implementadas em sistemas fotovoltaicos, dependendo da aplicação pretendida. Destacam-se as topologias isoladas, as não isoladas, as de um andar ou vários andares de conversão. Estudem-se então os diferentes tipos de topologias existentes.

2.4.1 Topologias de sistemas fotovoltaicos

Em primeiro lugar importa referir que todos os sistemas fotovoltaicos têm o objetivo de produzir energia para uma dada aplicação. Dependendo do objetivo para o qual se destinam, poderão ter, ou não, a necessidade de incluir um conversor elevador, um inversor ou até mesmo um transformador de alta frequência [6].

Comece-se por abordar a topologia mais utilizada a nível de produção e consumo doméstico. Esta será também a topologia utilizada no estudo do modelo desta dissertação.

Neste caso, irá existir um conversor CC-CC *Boost*, que terá incluído o algoritmo MPPT, conectado em paralelo a montante a um condensador de desacoplamento e a jusante a outro, sendo o nível de saída de 400V a 700V, interligando-se a um inversor monofásico ou trifásico (dependendo da potência exigida), para que se possa estabelecer a ligação à rede, a uma frequência de 50Hz.

Neste caso, é necessária a utilização de um filtro à saída do conversor CC-CA, para atenuar as harmônicas de alta frequência. Esta topologia, é a topologia de dois andares de conversão, pois utiliza dois conversores (um CC-CC e um CC-CA) não isolado, pois não tem transformador. Mostra-se, na figura (6), o esquema representativo deste tipo de topologia.

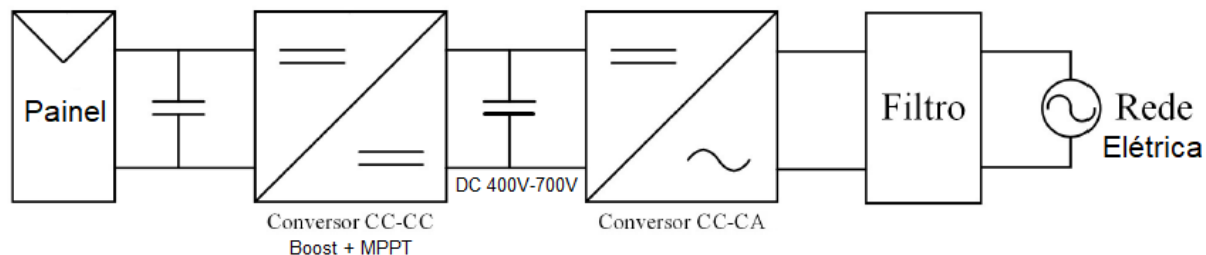


Figura 6: Topologia utilizando dois andares de conversão, não isolado. Adaptado de [7].

Analise-se agora outro tipo de topologia, que consiste numa aplicação para, por exemplo, alimentar uma pequena bomba DC a utilizar em contexto doméstico. Existe apenas a necessidade de ajustar o valor de tensão de acordo com a especificação da bomba em questão. Utiliza-se então um sistema fotovoltaico com apenas um andar de conversão, não isolado devido à ausência de transformador.

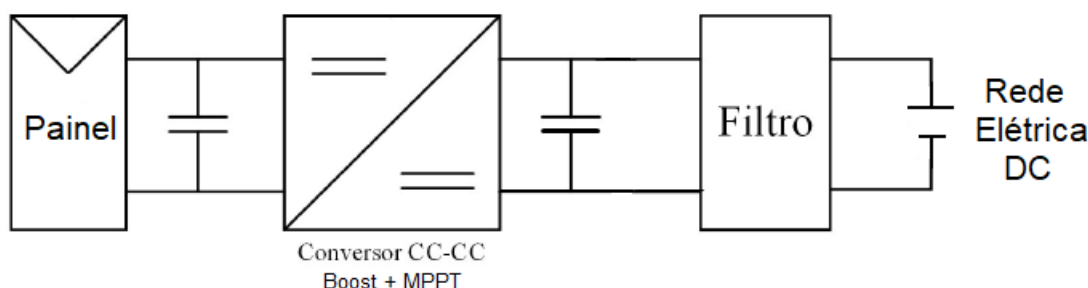


Figura 7: Topologia utilizando um andar de conversão, não isolado. Adaptado de [7].

Note-se que existem ainda muitas outras topologias que são utilizadas. Optou-se por falar nestas duas pois cada uma delas tem como finalidade a utilização em aplicações diferentes. Existem aplicações que exigem vários andares de conversão e diferentes tipos de isolamento, dependendo do fim pretendido [6].

2.5 Seguimento do Ponto de Potência Máxima (MPPT)

A potência de saída de um painel é expressa em função da irradiância e da temperatura, tal como já foi referido no sub-capítulo 2.3. A radiação solar incidente nos painéis sofre alterações ao longo do tempo, devido à rotação da Terra e também porque pode haver sombreamento parcial de algumas células, nomeadamente pela passagem de nuvens.

Como consequência, o ponto de potência máxima dos painéis muda constantemente fazendo com que o ponto de operação do sistema fotovoltaico também mude, para maximizar o aproveitamento energético. Para que os painéis possam fornecer a sua potência máxima, em todas as circunstâncias, e de modo a manter o valor de potência de saída no máximo (dependendo das condições), existem técnicas específicas, denominadas por Técnicas de Seguimento do Ponto de Potência Máxima (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*).

Entre elas existem as que resultam de métodos diretos e as que resultam de métodos indiretos. Nos métodos diretos, destacam-se o "Método Perturbar e Observar" e o "Método da Condutância Incremental". Nos indiretos, destaca-se o "Método da Lógica Difusa" [8] e [9]. Note-se que, para além destes métodos, existem muitos outros que são utilizados, no entanto, no âmbito desta dissertação, apenas importam referir estes três.

2.5.1 Método Perturbar e Observar (P&O)

Este método consiste em efetuar uma perturbação no módulo, ao aplicar uma variação ao valor de tensão. A representação gráfica deste método encontra-se na figura (8).

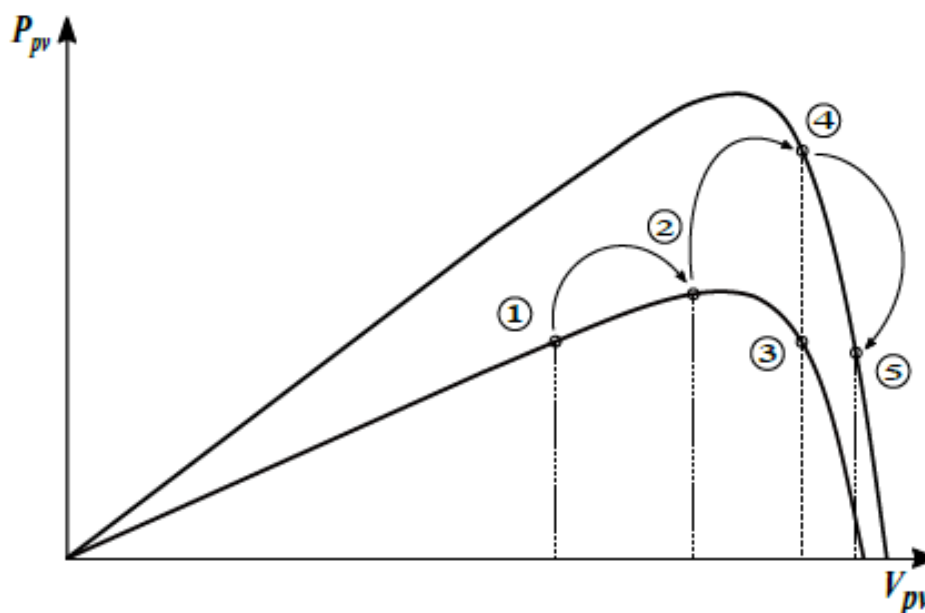


Figura 8: Representação gráfica do método Perturbar e Observar [10].

Na figura (8) estão representadas duas curvas P-V, em dois níveis de irradiância diferentes. Em *steady-state*, com condições de irradiância constantes, o funcionamento normal será a sequência 1-2-3-2-1 indefinidamente.

No entanto, se quando o ponto de operação P-V está a ser movido de 2 para 3 e houver um aumento repentino de irradiância, então o novo ponto de operação é o 4. A próxima etapa do P&O Convencional é continuar a perturbação na mesma direção, então o seguinte ponto de operação será representado pelo número 5 [10].

Se um aumento de tensão levou a um aumento de potência, significa que o novo ponto de operação está à esquerda do ponto de potência máxima na curva de potência (figura (8)). Se por outro lado, um aumento na tensão levar à diminuição da potência, significa que o novo ponto de operação está à direita do ponto ótimo [10].

Tendo em conta isto, o controlador atua sobre o valor da tensão do módulo, deslocando-o mais para a direita, ou mais para a esquerda, respetivamente. Isto pode fazer com que o algoritmo oscile em torno do ponto de potência máxima (MPP), o que leva a perda de eficiência.

A perda pode ser atenuada ao ter uma variável de perturbação que se torna mais pequena quanto mais próximo se estiver do MPP. Por vezes, este procedimento é pouco viável na prática uma vez que começa a divergir do MPP e como o tamanho do *step* foi reduzido, o controlador será mais lento a encontrar o novo MPP [10].

Este método é bastante utilizado devido à sua simplicidade, uso da corrente e tensão como variável de controlo, ter fácil implementação no conversor *Boost*, convergência rápida (número reduzido de iterações) e insensibilidade às rápidas e repetidas mudanças na temperatura ambiente e irradiância.

No fluxograma representativo deste método, que se apresenta na figura (9), ΔD representa a perturbação efetuada ao sistema, sendo que V , I e P representam, respetivamente, a tensão do módulo, a sua corrente e a sua potência.

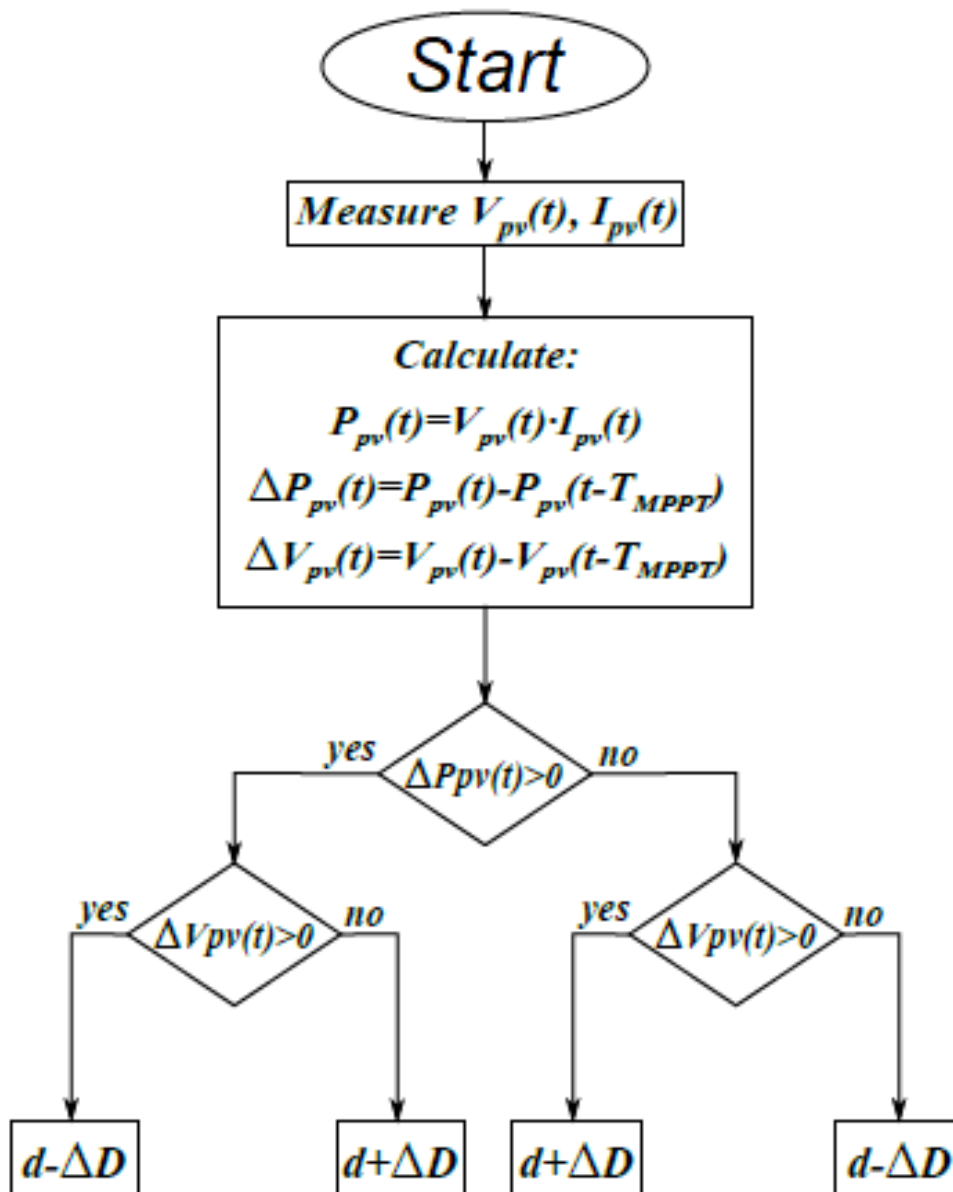


Figura 9: Fluxograma representativo do Método Perturbar e Observar. Adaptado de [10].

2.5.2 Método da Condutância Incremental

O método da condutância incremental é o método que apresenta melhor resultado entre os demais citados, pois maior velocidade de convergência e baixa oscilação em regime permanente, porém exige um esforço computacional mais alto, por parte do sistema. Por ser o que apresenta melhor resultado, será o utilizado no modelo que servirá de base a esta dissertação.

Sabe-se que a condutância é dada por I/V . Em termos gráficos, sabe-se que o valor da derivada dP/dV é 0 no ponto de máxima potência, sendo que, nesta mesma curva (curva P-V), o valor desta derivada é negativo à direita do ponto ótimo e positivo à esquerda do ponto ótimo (note-se que direita e esquerda são sempre tendo em conta o valor de tensão maior ou menor, respetivamente, do V_{mpp}) [11].

A representação deste método encontra-se na figura (10), retirada da simulação efetuada no programa de simulação numérica utilizado, para o painel escolhido.

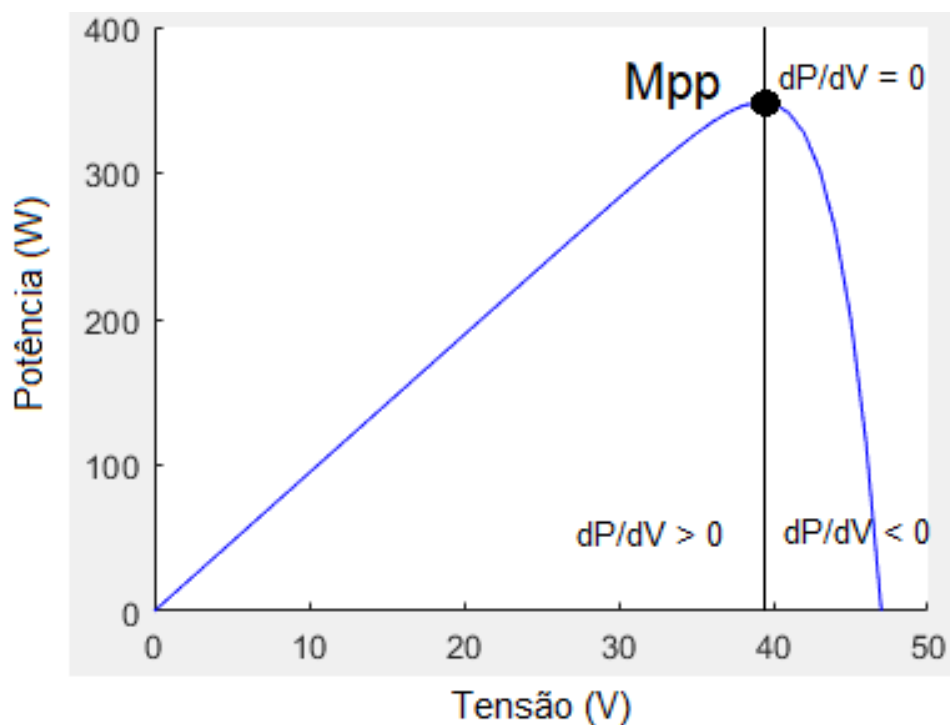


Figura 10: Curva P-V do painel escolhido, com representação das zonas importantes para o método da condutância incremental.

O tamanho do *step* aplicado será proporcional à derivada. Uma vez chegado ao MPP, este valor é mantido até que seja detetada uma nova variação no valor da corrente, decorrente de variações atmosféricas. Na figura (11), apresenta-se o fluxograma que representa este método.

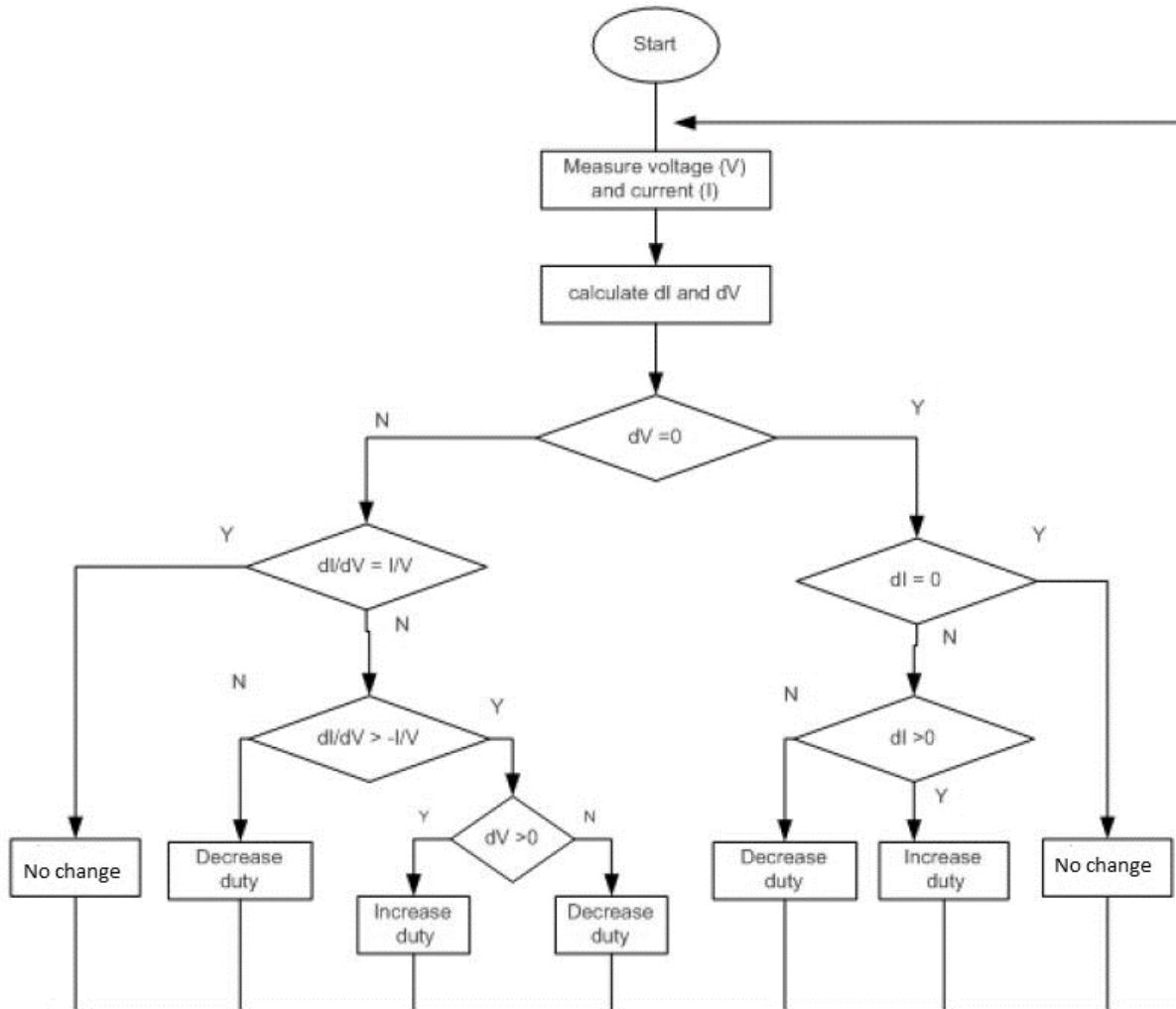


Figura 11: Fluxograma representativo do Método da Condutância Incremental [11].

Em relação ao "Método da Lógica Difusa", este apesar de ter sido referido, não será abordado uma vez que seria de bastante difícil implementação no sistema que serve de estudo nesta dissertação. Os métodos indiretos tendem a ser mais difíceis de implementar em contexto real.

2.6 Gerador Termoelétrico

Para se falar do gerador termoelétrico, é necessário enquadrar primeiro no contexto do efeito que torna possível a existência de um gerador que utilize a energia térmica para produzir eletricidade. Este é o Efeito Termoelétrico, que consiste na relação entre a temperatura de uma junção de dois condutores diferentes e uma tensão eléctrica, tal como mostrado na figura (12).

2.6.1 Efeito Termoelétrico

Dentro do Efeito Termoelétrico, destacam-se dois efeitos distintos, o de *Seebeck* e o de *Peltier*.

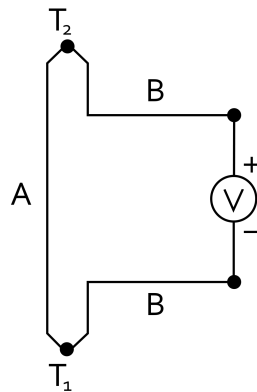


Figura 12: Representação do Efeito Termoelétrico.

Tal como se pode observar na figura (12), a existência de uma diferença de temperatura entre dois condutores diferentes, nos pontos T_1 e T_2 irá fazer com que seja gerada uma diferença de potencial (tensão), ou então, esta diferença de potencial irá fazer com que as temperaturas sejam distintas nestes dois pontos referidos.

O Efeito termoelétrico ocorre nos dois sentidos, quer seja na produção de eletricidade a partir de diferenças de temperatura, ou a produção de diferença de temperatura entre dois pontos a partir de eletricidade.

Efeito de Seebeck: O efeito *Seebeck* é a produção de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre duas junções de condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando elas estão a diferentes temperaturas (força eletromotriz térmica) [12].

É o inverso do efeito *Peltier* que é a produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma diferença de potencial (tensão elétrica) num circuito fechado (consequentemente, percorrido por uma corrente elétrica).

Estes dois efeitos podem ser também considerados como um só e denominado de efeito *Peltier-Seebeck* ou efeito termoelétrico. Um dispositivo termoelétrico é baseado no Efeito de *Peltier* e no Efeito de *Seebeck*.

É capaz de converter uma tensão de entrada em uma diferença de temperatura que pode ser utilizada para aquecer ou arrefecer uma superfície. Também pode funcionar como gerador, uma vez que, a partir de um diferencial de temperatura, produz uma tensão DC aos seus terminais [13].

2.6.2 Produção de Energia utilizando o Efeito de Seebeck

Nesta dissertação, procura obter-se energia elétrica através do calor rejeitado pelo painel, então, o modo de funcionamento neste caso baseia-se em converter o calor em uma tensão DC. Quanto maior a diferença de temperatura entre o lado quente (parte posterior do painel) e o lado frio (parte posterior do gerador termoelétrico, exposta apenas à temperatura ambiente), maior será a potência gerada pelo dispositivo.

De seguida, ilustra-se na figura (13) a forma como uma lente de Fresnel pode concentrar raios solares em geradores termoelétricos. É de notar, no entanto, que no caso dos módulos utilizados nesta dissertação, não serão utilizadas as lentes de Fresnel da forma que se encontra representada na figura (13), onde se tem a concentração dos raios solares de forma direta. A topologia utilizada nesta dissertação será representada e explicada no capítulo 3.

Irá fazer-se uso de um concentrador térmico de modo a concentrar o calor numa área mais pequena pois, como de seguida se verá, a área ocupada pelos módulos termoelétricos será bastante pequena comparada com a área do painel.

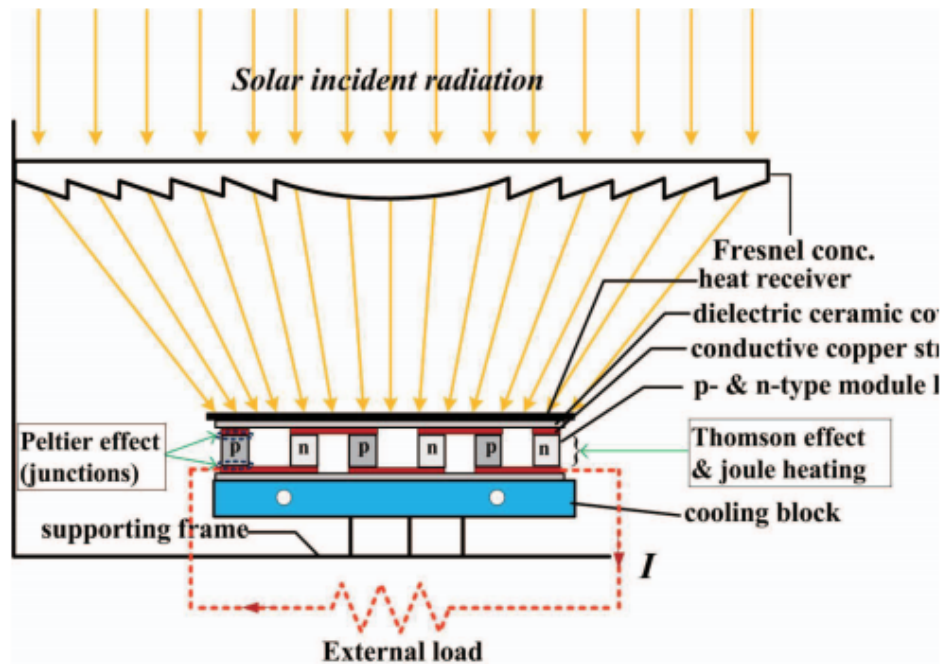


Figura 13: Módulo Termoelétrico aquecido por um concentrador solar [14].

O gerador termoelétrico é composto por várias camadas de diferentes materiais com diferentes componentes e espessuras, contendo também área de transferência de calor superficial dos componentes, a resistência de contacto térmico na interface entre os componentes e a resistência térmica dos componentes [14].

O Efeito de *Seebeck* consiste na transferência de energia do lado quente para o lado frio. Esse fluxo de energia é proporcional à condutividade térmica do condutor. Além do fluxo de energia, a diferença das temperaturas provoca um campo elétrico no condutor, ou seja, o gradiente térmico do condutor provoca uma força eletromotriz (E_p), como se pode ver na seguinte equação [15]:

$$E_p = \alpha \frac{dT}{dX} dx \quad (10)$$

Da equação acima, sabe-se que dT representa o gradiente de temperatura, para um determinado comprimento do condutor dX , E_p é a força eletromotriz e é expressa em mV e α é o coeficiente termodinâmico de *Seebeck*, que varia de material para material, e que é expresso em mV/°C. Caso o material seja homogéneo o comprimento do condutor deixa de ser tido em conta, sendo que neste caso $dx = dX$.

Deste modo obtém-se a expressão que descreve o efeito termoelétrico [15],

$$E_P = \alpha dT \quad (11)$$

No entanto, será necessário incluir um dissipador de calor no sistema, uma vez que a parte inferior das células tem de dissipar o calor, caso contrário o rendimento dos módulos termoelétricos seria demasiadamente baixo.

Refira-se também que os módulos termoelétricos são colocados entre a face do painel solar que está à sombra e um dissipador ao ar (parte fria), como se mostrará no capítulo 3. É portanto necessário perceber quantos módulos serão necessários instalar, tendo em conta os valores de rendimento e também o valor máximo de saída de potência gerada por este gerador.

Este valor máximo de potência de saída do gerador termoelétrico é calculado tendo em conta a energia perdida na produção de energia pelo painel fotovoltaico. Ou seja, no limite, o gerador termoelétrico poderá gerar uma potência elétrica correspondente à energia perdida para um valor de irradiância de 1000 W/m^2 .

2.6.3 Estimação da Potência Termoelétrica

Considerando um valor de irradiância $G = 1000 \text{ W/m}^2$, e o painel fotovoltaico que foi escolhido para esta dissertação (HTM325 345PA-72), com área de $1,941 \text{ m}^2$, obter-se-ia um valor de potência de saída de 1941 W . No entanto, o valor de potência de saída do painel para estas condições de irradiância é de 345 W , o que corresponde a um rendimento do painel de aproximadamente $17,8\%$.

Ou seja, cerca de $82,2\%$ da energia é perdida no processo. Estima-se que cerca de metade é energia refletida e radiada pela superfície do painel e a outra metade são perdas de condução, dos semicondutores constituintes do painel [16].

Significa isto que cerca de 1596 W são desperdiçados no processo. Assume-se que, no que toca à potência térmica, cerca de $55,3\%$ se encontra na parte posterior das células. Assim, a potência que se pode utilizar para gerar energia elétrica a partir do calor proveniente da parte posterior serão cerca de 883 W térmicos.

Quanto ao módulo termoelétrico escolhido, TEG1-12611-6.0, cujo *datasheet* se encontra em anexo, tem uma área $A = 5,6 \text{ cm} \cdot 5,6 \text{ cm} = 31,6 \text{ cm}^2 = 31,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ e uma potência elétrica máxima de $14,6 \text{ W}$ (para uma temperatura do lado quente de 300°C e do lado frio de 30°C). No entanto para um valor de temperatura do lado quente mais baixo, o valor de potência será menor. Importa então encontrar o rendimento do módulo termoelétrico de modo a poder calcular-se o número de módulos a utilizar para constituir um gerador termoelétrico bem adaptado ao caso em estudo.

O rendimento teórico de um módulo termoelétrico pode ser dado pela seguinte expressão [17]:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (12)$$

Refira-se ainda que T_h é a temperatura no lado quente do módulo (encostado à parte posterior do painel) e T_c é a temperatura no lado frio, neste caso o ar. Estes valores são dados em Kelvin e assume-se, para efeitos de cálculo um valor de 30°C (303 K ($30^\circ\text{C}+273$)) para o lado frio e 200°C para o lado quente (473 K ($200^\circ\text{C}+273$)), estando a explicação destes valores no capítulo 3.

Assim, dos cerca de 883W térmicos, apenas será possível serem obtidos 123,6W elétricos, sendo esse o valor de potência que é possível acrescentar ao sistema, com a utilização de módulos termoelétricos. Pelo *datasheet* do módulo escolhido (Anexo C), para as temperaturas consideradas, tem-se uma potência de saída de cada módulo de 8,24W elétricos, pois embora pela equação (12) se obtenha um rendimento teórico de 64%, na realidade o valor é bastante inferior a este (14%), pois na realidade existe um aumento da resistência térmica nos materiais constituintes dos módulos com um aumento da temperatura, que não é considerado na equação (12).

Deste modo, terão de ser instalados 15 módulos, que irão ocupar uma área de $0,0474 m^2$, gerando 123,6W de potência elétrica adicional, a somar aos 345W do painel. No entanto, para que tal seja possível, é necessário utilizar um concentrador de calor que irá permitir que a energia térmica disponível em $1,941 m^2$ passe a estar disponível na área abrangida pelos módulos, algo que será explicado com mais detalhe no capítulo 3.

Note-se ainda que, para valores de irradiância mais baixa, a temperatura será menor nos painéis e por conseguinte também no lado quente do TEG, pelo que se terá de utilizar também um MPPT, tal como é feito no caso do painel fotovoltaico, de modo a poder obter sempre o valor de potência máxima de funcionamento do gerador termoelétrico, para determinado valor de temperatura.

2.7 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC (esquema da figura (14)) são amplamente utilizados nos sistemas fotovoltaicos. Estes conversores controlam a tensão e a corrente numa carga através de um circuito com semicondutores de potência, de modo a manter, através do tempo de abertura e fecho dos mesmos, a saída desejada, de acordo com a aplicação.

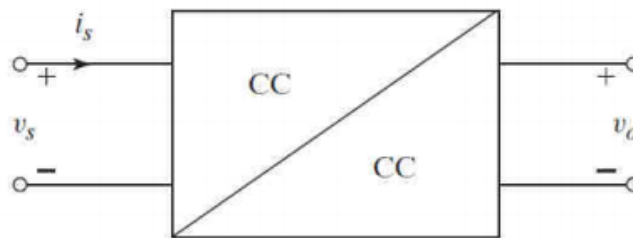


Figura 14: Conversor CC-CC.

Este tipo de conversores convertem corrente contínua para corrente contínua e são usualmente utilizados para:

- Converter uma tensão de entrada contínua para uma tensão contínua de saída;
- Regular a tensão de saída pretendida;
- Adaptar a fonte à carga;

Os conversores CC-CC podem ter como aplicação a interface entre os sistemas solares fotovoltaicos, sendo responsáveis por extrair a máxima potência destes. Os principais tipos de conversores CC-CC existentes são:

- Conversor redutor;
- Conversor elevador;
- Conversor redutor-elevador.

Um conversor electrónico de potência é constituído por dispositivos semicondutores de potência, funcionando em comutação (à condução ou ao corte). A comutação é feita a alta frequência, segundo uma variável de comando proveniente de um circuito electrónico de controlo.

A comutação a alta frequência significa que estes conversores funcionam a uma frequência muito superior à frequência das variáveis quer de entrada, quer de saída. Note-se que, serão analisadas as topologias tendo em conta que os componentes são ideais, não apresentando perdas, e que funcionam em regime permanente não-lacunar.

Tendo em conta o tema em estudo nesta dissertação, neste sub-capítulo apenas serão analisadas as topologias para o conversor elevador (*Boost*) e para o conversor redutor-elevador (*Buck-Boost*).

Apenas serão analisadas estas topologias uma vez que, tendo em consideração a aplicação de um sistema fotovoltaico, para que se interligue este sistema à rede de energia eléctrica é necessário aumentar o valor de tensão, para que posteriormente possa ser convertido a tensão alternada, através de um conversor CC-CA para que a energia gerada possa ser injetada na rede.

2.7.1 Conversor elevador (*Boost*)

Um conversor elevador (*Boost*) é um conversor CC-CC que aumenta o valor da tensão (enquanto diminui a corrente) da sua saída (carga) relativamente à sua entrada (alimentação) [18]. Será o conversor utilizado na implementação do modelo em estudo nesta dissertação.

É uma fonte de alimentação comutada contendo, no mínimo, dois semicondutores (um díodo e um transistor) e pelo menos dois elementos de armazenamento de energia, um condensador e uma bobina.

Para reduzir o *ripple* de tensão, utilizam-se filtros feitos de condensadores, que são normalmente colocados perto da saída do conversor (filtro do lado da carga) e à entrada (filtro do lado da alimentação).

Na figura (15), mostra-se o esquema eléctrico típico de um conversor elevador.

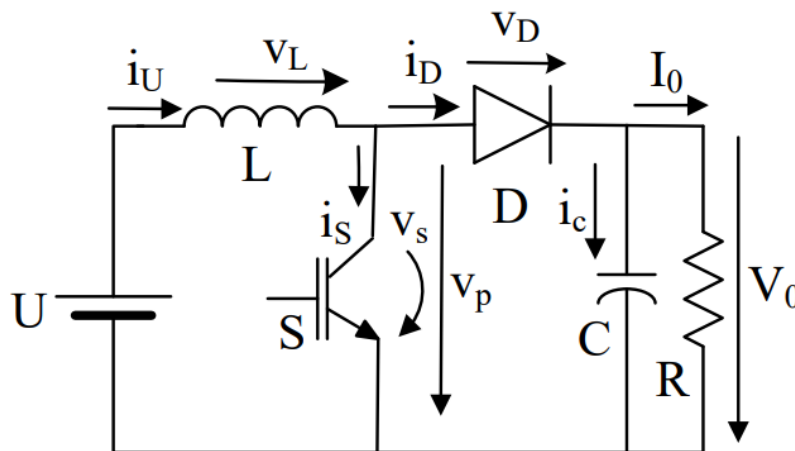


Figura 15: Conversor Elevador (*Boost*) [19].

Conectado à *gate* do IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), que neste caso funcionará como interruptor (S) estará um gerador de impulsos (oscilador de onda quadrada), que irá fazer com que S esteja ON ou OFF, dependendo se o gerador está ou não a gerar impulso num dado momento.

Quando S está à condução (ON), a tensão na bobine V_L é praticamente a tensão U de alimentação, e a corrente flui a partir da fonte de energia, armazenando energia na bobine L.

No momento em que se desliga o interruptor, a continuidade da energia magnética na bobine força o diodo a entrar em modo de condução, o que implica que a energia, armazenada anteriormente na bobina, chegue ao condensador e à resistência (dada por "R" no esquema da figura (15)). Esta fase termina quando o interruptor é novamente colocado à condução, repetindo-se, ciclicamente, o processo descrito.

Quando a corrente na bobina é superior à corrente do condensador, a corrente flui para o condensador e para a carga. Quando isto não se verifica, a corrente flui da bobina e do condensador para a carga.

Normalmente este circuito opera em modo de condução contínua, para que a corrente na bobina tenha a menor variação (tremor) possível, importante no caso do painel fotovoltaico no MPP. O tremor da corrente depende da indutância da bobina (quanto maior a indutância menor é o tremor), da frequência e do fator de ciclo (D) do sinal gerado pelo gerador de impulsos.

Na figura (16) apresentam-se as formas de onda características deste conversor, nomeadamente da tensão na bobina (definida pela tensão de entrada U e pela tensão de saída V_o), e a forma de onda da corrente na bobine.

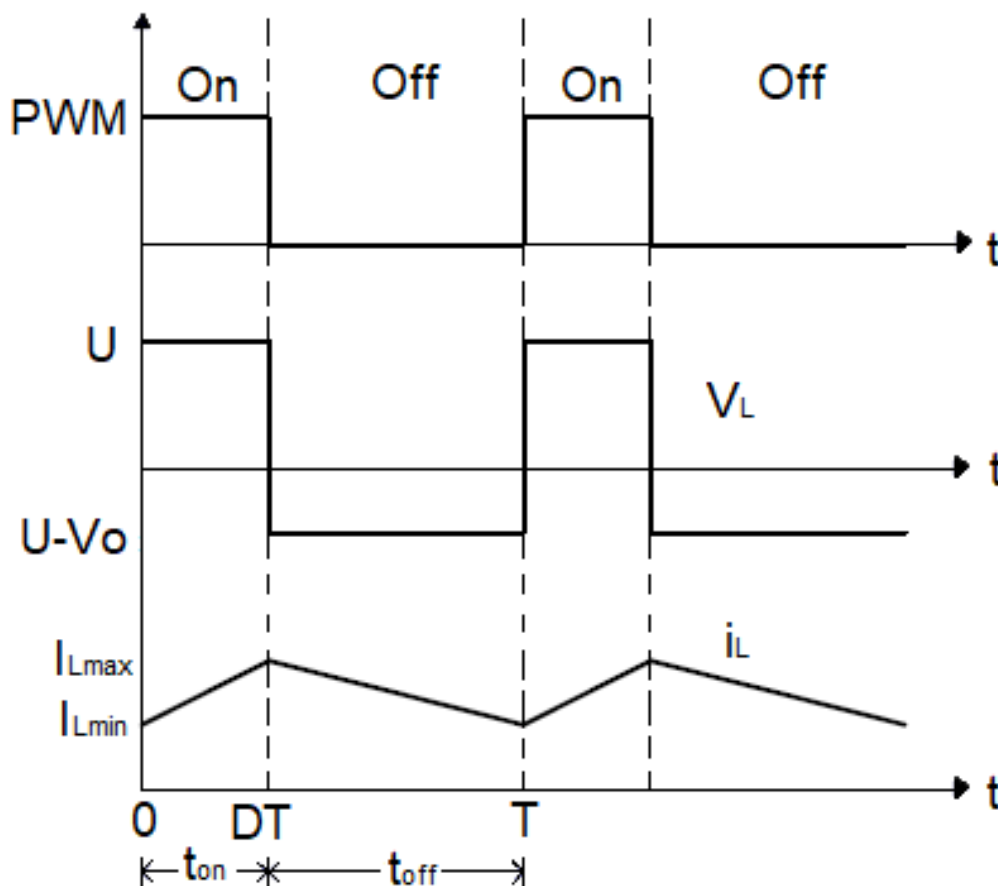


Figura 16: Formas de onda do conversor elevador no modo contínuo. Adaptado de [20].

Analisando as formas de onda que se encontram na figura 15, conclui-se que a tensão na bobina será dada por:

$$V_L(t) = \begin{cases} +U, & 0 < t < DT. \\ +U - V_o, & DT < t < T. \end{cases} \quad (13)$$

Onde D representa o fator de ciclo (fração de tempo que o *IGBT* se encontra à condução) Sabendo que em regime permanente não lacunar o valor médio da tensão na bobina L é nulo ($V_{Lmed} = 0$), pode-se calcular o valor médio da tensão na carga V_o de acordo com a seguinte equação:

$$V_{Lmed} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} V_L(t) dt + \int_{DT}^T V_L(t) dt \right] = \frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} U dt + \int_{DT}^T (U - V_o) dt \right] = 0 \quad (14)$$

A partir da equação (12), a relação entre a tensão de saída, V_o , e de entrada, U , para este tipo de conversor, será então dada pela seguinte expressão (note-se que $0 \leq D \leq 1$):

$$\frac{V_o}{U} = \frac{1}{1 - D} \quad (15)$$

Assim, verifica-se que, no elevador ideal, quanto maior o fator de ciclo, maior vai ser a tensão à saída, quando a tensão de entrada é constante.

2.7.2 Conversor redutor-elevador (*Buck-Boost*)

O conversor representado na figura (17) é constituído por um semiconductor comandado S , uma bobina L , um díodo D , um condensador C e uma carga, dada por R . Tem a característica de obter na saída uma tensão V_o com polaridade invertida em relação à tensão de entrada U e, de acordo com o valor do factor de ciclo (D), o valor da tensão de saída pode ser maior ou menor que o valor de tensão de entrada [21].

Estas características fazem com que este conversor tenha a designação de conversor redutor-elevador (*Buck-Boost*). Na figura (17) o esquema do conversor em questão está representado.

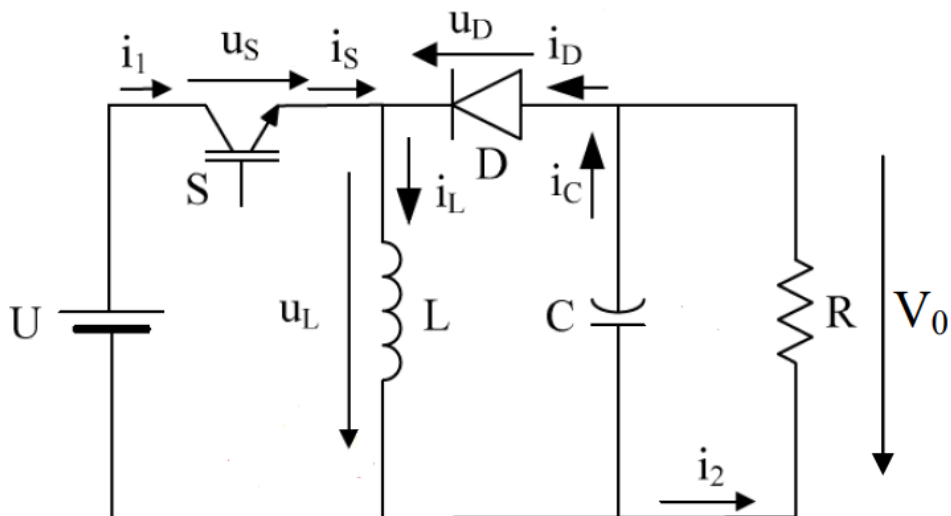


Figura 17: Conversor Redutor-Elevador (*Buck-Boost*) [19].

De seguida, na figura (18), encontram-se representadas as formas de onda da corrente e da tensão na bobina, características deste conversor, a operar no modo de condução contínua.

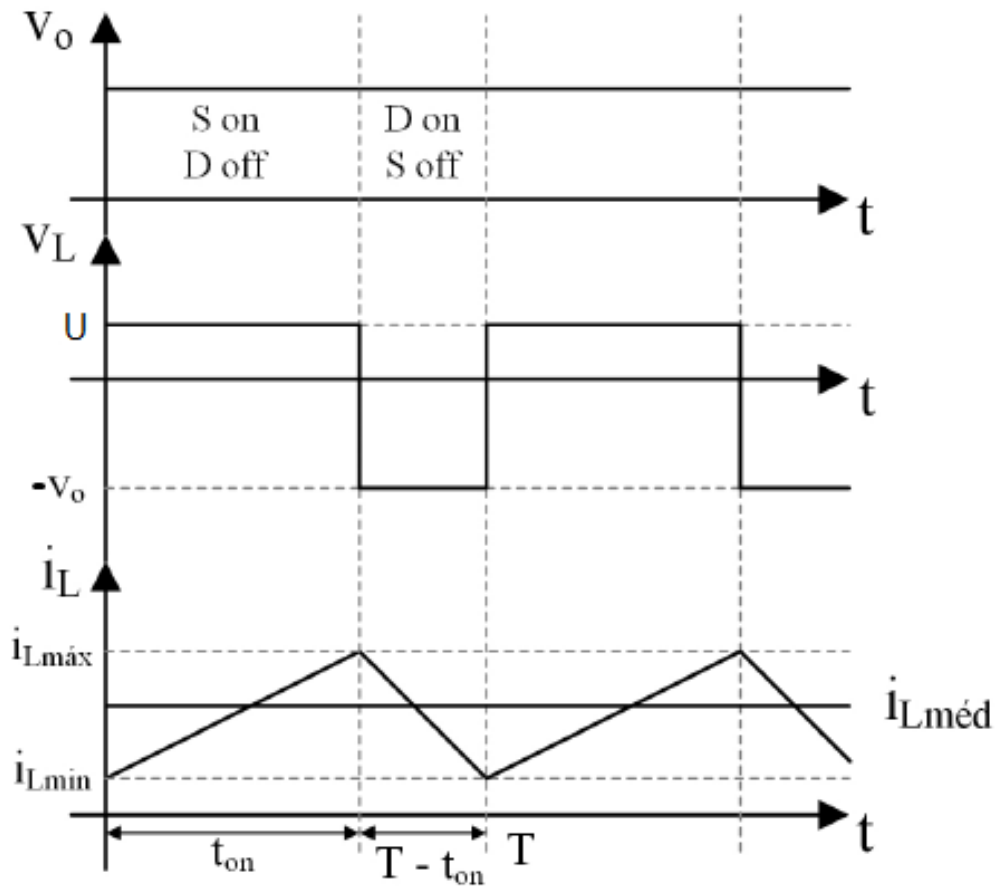


Figura 18: Formas de onda do conversor redutor-elevador no modo contínuo. Adaptado de [22].

Tendo em consideração que o modo de funcionamento do conversor é o regime permanente e não lacunar, a tensão aos terminais da bobina L será dado por:

$$V_L(t) = \begin{cases} +U, & 0 < t < DT. \\ -V_o, & DT < t < T. \end{cases} \quad (16)$$

Sabendo que o valor médio da tensão na bobina tem valor nulo ($V_{Lmed} = 0$) em regime permanente não lacunar, obtém-se a seguinte relação, que posteriormente irá permitir aferir a expressão que torna possível relacionar U com V_o :

$$V_{Lmed} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} U dt + \int_{DT}^T -V_o dt \right] = 0 \quad (17)$$

Tal como referido no parágrafo anterior, é possível, a partir da equação anterior, obter a seguinte:

$$\frac{V_o}{U} = \frac{D}{1-D} \quad (18)$$

A partir desta equação é possível então entender-se o funcionamento deste conversor, nomeadamente no que toca à sua característica de elevador ou redutor. Caso o fator de ciclo (D) seja inferior a 0,5 comporta-se como conversor redutor (tensão de saída menor que a tensão de entrada).

Caso D seja superior a 0,5 comporta-se como um conversor elevador (*Boost*). É ainda de referir que caso o valor do fator de ciclo seja 0,5 o conversor não é redutor nem elevador e deste modo o valor da tensão de saída será igual ao valor da tensão de entrada.

2.8 Conversores CC-CA

Um inversor de potência, também conhecido como conversor CC-CA (representado na figura (19)), é um dispositivo ou circuito eletrónico de potência que transforma uma tensão/corrente contínua em alternada [23].

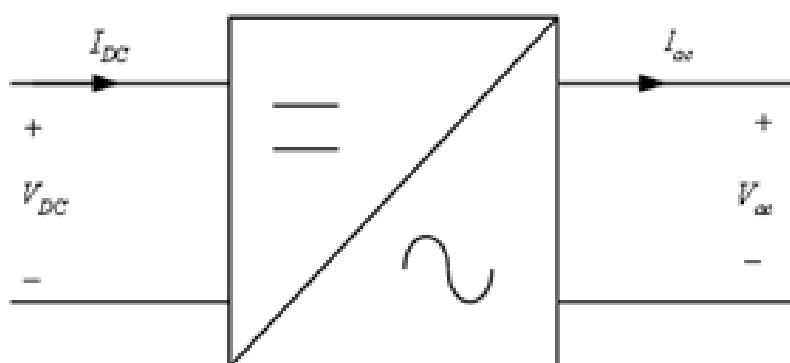


Figura 19: Conversor CC-CA (Inversor).

Tendo em conta o tema desta dissertação, é de referir que a principal aplicação que os inversores têm para sistemas fotovoltaicos é a conversão de corrente e tensão contínua fornecida pelo gerador fotovoltaico/termoelétrico em corrente/tensão alternada, de acordo com os requisitos técnicos e de segurança devidamente dimensionados para efetuar a ligação à rede [24].

Dependendo da aplicação pretendida, o inversor a ser utilizado pode ser trifásico (para aplicações de maior potência) ou monofásico (para aplicações de potência mais baixa). Na figura (20), encontram-se representados os esquema de um inversor monofásico de onda completa.

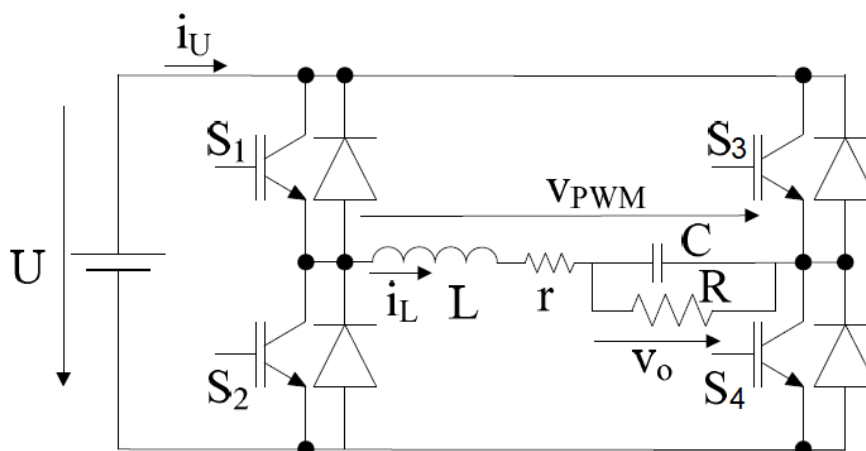


Figura 20: Inversor monofásico de onda completa [19].

Tendo em conta que esta dissertação irá tratar um sistema fotovoltaico com (345 + 120) W de valor de potência de saída, o tipo de inversor utilizado será o monofásico. Analisando a representação presente na figura (20), existem diferentes tipos de funcionamento em termos de modulação para inversores. Neste caso, importa analisar as formas de onda e as equações que caracterizam o inversor que utiliza modulação sinusoidal a 3 níveis.

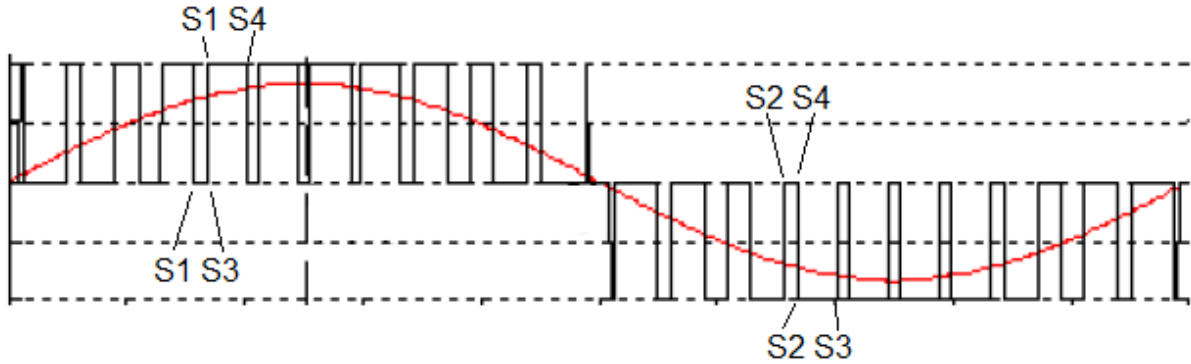


Figura 21: Formas de onda do inversor monofásico de onda completa, utilizando modulação sinusoidal a 3 níveis. Adaptado de [19].

A partir da figura (21), é possível obter os valores da modulante em p.u. de acordo com os semicondutores que estão ON e dependendo da alternância (negativa ou positiva), tendo então:

$$V_{PWM} = \gamma U \rightarrow \gamma = \begin{cases} +1, & \text{S1 ON, S4 ON e Ciclo Positivo.} \\ 0, & \text{S1 ON, S3 ON e Ciclo Positivo.} \\ 0, & \text{S2 ON, S4 ON e Ciclo Negativo.} \\ -1, & \text{S2 ON, S3 ON e Ciclo Negativo.} \end{cases} \quad (19)$$

Esta pode também ser representada sob a forma de tabela, de modo a que seja mais perceptível as combinações de semicondutores ON que levam a diferentes estados da modulante.

Vetor (γ)	S1	S2	S3	S4
1	1	0	0	1
0	1	0	1	0
-1	0	1	1	0
0	0	1	0	1

Tabela 1: Tabela representativa dos diferentes valores da onda modulante de acordo com os dispositivos à condução [19].

A tensão AC V_{PWM} a 3 níveis pode ser dada por [19]:

$$V_{PWM}(t) = \frac{UV}{u_{cmax}} \sin(\omega_F t) + \sum_{n>p-2}^{\infty} V_{Pn} \sin(n\omega_F t + \theta_n) \quad (20)$$

As harmônicas de alta frequência são atenuadas pelo filtro L, C. O valor eficaz da componente fundamental é:

$$V_{1RMS} = \frac{UV}{\sqrt{2}u_{cmax}} \quad (21)$$

Sabe-se que $\frac{V}{u_{cmax}}$ representa o índice de modulação, também conhecido como m , estando compreendido no intervalo entre 0 e 1, e sendo ω_F a frequência angular fundamental, dada por $2\pi 50$, uma vez que $f = 50\text{Hz}$ é a frequência da rede.

Por fim, tendo em conta o dimensionamento de eventuais filtros e de transformadores a serem utilizados à saída do inversor de modo a elevar o nível de tensão, importa saber qual a corrente contínua de entrada do inversor. Esta pode ser dada através da expressão que se segue **[19]**:

$$I_{Umax} = \frac{V_{1RMS}I_{1RMS}\cos(\phi_1)}{\eta U} \quad (22)$$

3 Topologia de Painéis Fotovoltaicos e Geradores Termoelétricos

Neste capítulo irá ser analisada a topologia do sistema, o porquê da escolha e que outras possibilidades poderiam ter sido escolhidas para um sistema híbrido contendo conversão fotovoltaica e termoelétrica.

3.1 Solução escolhida (Lente de Fresnel)

A escolha do tipo de tecnologia a implementar baseou-se em trabalho de pesquisa acerca de como poder aumentar a temperatura do lado quente dos módulos termoeétricos.

Esta necessidade surge, uma vez que o rendimento dos módulos tende a ser mais elevado em diferenças de temperatura mais elevadas (mantendo a temperatura do lado frio, a do lado quente, quanto mais alta for, maior o rendimento), permitindo gerar a mesma quantidade de potência elétrica com menor número de módulos.

Posto isto, é então necessário reduzir a área e concentrar a energia térmica nessa mesma área. Deste modo, a energia térmica presente em toda a área do painel, pode ser aproveitada numa área mais reduzida, onde sejam colocados os módulos termoeétricos.

Note-se que a solução apresentada neste subcapítulo, ao contrário da solução que se verá em em 3.2.3, não permite efetuar o arrefecimento do painel ao mesmo tempo que se efetua o aquecimento dos módulos termoeétricos. Não permite, portanto, aumentar diretamente o rendimento do painel fotovoltaico, sendo a principal desvantagem deste método.

Tal como já referido anteriormente, as lentes de Fresnel permitem concentrar a radiação numa área mais reduzida. A solução consiste em se assumir algo que, nos dias de hoje é ainda pouco comum, que é a utilização de uma lente de Fresnel que aproveite a radiação térmica que atravessa o painel fotovoltaico, permitindo concentrar essa radiação na área abrangida pelos módulos termoeétricos.

Sabe-se que é possível fazer isto uma vez que o painel fotovoltaico irradia energia na sua parte posterior sob a forma de radiação infravermelha. Para este efeito, a lente de Fresnel em questão tem de ser transparente à radiação infravermelha de grande comprimento de onda.

A representação desta tecnologia encontra-se na figura (22), sendo a legenda a seguinte: 1 - Lente de Fresnel; 2 - Sistema de seguimento do sol; 3 - Módulo termoeétrico; 4 - Sistema de extração de calor; 5 - Painel fotovoltaico; 6 - Radiação solar.

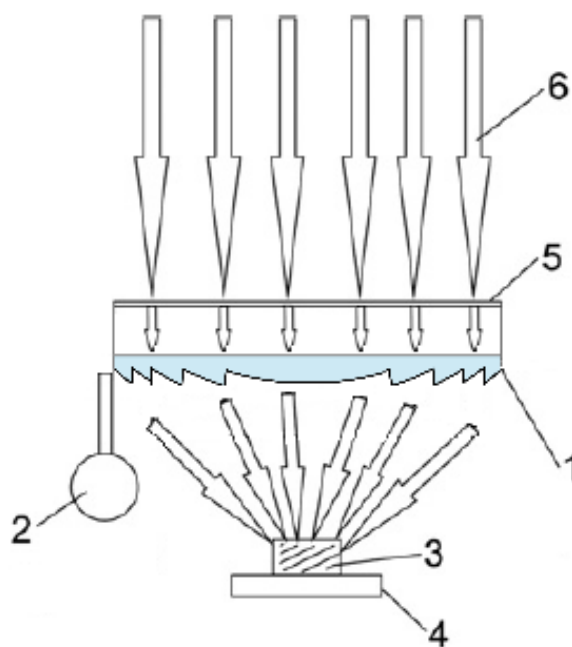


Figura 22: Representação teórica do modelo a implementar no sistema (PV-TEG com lente de Fresnel). Adaptado de [25].

Note-se que um painel fotovoltaico para o sistema híbrido deve ser elaborado de forma especial, proporcionando elevada condutividade térmica do substrato e com superfície muito polida, o que é normal para painéis tradicionais: em vez da rugosidade, deve ser usado revestimento anti-reflexo para minimizar a reflexão [25].

O grau de concentração da radiação solar desejado pode ser facilmente obtido, através de lentes (Lentes Fresnel, em particular), não sendo estas dispendiosas. O sistema de rastreamento do Sol representado na figura (22) também é simples e barato (embora não sendo estritamente necessária a sua utilização neste sistema). Assim, vemos que o TEG com radiação solar concentrada poderá ter eficiência de conversão comparável à dos painéis fotovoltaicos no mercado [25].

O custo dos módulos termoelétricos é ligeiramente superior ao dos painéis fotovoltaicos de igual área de superfície, mas tendo em consideração a redução essencial da área do TEG nos sistemas que utilizam a concentração de radiação, chega-se à conclusão de que o custo real da energia gerada poderia ser aceitável nos sistemas utilizando este princípio [25].

Sabendo que os módulos termoelétricos escolhidos apresentam um rendimento de 14%, é necessário determinar o diâmetro da lente de Fresnel a utilizar de modo a que se possa obter os 123,6W de potência elétrica, sabendo que este valor corresponde a 14% da potência incidente.

Fica-se então com uma potência incidente de 882,85W. A área da lente de Fresnel, para esta situação terá de ser calculada tendo em conta uma irradiância de 1000 W/m^2 , e sabendo que 8% dessa irradiância é perdida por reflexão na lente de Fresnel, ficando-se com 920 W/m^2 . Assim, a área será de $0,9596 \text{ m}^2$.

De modo a determinar o raio da lente a utilizar, tem-se

$$\pi r^2 = A \rightarrow r = 0,55 \text{ m} \quad (23)$$

Deste modo, o diâmetro da lente de Fresnel a utilizar terá de ser 1,10 m. Embora seja uma lente de dimensões bastante grandes, terá a vantagem de aproveitar o espaço já disponível para produzir mais energia. Portanto, o rendimento aumenta, uma vez que para uma mesma área é possível obter mais energia ao implementar este sistema (aumento da densidade energética).

Sendo o material dos módulos termoelétricos composto por telureto de bismuto, e tendo este uma capacidade térmica mássica de $0,123 \text{ J/g.K}^{-1}$, sabendo a potência e a massa, é possível, a partir da energia, obter a variação de temperatura e o intervalo de tempo em que essa ocorreu. Assumindo 15 módulos termoelétricos, a massa total dos módulos será de 0,375 kg.

Em termos teóricos, sendo que a potência também pode ser expressa em Joule por segundo (J/s), 123,6 W é o mesmo que 123,6 J/s. Assim, em um segundo, a variação de temperatura do telureto de bismuto será

$$E = m.c.\Delta T \rightarrow \Delta T = 2,68 \text{ K} = 2,68 \text{ }^\circ\text{C} \quad (24)$$

Sabendo que E energia, m massa, c capacidade térmica mássica e ΔT a variação de temperatura então, em 1 segundo, com uma irradiância de 1000 W/m^2 , o lado exposto à radiação aumenta a sua temperatura em $2,68 \text{ }^\circ\text{C}$.

Assim, assumindo uma temperatura inicial de 30 °C, chegará aos 200 °C (temperatura pretendida para o correto funcionamento dos TEG) em cerca de 63 segundos, o que significa que o processo, desde que se expõem os módulos termoelétricos à radiação proveniente da Lente de Fresnel levará 1 minuto e 3 segundos aproximadamente a alcançar a temperatura desejada.

Recorde-se que todos estes cálculos são efetuados assumindo que não existe dissipação de energia e que toda a energia serve para aquecer o lado quente dos módulos, o que não acontece em condições reais.

Na realidade, o valor da temperatura de equilíbrio é de 200 °C, pois parte da energia incidente no módulo flui através deste e é dissipada no dissipador de calor, fazendo com que a temperatura no lado quente deste se mantenha constante neste valor.

Deste modo, foi utilizado o concentrador de calor pois este permite concentrar a energia térmica numa área mais pequena. Caso não fosse utilizado um concentrador de calor, ter-se-iam que utilizar 66 módulos termoelétricos.

Para a temperatura de 200°C, são apenas necessários 15 módulos, pelo que a solução em que se inclui o concentrador é mais económica do que simplesmente utilizar módulos termoelétricos que cobrissem toda a parte posterior do painel solar.

Note-se, no entanto, que apesar de esta ser uma solução viável do ponto de vista teórico, é necessário validar e efetuar testes na prática de modo a poder comprovar-se a sua valia para o desenvolvimento dos modelos híbridos PV-TEG.

3.2 Outras possíveis soluções

Existem, no entanto, outras soluções que poderão vir a ser estudadas e desenvolvidas no futuro, que se mostram como potenciais soluções para o problema em questão. Apresentam-se três soluções alternativas nesta dissertação, de modo a que se entenda que não só a solução com a "Lente de Fresnel" é boa, mas como também estas três poderão representar uma boa alternativa a esta.

Para além destas existem ainda outras que já são mais desenvolvidas, tais como as utilizadas no aquecimento de água e armazenamento de energia desse modo.

3.2.1 Heat Pipes

Esta solução consiste na instalação de *Heat Pipes* em que o calor é conduzido através de um material com muito boa condutividade térmica, que irá aquecer uma placa onde irão assentar os módulos termoelétricos.

O lado em contacto com esta placa será o "lado quente", enquanto que o lado oposto será o "lado frio" dos módulos e estará em contacto com um dissipador de calor, de modo a que esta parte se mantenha à temperatura ambiente.

Este tipo de sistema híbrido tem a designação de PV-TEG-MCHP, que significa "Painel Fotovoltaico - Gerador Termoelétrico - *Micro Channel Heat Pipe*", sendo por isso diferente dos restantes modelos apresentados, tendo mais um sistema associado. A representação deste modelo encontra-se na figura (23).

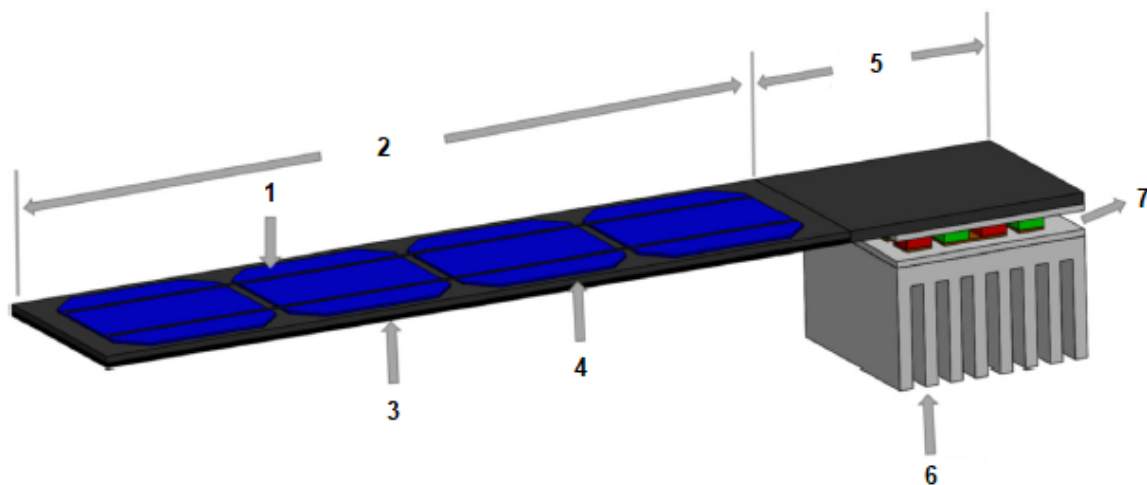


Figura 23: Representação teórica do modelo PV-TEG-MCHP. Adaptado de [26].

Neste sistema, a legenda é a seguinte: 1 - Célula Fotovoltaica; 2 - Evaporador MCHP ; 3 - Camada isoladora; 4 - Placa plana de MCHP; 5 - Condensador MCHP; 6 - Dissipador de Calor; 7 - TEG.

O silício cristalino é o elemento usado neste sistema e está ligado à superfície superior do MCHP. As células solares são incorporadas nas camadas de etileno-acetato de vinil, enquanto a camada de vidro é a camada superior que evita a acumulação de poeira, havendo por fim uma camada transparente de tedar-poliéster-tedar (TPT), sendo esta a camada mais baixa [26].

A superfície superior do MCHP não coberta pelo PV é a camada de absorção térmica, enquanto a superfície inferior do MCHP é coberta com materiais isolantes. O MCHP é um tubo de calor de placa de alumínio plana que tem vários tubos paralelos entre si. Além disso, a espessura do MCHP é de 3 mm e cada MCHP tem vários pequenos sulcos internos que visam aumentar a transferência de calor por evaporação repetida e condensação do fluido de trabalho interno [26].

O rendimento elétrico deste sistema híbrido é dado pela seguinte expressão em que G representa a irradiância em W/m^2 e A representa a área do painel em m^2 .

$$\eta = \frac{P_{PV} + P_{TEG}}{G.A} \quad (25)$$

Este sistema híbrido tem uma eficiência elétrica que representa um aumento médio de 0,7% em relação aos valores medidos para um painel fotovoltaico testado de forma isolada [26].

Isto acontece pois as temperaturas que são possíveis obter na superfície que entra em contacto com a placa designada por "Condensador MCHP" são baixas tendo em conta as temperaturas ideais de funcionamento de um módulo termoelétrico.

Deste modo, os módulos termoelétricos apresentam baixos rendimentos, não aumentando tanto quanto expectável o rendimento global do sistema. Este baixo rendimento poderá também estar relacionado com o aumento da resistência térmica entre os componentes, uma vez que, ao contrário dos outros sistemas apresentados, este tem um terceiro componente, o MCHP.

Contudo, o sistema PV-TEG-MCHP poderá ser uma alternativa mais económica em relação a um sistema PV-TEG comum, sendo por isso referido nesta dissertação, uma vez que tem uma relação entre custo e desempenho elevada.

3.2.2 Sistemas Termo-Fotovoltaicos

Os Sistemas Termo-Fotovoltaicos Solares extraem energia elétrica da radiação térmica. O objetivo é absorver e converter o espectro de radiação solar de banda larga em um espectro de emissão térmica de banda estreita sintonizado para a resposta espectral de uma célula fotovoltaica.

Estes sistemas são de elevado interesse, pois têm o potencial de superar o conhecido limite de *Shockley-Queisser* para a junção PV única, caso se consiga o controlo espectral adequado. Apresentam uma gama ampla de capacidades de armazenar energia, não possuem partes móveis e permitem o armazenamento de energia solar e o uso de combustíveis alternativos para que se possa gerar energia de forma contínua.

Esta forma de conversão de energia utiliza radiação térmica de uma fonte de calor local para gerar eletricidade numa célula fotovoltaica. A adição de um espelho altamente refletivo na parte traseira de uma célula solar maximiza a captação de luminosidade.

Por sua vez, esse fator faz aumentar a tensão, permitindo uma elevada eficiência. Este fenómeno ocorre pois este espelho reflete raios infravermelhos de baixa energia e os fótons voltam a ser enviados para a fonte de calor, recuperando a sua energia [27].

Apresentam-se, na figura (24), as duas configurações possíveis para um sistema termo-fotovoltaico.

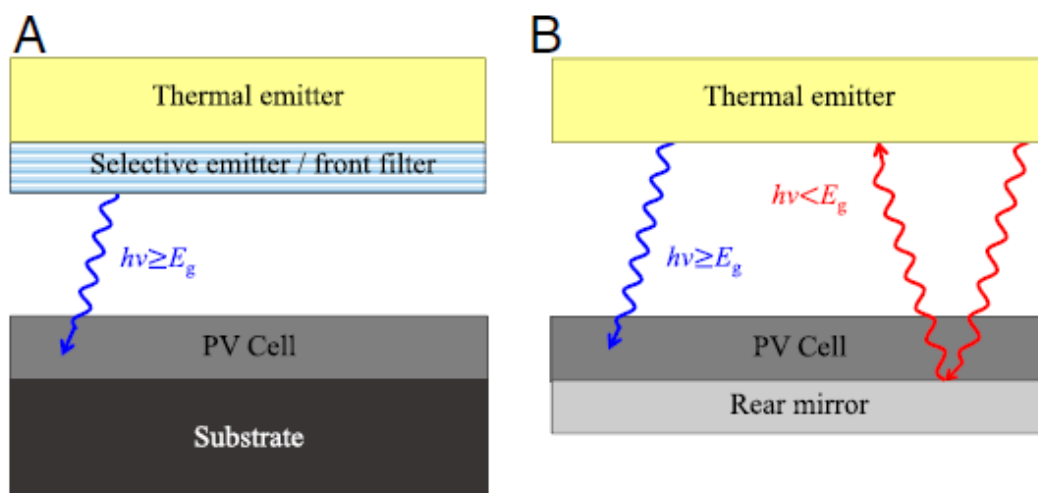


Figura 24: Representação das duas abordagens existentes a um sistema TPV [27].

No caso de (A), é utilizado um revestimento seletivo no que toca ao espectro de radiação, que irá idealmente emitir fótons de elevada energia. No caso de (B), o semiconductor utiliza a largura de banda como filtro espectral.

A presença de um espelho na parte posterior garante que quaisquer fótons não absorvidos sejam refletidos de volta para o emissor, sendo deste modo utilizados no processo de conversão energética [27].

A potência incidente num emissor térmico pode ser definida como o fluxo de radiação de corpo negro, corrigida pela emissividade espectral do emissor, integrando-a em ordem à energia e à área. Deste modo, obtém-se a seguinte expressão, que permite definir a potência incidente [27],

$$P_{incidente}(T_s) = \int_0^{\infty} \epsilon(E) b_s(E, T_s) \cdot E dEA \quad (26)$$

Em que E representa a energia do fóton e A representa a área da célula fotovoltaica, sendo T_s a temperatura a que se encontra o emissor.

No entanto, apesar de este processo se apresentar como de elevada eficiência, não é aplicável a painéis fotovoltaicos regulares, ou seja, que utilizam a radiação solar para produzir energia, por enquanto, pelo que não é usável no âmbito desta dissertação, tendo sido referido devido ao facto de ter elevadas eficiências e existir a possibilidade de um dia vir a ser possível implementar num contexto real.

É, ainda assim, uma tecnologia numa fase bastante inicial em termos de desenvolvimento da mesma, pelo que poderá vir a ser ainda bastante melhorada e desenvolvida no futuro.

3.2.3 Filtro de Radiação Infravermelha

Sabe-se que quando um dispositivo fotovoltaico é exposto à luz solar, nem toda a radiação solar é absorvida pela substância óptica ativa. Por outro lado, a energia que é absorvida pela substância não-óptica ativa é convertida em calor [28].

Assim, de modo a ultrapassar esta questão, encontra-se uma solução que consiste num filtro de radiação infravermelha colocado antes do painel. Ou seja, ao painel fotovoltaico apenas chega radiação na gama do visível e na gama do ultravioleta (refratadas) sendo que a radiação infravermelha é refletida.

Sabe-se que o aumento de temperatura do painel é responsável pela diminuição do seu rendimento e a radiação que causa esse aumento de temperatura é a infravermelha (em grande parte). As radiações que atravessam o filtro são as que permitem a ocorrência do efeito fotovoltaico, não sendo então afetadas as características do painel com a implementação do filtro [28].

Ao ter este filtro, permitirá desde logo, e apenas analisando o painel, ter um aumento no seu rendimento devido à redução da temperatura deste. Para além disto, será possível aquecer a face com maior temperatura dos módulos termoelétricos ao fazer incidir nesta a radiação infravermelha refletida.

Estes dispositivos híbridos têm um componente refletivo, como divisor de espectro, onde o módulo fotovoltaico e o módulo termoelétrico são colocados perpendicularmente. Quando a luz solar incide o filtro no topo, parte da radiação solar é refletida pelo divisor num determinado comprimento de onda, denominado comprimento de onda de corte.

A radiação que tem um comprimento de onda mais longo do que o comprimento de onda de corte é refletida no TEG (infravermelho) enquanto que os comprimentos de onda mais curtos do que o comprimento de onda de corte refratam-se através do filtro e são absorvidos pelo módulo fotovoltaico como mostrado na figura (25).

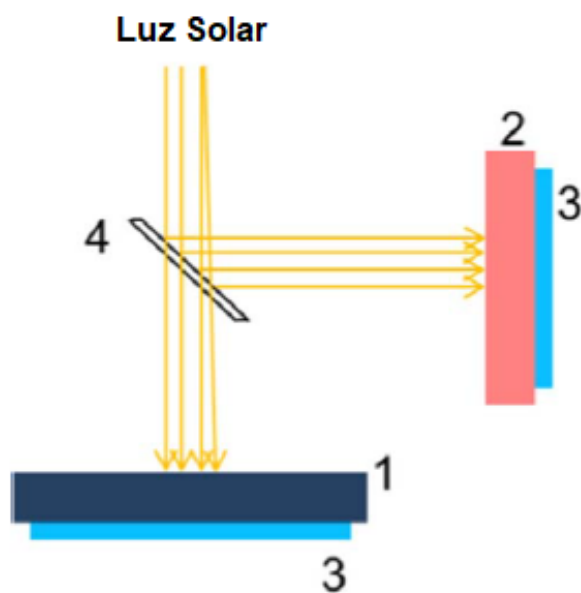


Figura 25: Representação teórica do sistema Filtro IV (1 - Módulo Fotovoltaico; 2 - Módulo Termoeletrico; 3 - Dissipador de calor; 4 - Filtro IV) [28].

É necessário ainda implementar um dissipador de calor de modo a permitir que o lado frio dos módulos termoeletricos mantenha uma temperatura baixa, para que a diferença de temperatura seja mantida no valor desejado.

Note-se que, para este sistema funcionar, terá de estar implementado no painel um sistema de seguimento do sol, de modo a que o filtro esteja sempre na posição correta relativamente aos raios solares.

Tendo em conta a área do painel, e observando a figura (25), é notório que será necessário concentrar os raios infravermelhos em uma área mais restrita. Deste modo, a utilidade de uma lente de Fresnel, que permita concentrar os raios em uma área mais pequena, será fundamental, sendo necessário, para implementação deste sistema, efetuar os mesmos cálculos que em 3.1, sabendo que a lente de Fresnel a ser utilizada será colocada entre o filtro de raios IV e a superfície dos módulos termoeletricos [29].

4 Modelação e controlo da associação de painéis fotovoltaicos e geradores termoelétricos

Neste capítulo irá ser analisada a modelação do sistema em estudo, desde a conversão fotovoltaica até à conversão termoelétrica, passando pelo conversor elevador e pelo inversor, sendo cada um deles analisado e todos os cálculos efetuados.

4.1 Painel Fotovoltaico e Conversor Elevador

Os primeiros elementos, e principais a serem tidos em conta têm de ser os valores fornecidos pelo fabricante, para a potência máxima disponível para o painel escolhido (HTM325 345PA-72). Este painel foi o selecionado entre muitos outros painéis, devido à sua elevada eficiência (17,77% a 345Wp) e boa relação custo/qualidade.

Foi utilizado o modelo de painel fotovoltaico disponível no programa de simulação numérica utilizado, para se efetuar a simulação correspondente aos valores de saída do painel. Ao colocar um valor de irradiância e temperatura à entrada, o bloco, através dos valores característicos do painel, simula a criação de uma tensão, corrente e potência à saída.

Note-se que foi necessário introduzir todos os dados neste bloco, tendo desta forma uma simulação correspondente ao painel escolhido. Os valores a colocar no bloco de modo a simular o painel escolhido, estão presentes no seu *Datasheet* (Anexo B) e estão também representados na seguinte tabela,

P_{MP} [W]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	V_{CA} [V]	I_{CC} [A]	μ_{VCA} [mV/°C]	μ_{ICC} [mA/°C]
345	38,30	9,01	47,00	9,47	-0,29	0,05

Tabela 2: Parâmetros elétricos do módulo PV.

Utilizando os dados presentes na tabela anterior e as equações presentes no subcapítulo 2.3.1, é possível chegar, através de alguma manipulação destas mesmas equações, aos valores que de seguida se apresentam, sendo estes os valores calculados no bloco que simula o comportamento do painel fotovoltaico.

m	R_P [Ω]	R_S [Ω]	I_0 [pA]	I_S [A]
1,48	992,61	0,10	357,52	9,47

Tabela 3: Valores calculados dos parâmetros do modelo matemático do módulo PV.

Note-se que, para além de todo o dimensionamento já efetuado, para se efetuar a produção de energia através de um sistema fotovoltaico, além da produção em si, é também necessário garantir que os valores de tensão e corrente à saída correspondem a um nível aceitável, para que depois possa passar pelo inversor e ser injetada na rede.

Deste modo, é colocado um conversor elevador a jusante do painel fotovoltaico, para que o nível de tensão seja elevado, ao mesmo tempo que o de corrente é diminuído, mantendo a potência.

Como se sabe, um conversor elevador tem a capacidade de elevar a tensão em até cerca de 4 ou 5 vezes o valor da tensão de entrada [19]. Como se pretende à saída um valor de tensão de 400V, uma vez que o painel só consegue produzir cerca 40V, terão de ser utilizados 2 painéis em série, de modo que o seu valor seja perto de 80V. Assim, já se torna possível chegar ao valor de tensão desejado à saída.

Mostra-se, na figura (26), a maneira como foi implementado o sistema no programa de simulação numérica utilizado, de modo a que se possa analisar com mais detalhe o que o sistema inclui. Para simular a situação com 2 painéis em série, foi necessário colocar esta informação no bloco correspondente.

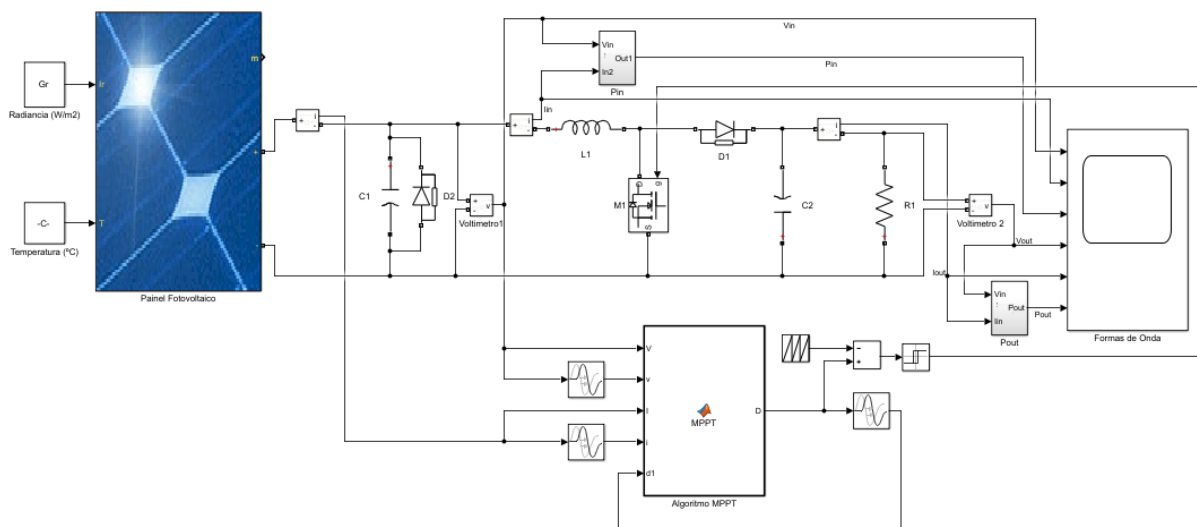


Figura 26: Painel fotovoltaico e conversor elevador com algoritmo MPPT.

Em termos de análise ao sistema, note-se que, inicialmente, começou-se por atribuir à entrada do painel valores de irradiância e temperatura em condições STC, de modo a que se pudesse efetuar uma comparação entre os resultados obtidos e os valores presentes no *datasheet* para essa situação.

Tendo chegado aos valores presentes no *datasheet* (tendo em conta 2 painéis), valida-se o modelo, permitindo isto fazer com que diversas outras situações sejam testadas, situações essas que serão abordadas mais adiante.

Note-se que é necessário colocar um diódo em anti-paralelo ao condensador (*bypass*) para prevenir a eventualidade de numa ligação em série entre 2 ou mais painéis em que um deles esteja sombreado, de modo a que a corrente produzida pelos outros atravessasse o diódo, continuando a atravessar o circuito, sem danificá-los ou impedindo que o painel sombreado limite a corrente do sistema.

É de referir que, o modo de implementação, em simulação, do sistema, foi colocar em paralelo ao painel e ao conversor elevador um algoritmo MPPT que permita efetuar a constante análise e aproximação ao valor de potência máxima que o painel pode produzir perante certas e determinadas condições de irradiância e/ou temperatura.

Em relação ao conversor elevador, foi assumido que se pretendia um aumento que permitisse colocar a tensão no nível desejado (400V) e uma diminuição proporcional da corrente de saída do conversor. Deste modo, foram necessários cálculos de modo a que se pudessem dimensionar os filtros a implementar no conversor.

Mostra-se de seguida a forma como os cálculos foram efetuados e os resultados obtidos para os valores dos filtros a utilizar.

Para os filtros de entrada, dados na figura anterior por L_1 e C_1 , tem-se o valor da frequência de 20kHz, $i_E = 9A$, $E = 76,6V$, $i_2 = 1,73A$ e $U = 400V$, sendo i_E e E os valores de corrente e tensão de saída do painel e sendo i_2 e U os valores à saída do conversor elevador.

É de referir que se assumiu um *ripple* de 5% tanto para a corrente como para a tensão. Deste modo, e sabendo que $T = 1/f$ tem-se para o condensador de entrada [19],

$$C_1 = \frac{T\Delta i_2}{8\Delta E} = 0,141 \mu\text{F} \quad (27)$$

Para a bobina à entrada,

$$L_1 = \frac{UT}{4\Delta i_E} = 11,11 \text{ mH} \quad (28)$$

É ainda necessário efetuar o cálculo do condensador a colocar à saída do conversor, sabendo que $\delta_D = 0,25$ e que $I_{UAV} = 1,73A$, tem-se [19]

$$C_2 = \frac{I_{UAV}(1 - \delta_D)T}{\Delta U} = 3,24 \mu\text{F} \quad (29)$$

Estão deste modo dimensionados tanto os painéis como o conversor elevador a utilizar acoplado a estes, de modo a que os valores de saída se adequem ao pretendido para que possam ser colocados em paralelo com geradores termoelétricos e se obtenham os valores de tensão e corrente desejados.

4.2 Gerador Termoelétrico

Tal como já referido anteriormente, o principal objetivo desta dissertação será efetuar a recuperação de parte da energia de um painel fotovoltaico, perdida sob a forma de calor.

O elemento que permite efetuar a transformação da energia de calor em eletricidade é o gerador termoelétrico. Este será colocado em paralelo com o painel solar, partilhando o condensador de saída (C_2), mas tendo também um conversor elevador a jusante da saída do *TEG*. Nesta dissertação, serão utilizados dois Geradores Termoelétricos, um para cada painel fotovoltaico.

Deste modo, será também necessário efetuar o cálculo para os filtros de entrada do conversor elevador, sendo estes dados por C_3 e L_2 como de seguida se mostra. Tem-se o valor da frequência de 20kHz, $i_E = 2,348A$, $E = 100V$, $i_2 = 0,587A$ e $U = 400V$, sendo i_E e E os valores de corrente e tensão de saída do *TEG* e sendo i_2 e U os valores à saída do conversor elevador.

Para o condensador tem-se [19]

$$C_3 = \frac{T\Delta i_2}{8\Delta E} = 0,037 \mu\text{F} \quad (30)$$

Para a bobina tem-se [19]

$$L_2 = \frac{UT}{4\Delta i_E} = 42,59 \text{ mH} \quad (31)$$

Sendo que os valores de *ripple* apresentados são, tal como no caso dos valores considerados para o painel fotovoltaico, de 5%.

Os valores da corrente de entrada e de tensão de entrada serão os correspondentes ao *datasheet* do gerador termoelétrico escolhido (Anexo C), tendo em conta a temperatura do lado quente considerada ($T_h = 200^\circ C$) e a associação em série de 2 *TEG* (cada um com 15 módulos termoelétricos).

Uma vez mais, o valor destas grandezas à saída será obtido tendo em conta um aumento para a tensão e uma diminuição proporcional da corrente, de modo a manter a potência.

Representa-se na figura (27) o esquema implementado, no programa de simulação numérica utilizado, do gerador termoelétrico, no qual o valor da resistência interna é obtida a partir das equações (33) e (34).

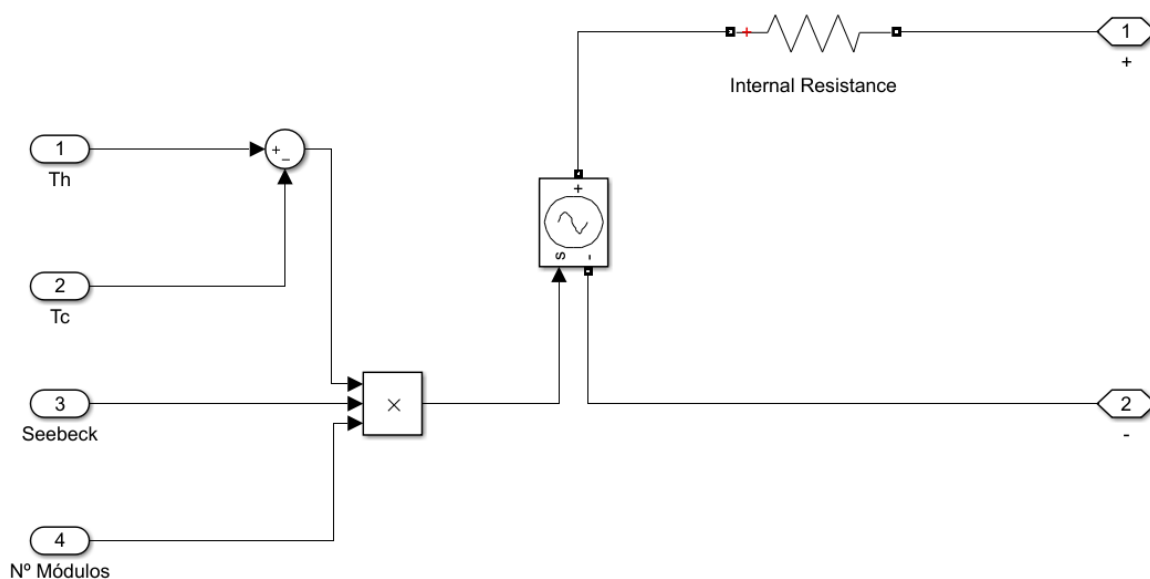


Figura 27: Modelo matemático do Gerador Termoelétrico [30].

Da figura (27), é possível verificar que existem diversas variáveis de entrada no sistema, sendo que destas, a única que não se sabe à partida é o Coeficiente de *Seebeck*, sendo necessário efetuar o seu cálculo. A equação que permite calcular este valor é a seguinte [31]

$$C_{Seebeck} = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_h - V_c}{T_h - T_c} \quad (32)$$

Sendo V_h a tensão de circuito aberto gerada no lado quente e V_c a tensão de circuito aberto gerada do lado frio do módulo, que tem o valor de 0V. É de referir que o valor de $C_{Seebeck}$ varia ligeiramente de acordo com a temperatura aplicada no lado quente. Na seguinte tabela mostram-se os valores calculados para diferentes temperaturas, assumindo $T_c = 30^\circ C$.

	$T_h = 300^\circ C$	$T_h = 200^\circ C$	$T_h = 80^\circ C$
$C_{Seebeck}$	0,0311	0,0353	0,0500

Tabela 4: Valores do Coeficiente de *Seebeck* para diferentes temperaturas.

Na equação referente ao coeficiente de *Seebeck* (32), ΔV é a diferença de tensão gerada entre os dois metais condutores e ΔT é a diferença de temperatura entre os lados quente e frio.

Quanto à temperatura do lado quente, note-se que na tabela 4 se representam três situações distintas, sendo que a $300^\circ C$ temos a situação ideal para o TEG escolhido, a $200^\circ C$ representa a situação em que se utiliza um concentrador de calor e, por fim, a $80^\circ C$ representa a mais comum situação em termos de temperatura presente na parte posterior de um painel fotovoltaico.

O resultado do cálculo do coeficiente de *Seebeck* está diretamente relacionado com outro fator. Caso o material do semiconductor seja do tipo n, os portadores são os elétrons. Neste caso ΔV será positivo e por sua vez o coeficiente de *Seebeck* será negativo.

Em caso de o material do semiconductor ser do tipo p, que é o caso do material utilizado no gerador escolhido para esta dissertação, a diferença de potencial será negativa e logo o coeficiente de *Seebeck* apresentará um valor positivo.

Importa ainda verificar a forma como são implementadas as ligações do TEG ao conversor elevador que lhe está associado, lembrando que a saída deste será efetuada em paralelo com o conversor associado ao painel fotovoltaico, nos terminais do condensador C_2 , como se mostra na figura (28).

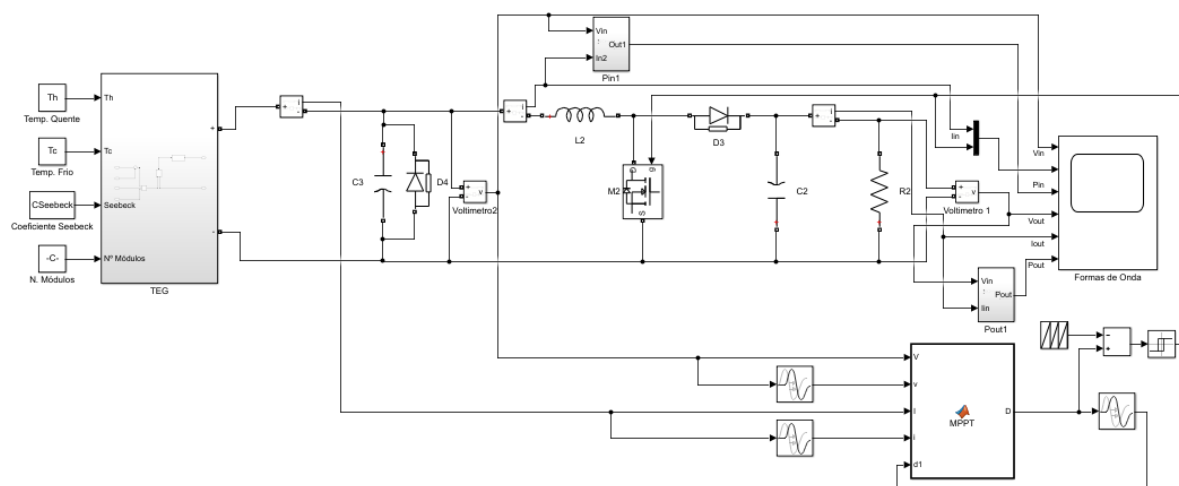


Figura 28: Modelo Gerador Termoelétrico com conversor elevador.

É de referir ainda que, também no caso do gerador termoelétrico, fez-se utilizar um algoritmo MPPT com princípio de funcionamento igual ao utilizado no caso do painel fotovoltaico, pois caso o painel esteja sombreado, a quantidade de radiação IV será menor, reduzindo o novo ponto de potência máxima de operação dos TEG.

Após ter sido validado o modelo do gerador termoelétrico através da simulação efetuada no programa de simulação numérica utilizado, ao alcançar nesta, para diferentes valores de T_h , os mesmos valores de potência, corrente e tensão que no *datasheet*, efetuaram-se os cálculos dos filtros presentes nas equações (30) e (31), para a temperatura de operação do sistema.

Por fim, no que à modelação do gerador termoelétrico do sistema diz respeito, o fator mais importante será a potência que este consegue produzir. A potência terá a influência do valor da corrente, que é dado por [30]

$$I_{TEG} = \frac{V_{ca}}{(R_{interna} + R_{carga})} \quad (33)$$

Dependendo do valor da resistência de carga e da resistência interna, a potência a retirar do TEG é dada por [30]

$$P = V_{ca}^2 \frac{R_{carga}}{(R_{interna} + R_{carga})^2} \quad (34)$$

Onde P é a potência gerada a partir do módulo termoeletrico, sendo sensível a variações na carga. Por outro lado, é diretamente proporcional à diferença de temperatura, pois à medida que a diferença de temperatura aumenta, a potência também aumenta e, como resultado, o ponto de potência máxima muda.

Se uma carga constante e de igual valor ao da resistência interna do módulo termoeletrico estiver conectada aos terminais deste, o valor ponto de potência máxima pode ser obtido para uma determinada diferença de temperatura.

Assim, foi calculado o valor ideal para a resistência interna, sendo utilizado tanto na resistência interna do TEG como na resistência de carga, de modo a poder validar o modelo, nas simulações que se encontram no capítulo 5.

4.3 Algoritmo MPPT

Para que seja possível ao sistema colocar a potência máxima possível a cada instante na sua saída é necessário implementar um algoritmo que satisfaça esta necessidade.

Tal como já referido anteriormente, o algoritmo a utilizar no MPPT será o algoritmo baseado no método da condutância incremental. Assim, será implementado um código no programa de simulação numérica utilizado correspondente a uma função que irá permitir colocar em prática o fluxograma da figura (11). Este código está presente em anexo a esta dissertação (Anexo A).

Do código presente em anexo é de referir que as letras que estão em maiúscula representam os valores num dado instante, enquanto que as letras minúsculas representam o instante anterior a este, sendo que os valores utilizados para definir o máximo, o mínimo e a variação do fator de ciclo resultaram de vários ensaios ao sistema.

Note-se, no entanto, que apenas a implementação do código não é suficiente para que o algoritmo funcione, sendo necessário ainda efetuar o diagrama de blocos, efetuado no programa de simulação numérica utilizado, representado na figura (29).

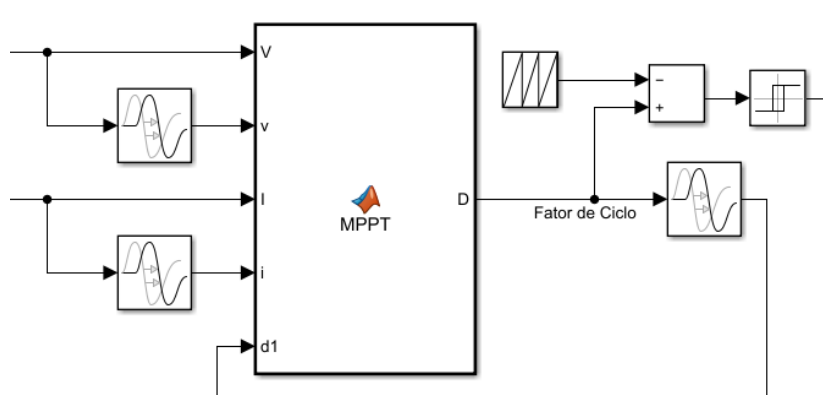


Figura 29: Diagrama do MPPT implementado no sistema.

É de referir que as entradas da função provêm da tensão e corrente medidas à saída do painel fotovoltaico e do gerador termoeletrico, enquanto que a saída do diagrama de blocos representado na figura terá entrada na *gate* do *IGBT*, permitindo efetuar uma ação de comando sobre o conversor elevador.

Para além disto, é necessário que seja efetuado um atraso em ambos os sinais (de tensão e de corrente), de modo a que possa ser efetuada a comparação entre o valor num dado momento e o valor anterior, tanto de corrente como de tensão. À saída da função, o mesmo se aplica de modo a que se possa comparar o fator de ciclo num certo instante, com o instante que o antecede.

O modo como a função é introduzida no sistema é fazendo com que quando a derivada da potência é positiva, o sinal de comando do conversor toma valor mínimo, provocando um aumento da corrente de entrada. Em sentido contrário, quando a derivada é negativa, o sinal de comando passa ao valor máximo, o que vai fazer com que a corrente de entrada desça.

À saída, o valor é comparado com uma onda triangular com valores compreendidos entre 0 e 1 à frequência de 20kHz, passando por um comparador de histerese (estreita) antes de entrar na *gate* do IGBT.

Importa, por fim, verificar a forma como o sistema reage tendo o algoritmo de seguimento do ponto de potência máxima, representado na figura (30), onde se observa a variação da potência para o seu valor máximo assumindo uma redução para metade da irradiância.

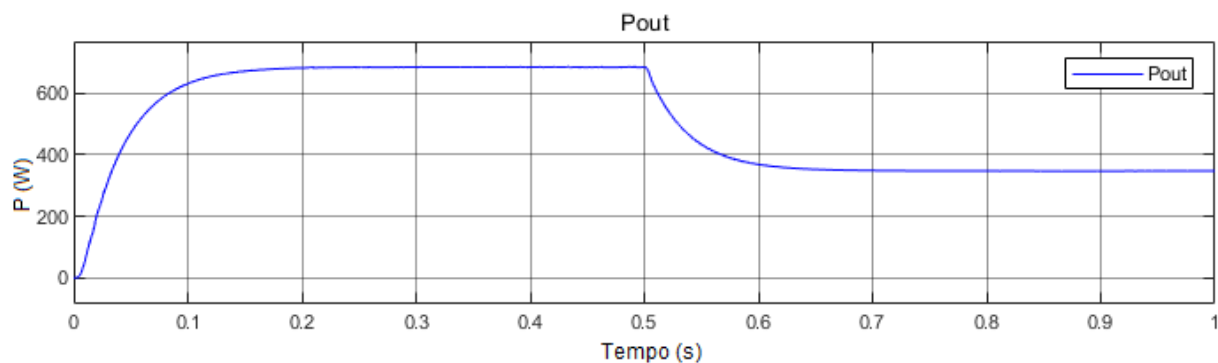


Figura 30: Influência do MPPT na estabilização da potência perante uma redução na irradiância.

Observa-se nos primeiros instantes uma subida suave no valor da potência, estabilizando sem oscilações, tendo o mesmo comportamento aquando da redução da irradiância no instante $t = 0,5$ segundos.

A figura (30) permite validar o algoritmo MPPT, uma vez que este permite efetuar a transição de forma suave, perante uma variação no valor de irradiância, para o valor de potência máxima nessas novas condições.

4.4 Inversor

Proceda-se agora à análise de como está implementado o inversor no sistema. Sabendo que é necessário transformar os valores contínuos em alternados, para que se possa injetar energia na rede, é de grande importância o correto funcionamento deste elemento.

Desta forma, é possível representar-se V_{pwm} de acordo com a equação acima representada, tendo esta grandeza representada a azul na figura (31).

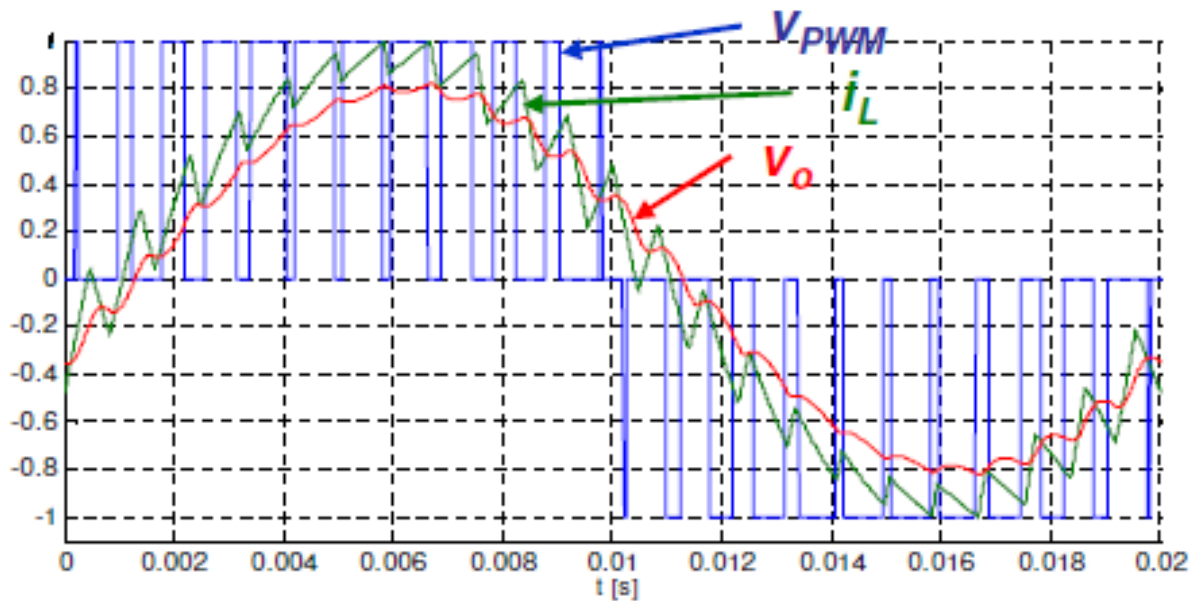


Figura 31: Representação da tensão V_{pwm} , tensão V_o e corrente i_L [19].

Proceda-se agora, com mais detalhe à análise das taxas de distorção harmónica e tensões respectivas para o caso do inversor utilizando a modulação PWM a 3 níveis.

A taxa de distorção harmónica (THD) e a taxa de distorção harmónica pesada (THD_{Pesada}), são dados pelas seguintes equações [33]

$$THD = \frac{1}{V_0} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (35)$$

$$THD_{Pesada} = \frac{1}{V_0} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n^2}{n^2}\right)^2} \quad (36)$$

Pode representar-se a tensão de pico para a primeira harmónica como [19]

$$V_{p1RMS} = \frac{UV}{\sqrt{2}u_{cmax}} \quad (37)$$

Desta forma será possível obter o fator de forma (k_{FV}) para este inversor [19]

$$k_{FV} = \frac{V_{p1RMSmax}}{V_{pRMSmax}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} = 0,89 \quad (38)$$

Proceda-se agora à representação e análise do modo como foi implementado o inversor e o que este inclui em si, como se pode ver pela figura (32).

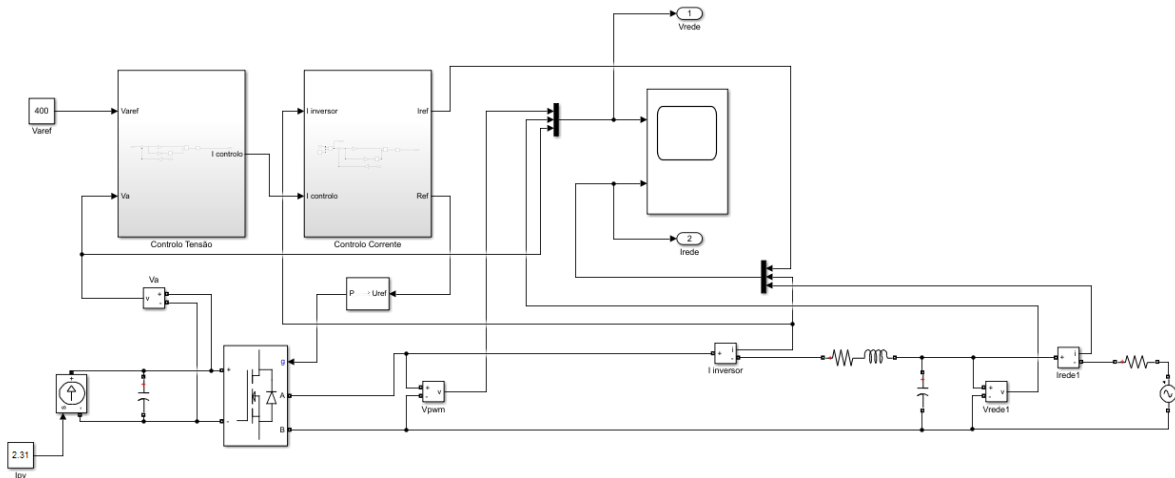


Figura 32: Implementação do inversor a utilizar no programa de simulação numérica utilizado.

A entrada do sistema representado na figura acima corresponde a uma fonte controlada de corrente, pois trata-se do estudo e dimensionamento do inversor assumindo uma situação ideal teoricamente, antes de se interligar ao restante sistema.

O valor de corrente utilizada nesta fonte, corresponde ao valor que se sabe ser o de saída do conversor elevador que será colocado a montante do inversor no sistema.

Para o bom funcionamento do inversor, é necessário garantir o correto funcionamento do restante sistema. Posto isto, os valores do condensador e da bobina de saída do inversor, foram calculados como de seguida se mostra.

O valor da bobina à saída do inversor (L_3) calcula-se como num conversor de 4 quadrantes [19]

$$L_3 = \frac{UT}{4\Delta i_{Lmax}} = 21,6 \text{ mH} \quad (39)$$

De onde $i_{Lmax} = 2,312 \text{ A}$ foi retirado sabendo a potência de saída e sabendo a tensão de saída do sistema PV-TEG, $U = 400V$, $T = \frac{1}{f}$ tendo $f = 20kHz$ e assumindo um *ripple* de 10% para o valor nominal da corrente.

O cálculo do valor do condensador a colocar à saída do inversor (C_4) foi efetuado usando a equação que de seguida se apresenta [19], onde $U = 400V$, $T = \frac{1}{20 \times 10^3}$, L_3 dado pela equação anterior e ΔU_{emax} foi considerado 10% do valor nominal (400V).

$$C_4 = \frac{UT^2}{32L_3\Delta U_{emax}} = 0,036 \mu\text{F} \quad (40)$$

De notar que o condensador à entrada do inversor (C_5) será calculado no contexto do controlo de tensão a ser efetuado no inversor.

Para se obter os valores pretendidos de potência a injetar na rede, é necessário proceder a um controlo dos valores da corrente alternada e da tensão contínua, controlo esse que será efetuado no inversor, e que será analisado em seguida.

4.4.1 Controlo de Corrente

O controlo de corrente é efetuado com o objetivo de enviar um sinal de controlo para a entrada do Gerador PWM a 3 níveis, sendo que, a saída deste irá corresponder ao sinal de entrada na *gate* do inversor, que está representado por uma Ponte Retificadora com 2 braços. Na figura (33) está representado o circuito de entrada do inversor.

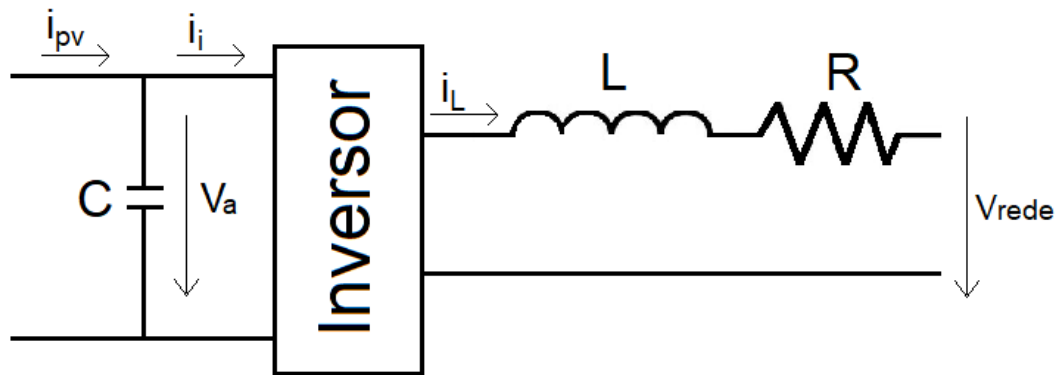


Figura 33: Circuito de entrada do inversor.

Daqui, retira-se a equação da dinâmica da corrente na bobine, assumindo que a resistência é nula, tem-se então

$$L \frac{dI}{dt} = V_a - V_{rede} \quad (41)$$

De seguida, na figura (34), encontra-se representado o diagrama de blocos do controlador de corrente a implementar, que pode ser dado por uma função de transferência em que existe um ganho G_i e um atraso T_d , obtendo-se no integrador $I = \frac{V_a - V_{rede}}{sL}$.

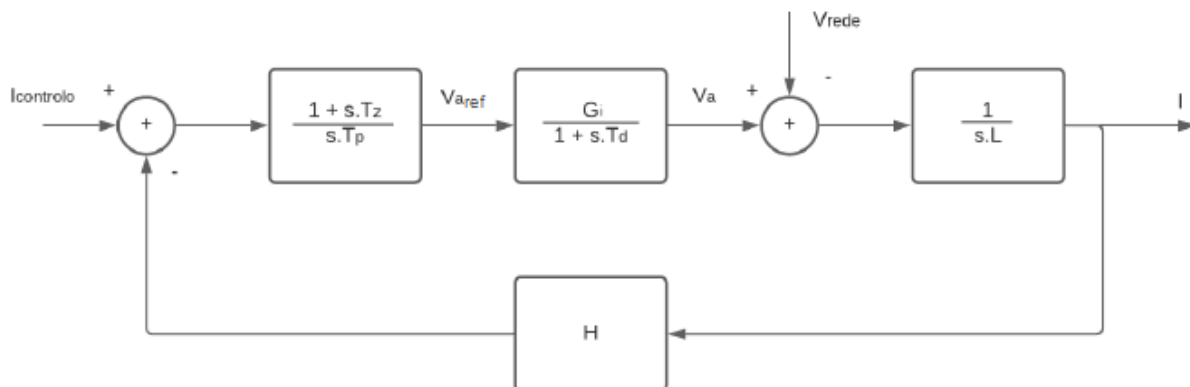


Figura 34: Diagrama de blocos do controlador de corrente.

De onde se pode retirar a Função de Transferência de 3ª ordem:

$$\frac{I_{inversor}(s)}{I_{controlado}(s)} = \frac{\frac{1 + sT_z}{sT_p} \frac{G_i}{1 + sT_d} \frac{1}{sL} H}{\frac{1 + sT_z}{sT_p} \frac{G_i}{1 + sT_d} \frac{1}{sL} H + 1} \quad (42)$$

Após algumas simplificações, e sabendo que $H = 1$, obtém-se

$$\frac{I_{inversor}(s)}{I_{controlado}(s)} = \frac{1 + sT_z}{s^3 \frac{T_d T_p L}{G_i} + s^2 \frac{T_p L}{G_i} + sT_z + 1} \quad (43)$$

Sendo a função de transferência de 3ª ordem com um zero, e existindo uma perturbação (V_{rede}) imediatamente antes do integrador ($1/sL$), de modo a garantir erro estático de posição nulo é necessário acrescentar um pólo na origem.

Para não aumentar o excesso de pólos-zeros, acrescenta-se também um zero, ou seja, o compensador será do tipo proporcional integral (PI), como se representa de seguida, na figura (35).

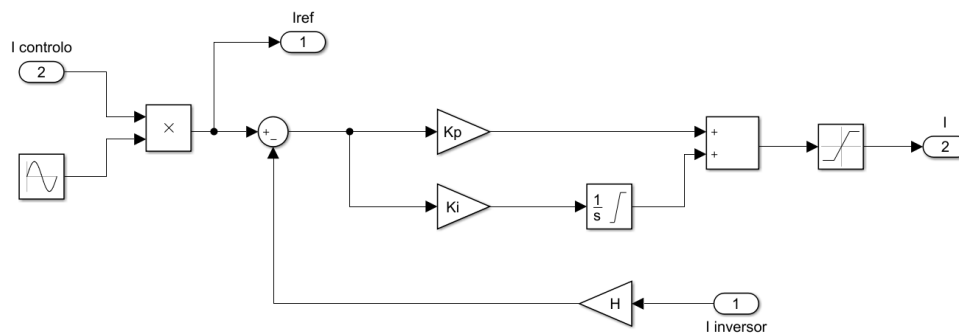


Figura 35: Modelo do controlador de corrente.

Ao analisar o modelo, é de notar que o valor de "I controlado" (proveniente do bloco do controle de tensão) é transformado numa grandeza sinusoidal, dando origem à corrente de referência. Esta corrente é também comparada com a corrente de saída do inversor.

Estas grandezas, ao serem comparadas, necessitam de ser corrigidas a todo o instante, sendo efetuado então um controle proporcional integral (PI). Após este controle ser efetuado, o sinal tem ainda de passar por um limitador antes de se tornar na grandeza "Ref", que será entrada do Gerador PWM 3 níveis.

Para efetuar o controle proporcional integral com total acerto é necessário calcular os valores de K_i (Ganho Integral) e K_p (Ganho Proporcional) a utilizar no mesmo.

Para calcular os valores destes ganhos, é necessário calcular em primeiro lugar os valores das constantes T_z , T_d e T_p . Procedendo aos cálculos tem-se, para T_d um valor de $f_c = 20kHz$ e calcula-se

$$T_d = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi}{2\pi f_c} = 25 \mu s \quad (44)$$

É possível então utilizar o critério de simetria ótima $b_k^2 = a b_{k+1} b_{k-1}$, sendo que a representa um grau de liberdade do controlador, tomando um valor diferente de zero e b_k representa os coeficientes.

Da função de transferência representada em (43) tem-se que $b_3 = \frac{T_d T_p L}{-G_i}$, $b_2 = \frac{T_p L}{-G_i}$, $b_1 = T_z$ e $b_0 = 1$. Note-se que, T_p ao depender do valor de G_i , se este for negativo, então T_p também será, pelo que b_3 , b_2 , b_1 e b_0 serão valores positivos. É possível então deduzir as expressões que serão utilizadas para efetuar o cálculo das grandezas T_z e T_p , utilizando $a = 2$, sendo

$$\begin{cases} \left(\frac{T_p L_3}{G_i}\right)^2 = a \frac{T_p L_3 T_d}{G_i} T_z \\ (T_z)^2 = a \frac{T_p L_3}{G_i} \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} T_p = \frac{a^3 T_d^2 4 G_i}{L_3} = 706 \mu s \\ T_z = a^2 T_d = 100 \mu s \end{cases} \quad (45)$$

Onde se tem que $G_i = \frac{400}{1} = 400$ tendo $V_{rede} = 400V$ e $V_{modulante} = 1V$ sendo o valor máximo que esta toma, ganho de realimentação de valor unitário ($H = 1$) e T_d calculado anteriormente. Assim, podem por fim obter-se os valores dos ganhos do seguinte modo

$$K_i = \frac{1}{T_p} = 1,42 \times 10^3 \quad (46)$$

$$K_p = \frac{T_z}{T_p} = 0,1416 \quad (47)$$

Pode ainda ser feita a análise à estabilidade do sistema no que ao controlo de corrente diz respeito. Assim, tem-se que a partir do diagrama de blocos é possível obter a função de transferência do sistema, sendo depois possível obter a função de transferência simplificada. É a partir desta, substituindo os valores obtidos que se têm os seguintes resultados

$$\frac{I_{inversor}(s)}{I_{controlo}(s)} = \frac{1 + sT_z}{s^3 \frac{T_d T_p L}{G_i} + s^2 \frac{T_p L}{G_i} + sT_z + 1} = \frac{1 + 100 \times 10^{-6} s}{9,53 \times 10^{-13} s^3 + 3,81 \times 10^{-8} s^2 + 100 \times 10^{-6} s + 1} \quad (48)$$

Sendo que, ao efetuar o *Root Locus* no programa de simulação numérica utilizado, é possível obter

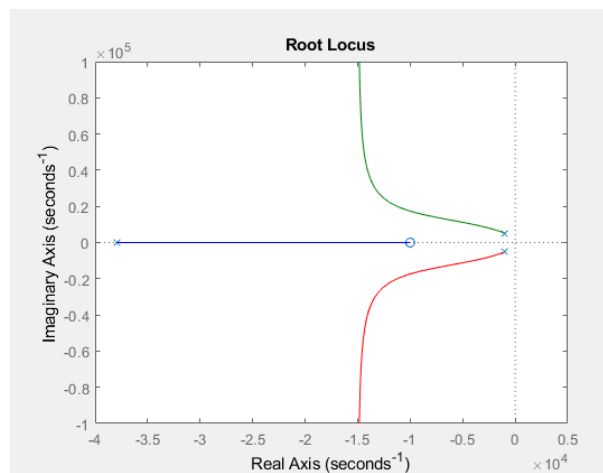


Figura 36: *Root Locus* do controlador de corrente.

Observa-se então que o sistema é estável uma vez que todos os polos e todos os ramos do Diagrama de Lugar Geométrico das Raízes se encontram localizados no semiplano esquerdo, tendo parte real negativa, condição de estabilidade de um sistema em controlo.

4.4.2 Controlo de Tensão

A tensão do lado contínuo será controlada tendo como objetivo fazer com que V_a tenha um valor de 400V. A partir da figura (33) retira-se que

$$C \frac{dV_a}{dt} = i_{pv} - i_i = i_{pv} - \gamma i_L \quad (49)$$

Em valores médios, γ pode ser dado por G_v , sendo que este pode ser calculado [19]

$$G_v = \frac{\eta V_{RRMS}}{V_a} = 0,56 \quad (50)$$

Onde V_{RRMS} é o valor eficaz da tensão na rede e tem o valor de 230V e V_a é o valor da tensão no condensador à entrada do inversor, tendo o valor de 400V. O valor de η foi obtido por medição, ao medir a potência à entrada do inversor e à sua saída, tendo-se obtido um rendimento de 97,2%. O condensador à entrada do inversor (C_5) será necessário dimensionar de modo a poder ser utilizado nos cálculos dos ganhos presentes no controlo de tensão. Este condensador tem de ser calculado sabendo que existe uma ondulação de 100 Hz devido ao efeito de retificação feito pelo inversor. Assim, tendo $I_0 = 2,312A$, $f_{rede} = 50Hz$ e assumindo um *ripple* de 5% para a tensão de entrada (V_0), tem-se [19]

$$C_5 = \frac{I_0}{\omega \Delta V_0} = 368 \mu F \quad (51)$$

É necessário utilizar uma constante T_{dv} , que é dada por

$$T_{dv} = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi}{2 \times \pi \times f_{rede}} = 10 \text{ ms} \quad (52)$$

O diagrama de blocos para o controlador de tensão em questão é representado como se mostra na figura (37), que pode ser dado por uma função de transferência em que existe um ganho (G_v), que vem afetado do sinal negativo de modo a ter em conta a entrada positiva de I_L no ponto de soma, e um atraso T_{dv} , obtendo-se no integrador $V_a = \frac{I_L + I_{pv}}{sC}$.

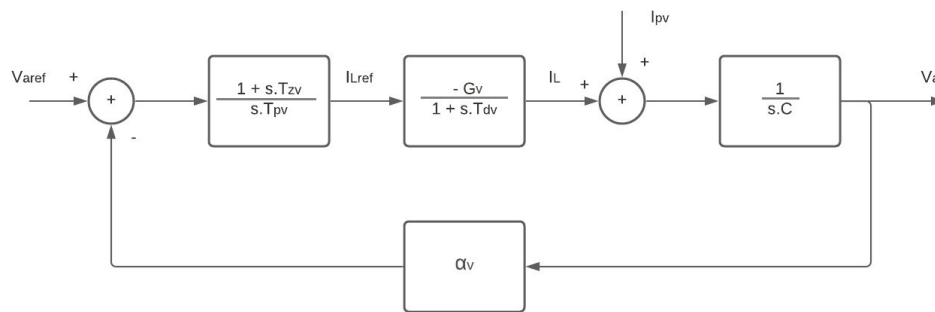


Figura 37: Diagrama de blocos do controlador de tensão.

De onde se pode retirar a Função de Transferência de 3ª ordem:

$$\frac{V_a(s)}{V_{aref}(s)} = \frac{\frac{1 + sT_{zv}}{sT_{pv}} \frac{-G_v}{1 + sT_{dv}} \frac{1}{sC} \alpha_v}{\frac{1 + sT_{zv}}{sT_{pv}} \frac{-G_v}{1 + sT_{dv}} \frac{1}{sC} \alpha_v + 1} \quad (53)$$

Após algumas simplificações, e sabendo que $\alpha_v = 1$, obtém-se

$$\frac{V_a(s)}{V_{aref}(s)} = \frac{1 + sT_{zv}}{s^3 \frac{T_{dv}T_{pv}C}{-G_v} + s^2 \frac{T_{pv}C}{-G_v} + sT_{zv} + 1} \quad (54)$$

Usando o critério de simetria ótima $b_k^2 = a b_{k+1} b_{k-1}$, anteriormente referido, tem-se que, da função de transferência representada em (54) tem-se que $b_3 = \frac{T_{dv}T_{pv}C}{-G_v}$, $b_2 = \frac{T_{pv}C}{-G_v}$, $b_1 = T_{zv}$ e $b_0 = 1$. Note-se que, T_{pv} ao depender do valor de G_v , se este for negativo (devido ao sinal que lhe é aplicado na expressão matemática e não em termos reais), então T_{pv} também será, pelo que b_3 , b_2 , b_1 e b_0 serão valores positivos.

Tendo em conta este critério, é possível então obter o modo de calcular as constantes que darão origem aos cálculos dos ganhos a utilizar no controlador. Tomando o valor de $a = 2$, T_{dv} calculado em (52), G_v calculado em (50) e C_5 calculado em (51) (que substitui C uma vez que é adaptado ao caso em estudo), então as constantes em questão são dadas por

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{T_{pv}C_5}{-G_v}\right)^2 = -a \frac{T_{pv}C_5T_{dv}}{G_v} T_{zv} \\ (T_{zv})^2 = -a \frac{T_{pv}C_5}{G_v} \end{array} \right. \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{pv} = \frac{a^3 T_{dv}^2 (-G_v)}{C_5} = -1,0827 \text{ s} \\ T_{zv} = a^2 T_{dv} = 0,04 \text{ s} \end{array} \right. \quad (55)$$

Substituindo os valores de T_{pv} e de T_{zv} em (54) obtém-se a função de transferência de cadeia fechada em função de a e de T_{dv}

$$\frac{V_a(s)}{V_{aref}(s)} = \frac{1 + sa^2T_{zv}}{s^3 a^3 T_{dv}^3 + s^2 a^3 T_{dv}^2 + sa^2 T_{dv} + 1} \quad (56)$$

Onde simplificando, se obtém por fim

$$\frac{V_a(s)}{V_{aref}(s)} = \frac{1 + sa^2T_{zv}}{(1 + saT_{dv})(s^2 a^2 T_{dv}^2 + s(a^2 - a)T_{dv} + 1)} \quad (57)$$

O que resulta num zero real, num pólo real e em pólos complexos, como de seguida se verá.

O zero real é então dado por

$$-\frac{1}{a^2 T_{dv}} \quad (58)$$

O pólo real é dado por

$$-\frac{1}{a T_{dv}} = -\omega_n \quad (59)$$

Por fim, os pólos complexos são dados por

$$-\frac{1}{a T_{dv}} \left(-\frac{a-1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a-1}{2}\right)^2 - 1}\right) = \omega_n (-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (60)$$

De modo a que o sistema tenha estabilidade, os pólos da função de transferência de cadeia fechada deverão ter parte real negativa, de modo a que o transitório tenda para zero. Assim, o fator de amortecimento (ξ), deverá respeitar o intervalo entre 0 e 1, motivo pelo qual se assume um valor

de $a = 2$ para efetuar os cálculos do controle de tensão. Representa-se, na figura (38), o modelo do controlador de tensão a ser utilizado no sistema

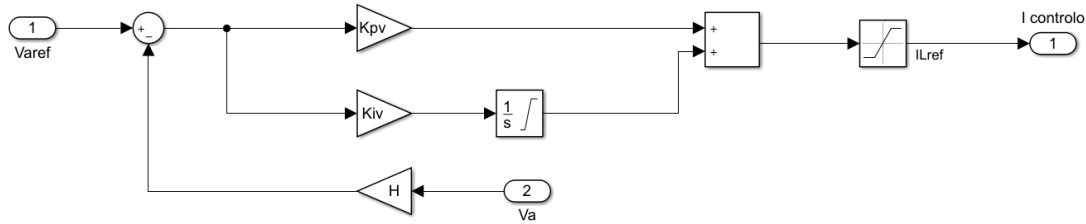


Figura 38: Modelo do controlador de tensão.

Efetuando os cálculos dos ganhos, obtém-se os seguintes valores

$$K_{iv} = \frac{1}{T_{pv}} = -0,9236 \quad (61)$$

$$K_{pv} = \frac{T_{zv}}{T_{pv}} = -0,0369 \quad (62)$$

Pode ainda ser feita a análise à estabilidade do sistema no que ao controle de tensão diz respeito. Assim, tem-se que a partir do diagrama de blocos é possível obter a função de transferência do sistema, sendo depois possível obter a função de transferência simplificada. É a partir desta, substituindo os valores obtidos que se têm os seguintes resultados

$$\frac{V_a(s)}{V_{aref}(s)} = \frac{1 + sT_{zv}}{s^3 \frac{T_{dv}T_{pv}C}{-G_v} + s^2 \frac{T_{pv}C}{-G_v} + sT_{zv} + 1} = \frac{1 + 0,04s}{7,11 \times 10^{-6}s^3 + 7,11 \times 10^{-4}s^2 + 0,04s + 1} \quad (63)$$

Sendo que, ao efetuar o *Root Locus* no programa de simulação numérica utilizado, é possível obter

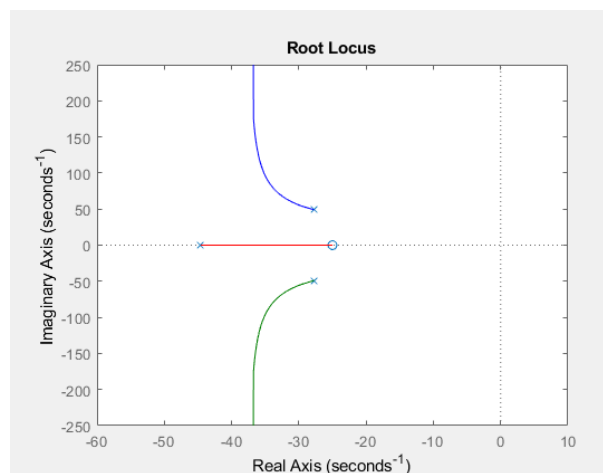


Figura 39: *Root Locus* do controlador de tensão.

Observa-se então que o sistema é estável uma vez que todos os polos e todos os ramos do Diagrama de Lugar Geométrico das Raízes se encontram localizados no semiplano esquerdo, tendo parte real negativa, condição de estabilidade de um sistema em controle.

5 Simulação e Discussão dos Resultados

Será neste capítulo que se irão abordar todas as simulações efetuadas para o sistema, em Matlab, tendo em conta as considerações efetuadas para se chegar a tais resultados, bem como a análise aos resultados obtidos.

5.1 Painel Fotovoltaico e MPPT

De modo a efetuar uma análise precisa do sistema em estudo nesta dissertação, será necessário em primeiro lugar analisar cada um dos subsistemas de forma individualizada, sem estarem interligados, procedendo em último lugar à análise do sistema como um todo e das formas de onda à saída deste.

Assim, começando pelos resultados das simulações obtidos com o painel fotovoltaico já contando com o MPPT conectado em paralelo (Sistema Painel + MPPT) tem-se, para uma irradiância de $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ e uma temperatura $T = 25^\circ\text{C}$, as formas de onda da tensão, corrente e potência para a saída do painel (entrada do conversor elevador), respetivamente, representadas na figura (40).

Representa-se a partir do início da simulação, tal como para todos os sistemas independentes, de modo a que se tenha a visualização de quanto tempo demora o sistema a entrar em regime estacionário. Refira-se, que quanto ao sistema final (subsecção 5.4) estará apenas a representação do regime estacionário, ignorando-se o transitório para efeitos de análise.

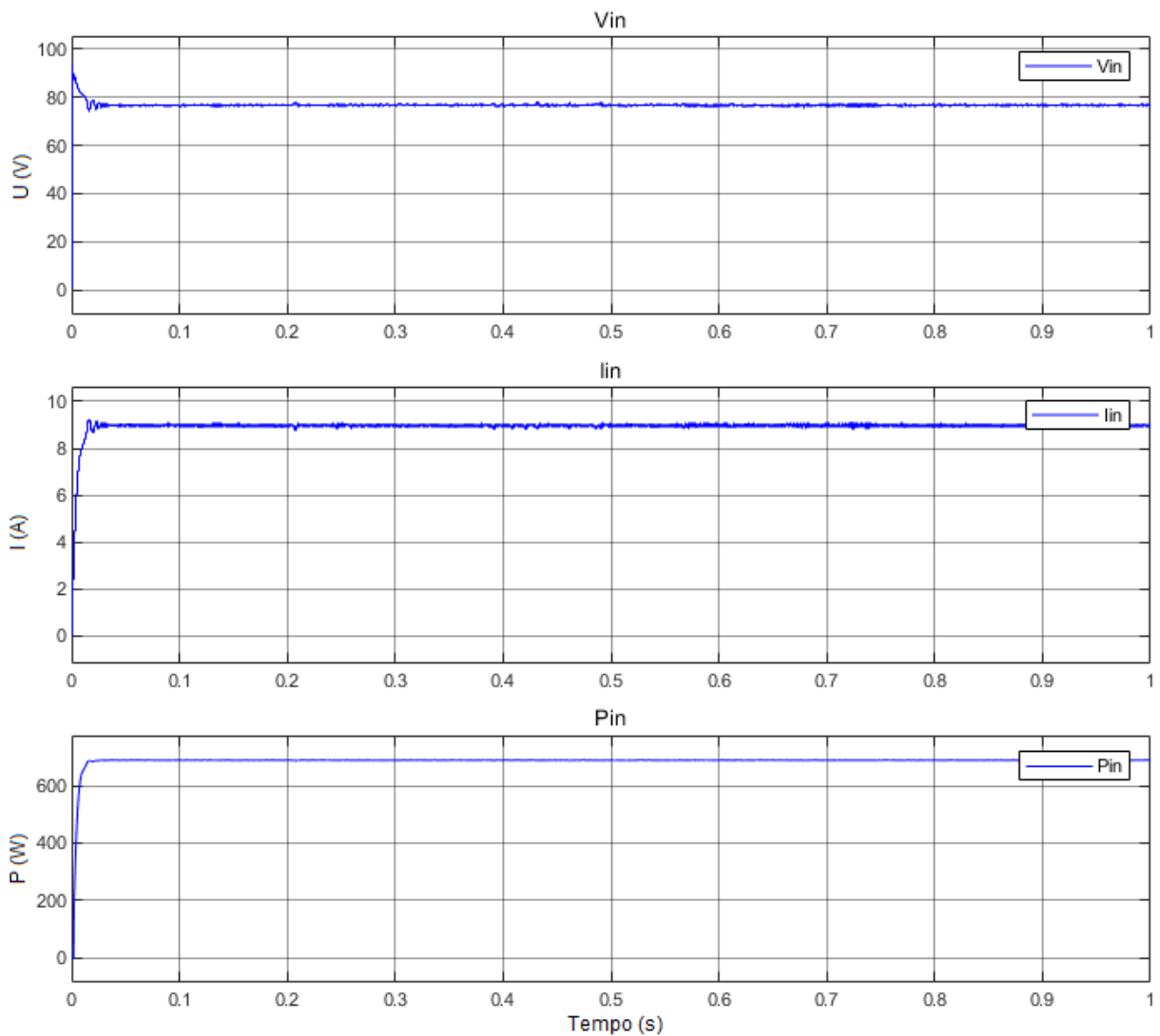


Figura 40: Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do painel fotovoltaico para o sistema incluindo MPPT.

Para a saída do conversor elevador, as formas de onda da tensão, corrente e potência são as representadas na figura (41), respectivamente.

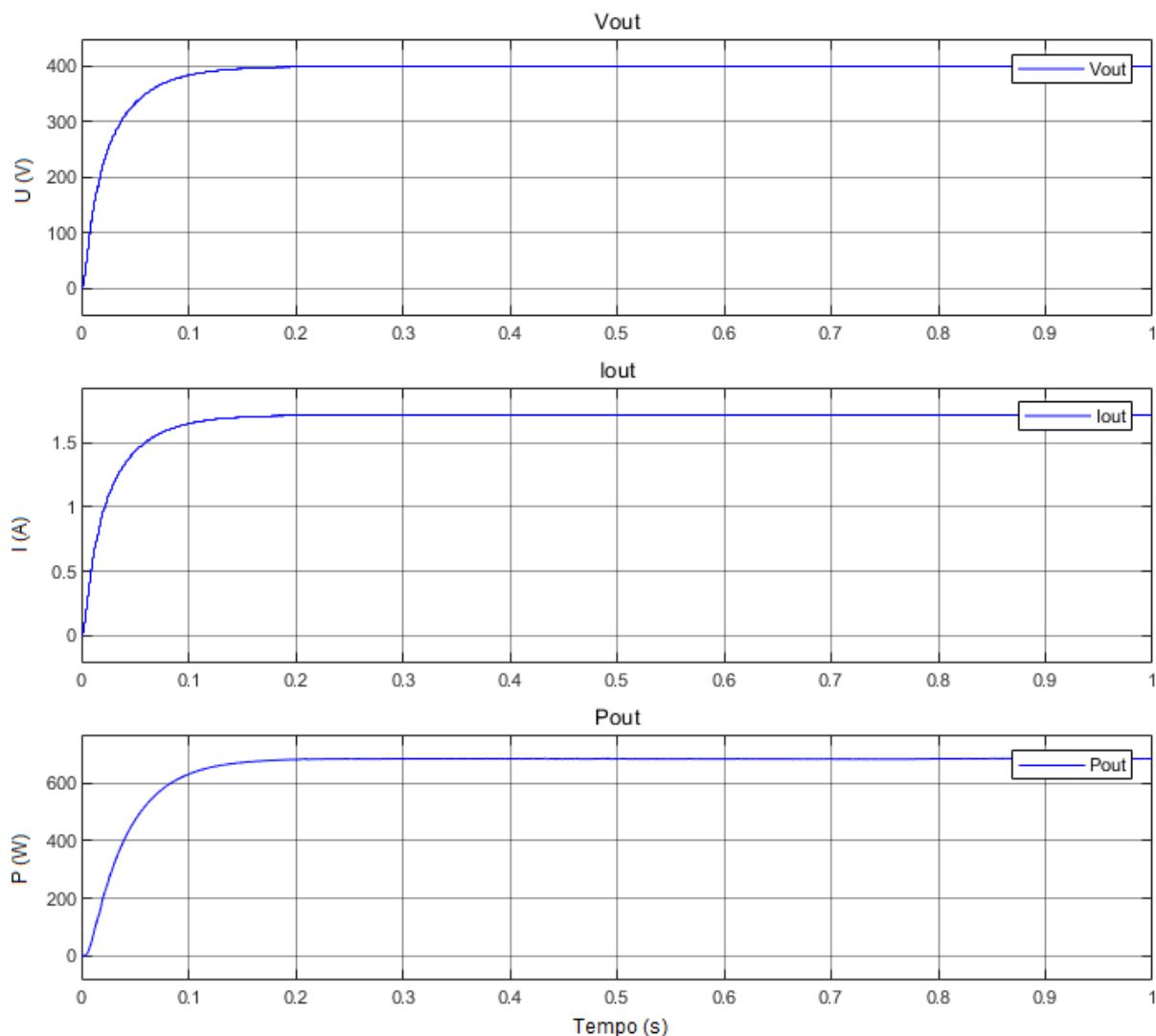


Figura 41: Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do *Boost* para o sistema incluindo MPPT.

Note-se que a utilização do MPPT é fundamental, pois este sistema à mínima variação coloca a potência num valor muito baixo e próximo de zero, sendo que sem a presença deste as formas de onda são incorretas e afastadas do valor ideal. Utilizando o MPPT, obtém-se um valor muito próximo a 690W de potência de saída.

Após serem verificadas as diferenças entre a utilização do MPPT ou a sua não utilização e confirmada a utilidade deste no sistema, efetuam-se testes de modo a verificar a adaptabilidade a diferentes situações, confrontando os resultados com os valores teóricos expectáveis.

Neste caso trata-se da simulação de uma variação para metade da irradiância, de modo a verificar como o sistema se comporta perante esta variação, sendo que o que é esperado, é uma diminuição da corrente, mantendo-se praticamente igual o valor da tensão, diminuindo deste modo a potência gerada pelo painel fotovoltaico.

Representam-se, na figura (42), as formas de onda demonstrativas do comportamento do painel com o MPPT em paralelo, perante uma diminuição da irradiância para $G = 500W/m^2$.

Para a saída do painel, tem-se as seguintes formas de onda de tensão, corrente e potência ao utilizar o MPPT.

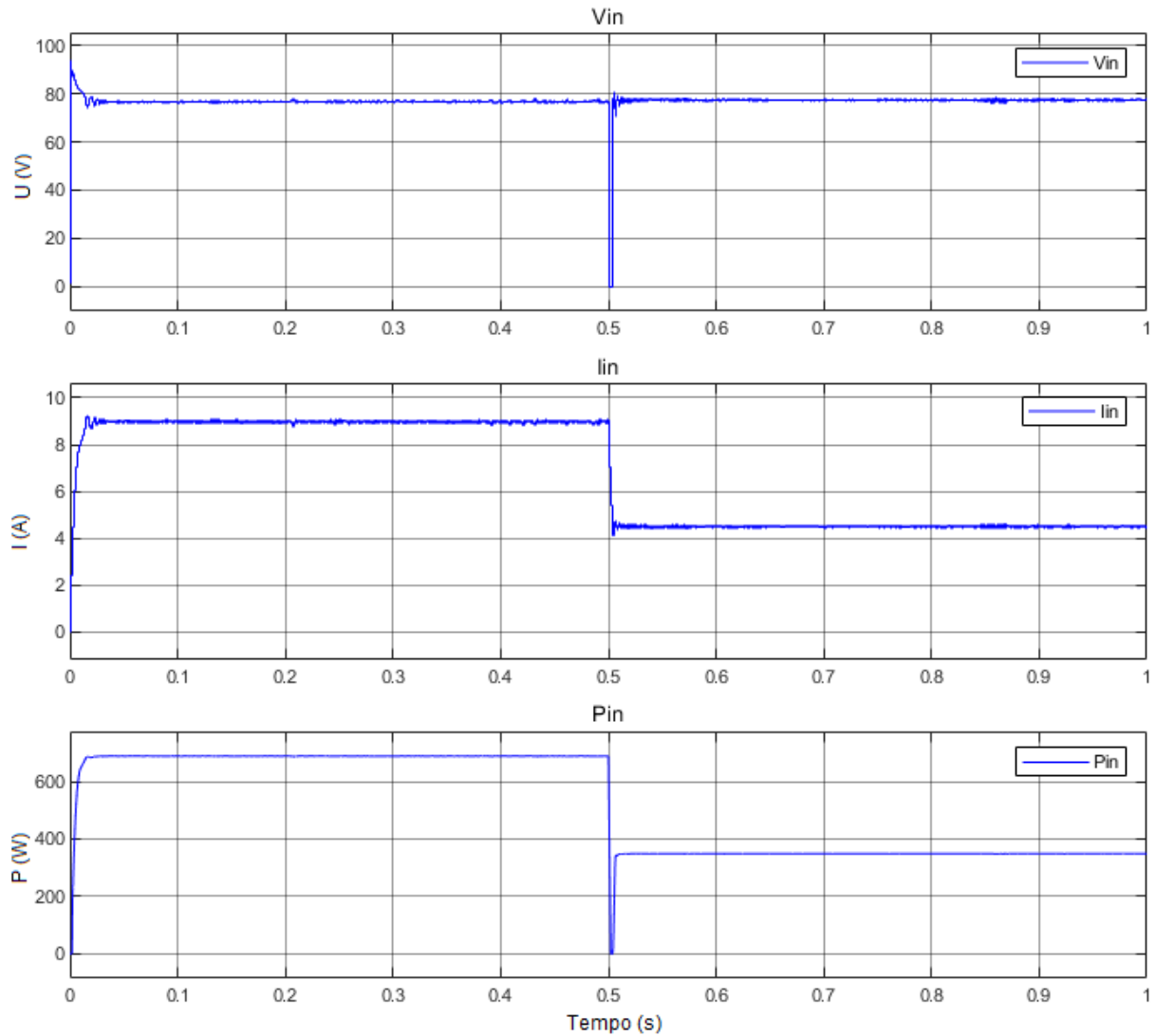


Figura 42: Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do painel fotovoltaico para o sistema incluindo MPPT e com variação de irradiância.

É observável que para a saída do painel, os valores de tensão se mantêm inalterados após esta variação, enquanto que no caso da corrente e por conseguinte da potência, estes valores são reduzidos para metade, tal como esperado.

Para a saída do conversor elevador, as formas de onda da tensão, corrente e potência estão representadas na figura (43).

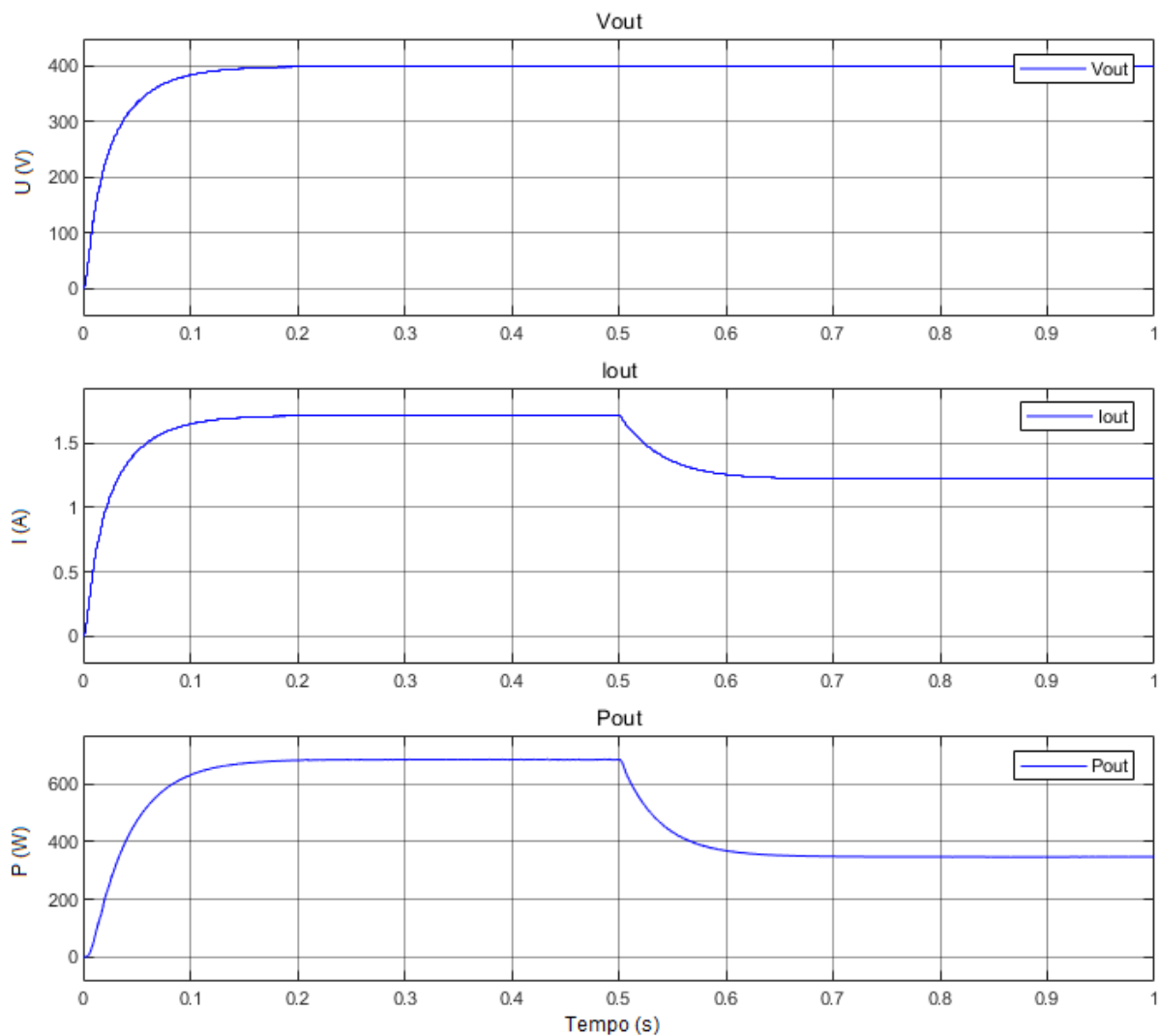


Figura 43: Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do *Boost* para o sistema incluindo MPPT e com variação de irradiância.

Tendo em conta os valores de tensão, corrente e potência a serem medidos aquando da variação na irradiância, por observação do *datasheet* do painel, verifica-se que existe uma resposta muito positiva por parte do MPPT que permite ao sistema estabilizar rapidamente nos valores de potência máxima para a irradiância em questão.

5.2 Gerador Termoelétrico

Em relação ao Gerador Termoelétrico, que será abordado individualmente neste subcapítulo, utilizou-se a temperatura de 200°C para o lado quente nas simulações efetuadas. Assim sendo, os valores da tabela 4 relativos a $T_h = 200^{\circ}\text{C}$ e os valores das equações (30) e (31) foram aplicados aos cálculos e respectiva comparação com os valores do *datasheet* do TEG foi efetuada.

Desta comparação, observa-se que os valores estão de acordo com o expectável, sendo necessários 15 módulos (para cada Gerador Termoelétrico) de modo a satisfazer as condições propostas no modelo desta dissertação.

Tendo em consideração estes fatores, as simulações foram efetuadas, tendo-se obtido as seguintes formas de onda para a tensão, corrente e potência no Gerador Termoelétrico, representadas na figura (44).

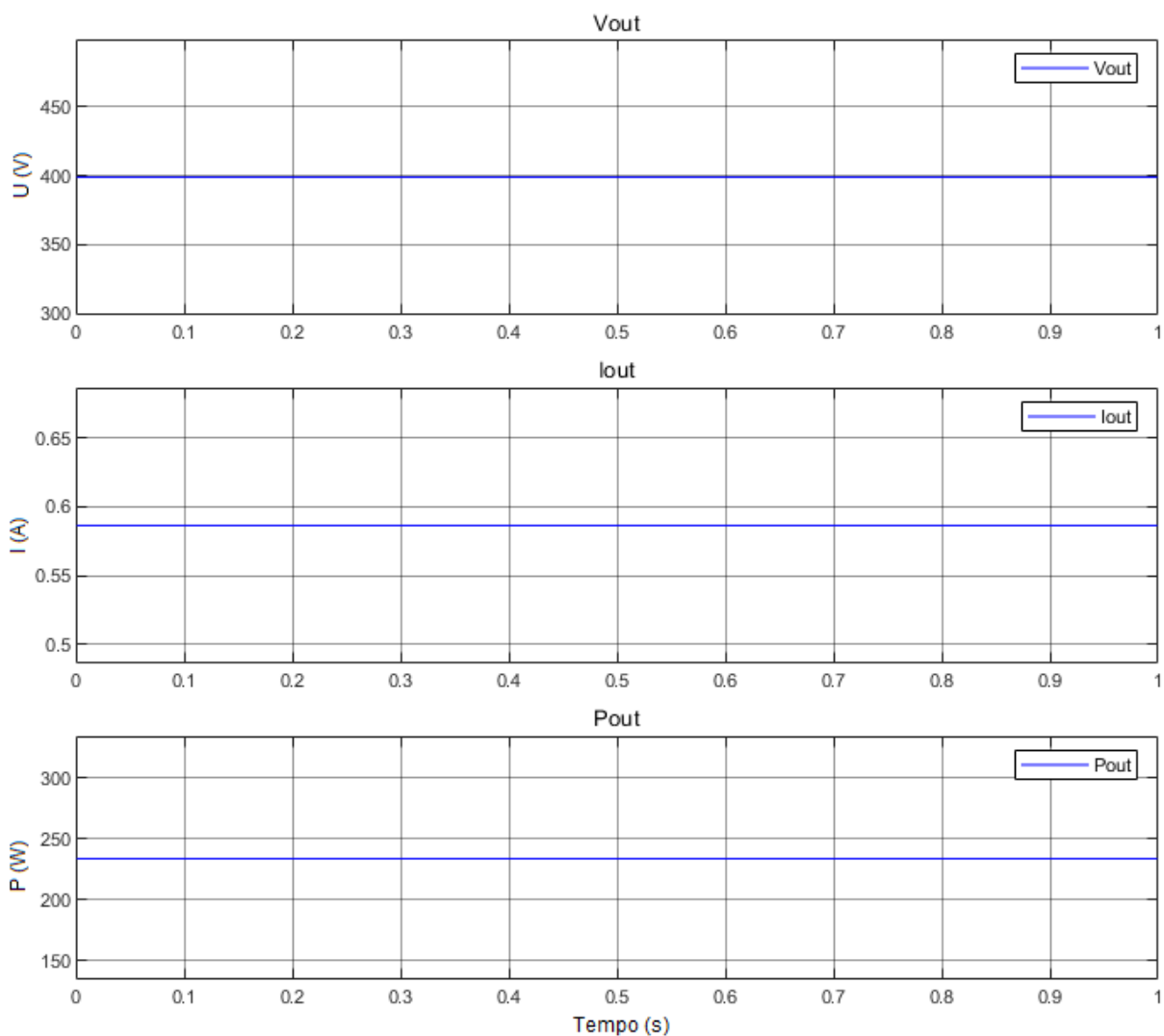


Figura 44: Formas de onda de tensão, corrente e potência no Gerador Termoelétrico.

É possível verificar que existe um ligeiro desvio (cerca de 5,1%) em relação ao valor esperado de potência. Para $T_h = 200^\circ C$ e com 30 módulos em série (15 em cada gerador termoelétrico), o valor esperado seria de 247,2W sendo que na simulação se obtém apenas 234,6W de potência à saída do TEG.

Uma vez que um dos objetivos desta dissertação é recuperar parte da energia perdida sob a forma de calor, ao colocar os terminais do TEG em paralelo com o condensador de entrada do *Boost* associado ao Painel Fotovoltaico, as formas de onda atualizadas em relação à figura (43), são as seguintes

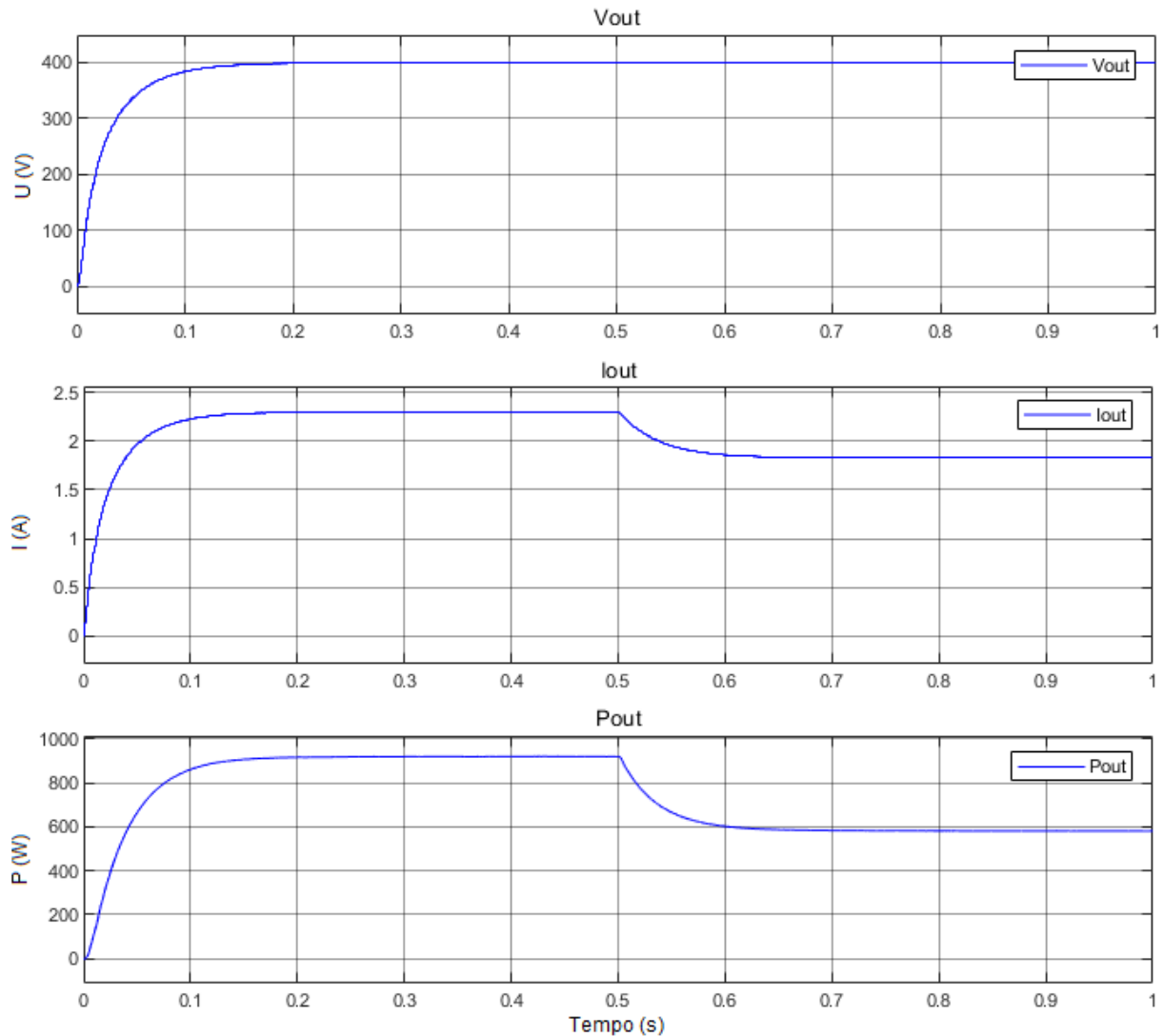


Figura 45: Formas de onda de tensão, corrente e potência à saída do *Boost* a jusante do paralelo PV-TEG.

Observa-se pois um aumento de valor em todas as grandezas, mesmo com a variação de irradiância, uma vez que a temperatura a que se encontra o lado quente do TEG é independente da variação de irradiância no Painel Fotovoltaico.

Deste modo é possível obter um valor de potência à saída do conversor elevador de $(690 + 234,6)$, correspondentes a 2 Painéis Fotovoltaicos e 2 TEG. Este valor dará uma potência de saída de 924,6W, potência essa que irá ser injetada no inversor, de modo a poder alimentar uma carga ou ser injetada na rede, posteriormente.

5.3 Inversor

No que às simulações relativas ao inversor (isolado) dizem respeito, estas foram efetuadas considerando o sistema observado na figura (32), sendo para efeitos teóricos de simulação de um inversor ideal, a sua entrada uma fonte controlada de corrente.

Esta simulação serviu para efetuar ajustes nos valores dos controladores, de modo a que o sistema tivesse uma resposta mais rápida perante variações no sistema.

Posto isto, os resultados obtidos foram os seguintes, representados na figura (46), representado a partir dos 0,4 segundos de modo a se observar apenas o regime permanente, para que seja possível comparar com exatidão com a figura (48).

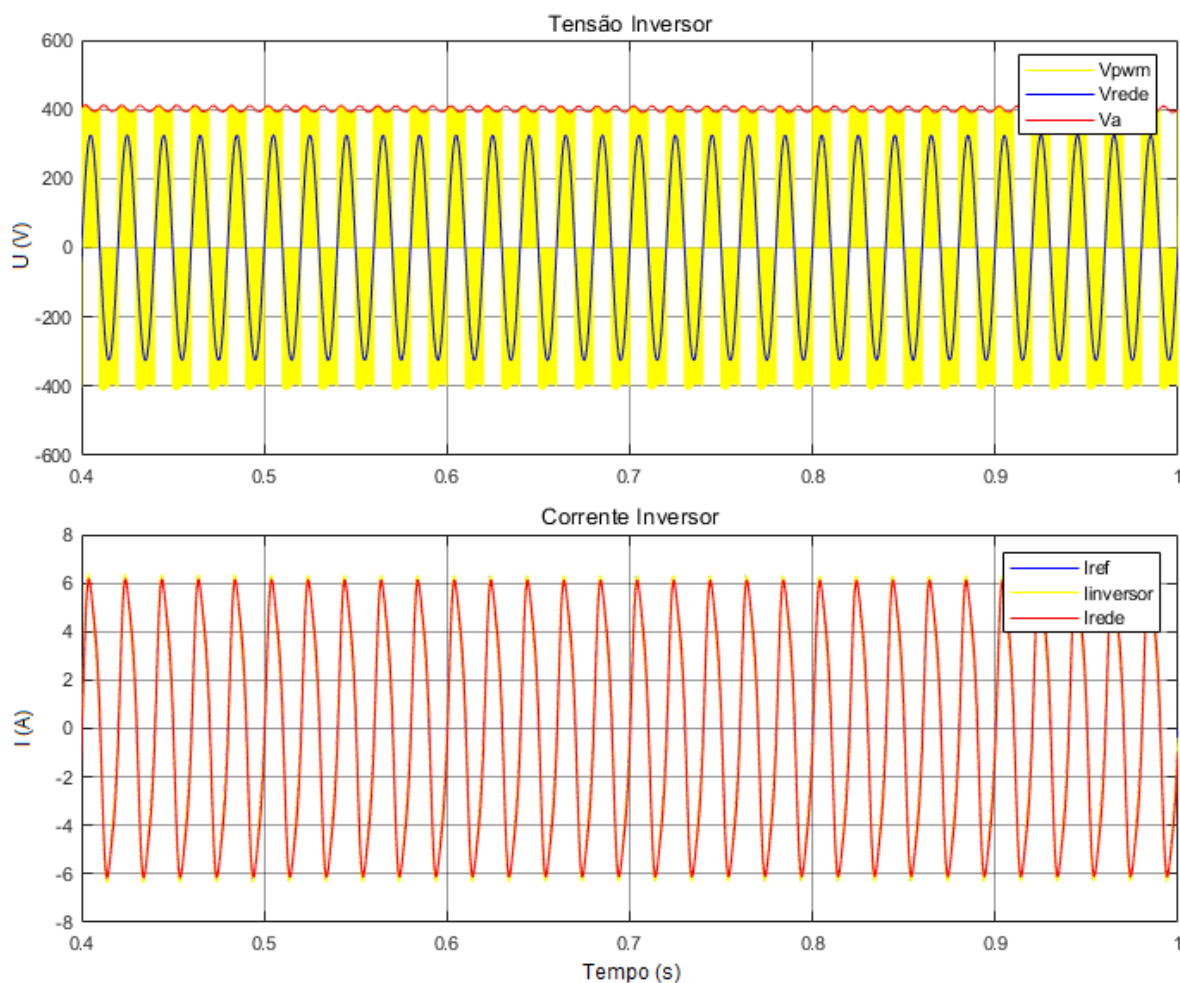


Figura 46: Formas de onda de tensão e corrente à saída do modelo ideal (sem perdas) do inversor a implementar.

5.4 Sistema Final

Por último, efetuou-se a interligação dos terminais do condensador de saída do *Boost* aos terminais de entrada da ponte retificadora que permite efetuar a conversão de grandezas com valor direto em valor alternado.

Deste modo, a tensão à saída do conversor elevador passa a influenciar diretamente os valores de potência que o inversor coloca na rede.

Tendo isto em conta, foram efetuadas três simulações distintas para validar o modelo. Em primeiro lugar, o sistema foi simulado em condições normais assumindo a entrega por completo de energia à rede.

Em segundo lugar, efetuou-se a simulação do sistema, assumindo que toda a energia gerada seria entregue à rede elétrica, variando a irradiância para metade. Em terceiro lugar, foi efetuada a simulação do sistema em que se assumia que existia uma carga a ser alimentada, de modo a simular uma habitação, com variação na irradiância para metade e depois para o dobro.

Tanto na segunda simulação como na terceira simulação, obtiveram-se os mesmos resultados em relação ao sistema fotovoltaico e ao sistema PV-TEG, uma vez que a diferença irá encontrar-se na saída do sistema (saída do inversor) e não influenciará a produção de energia por parte do sistema PV-TEG.

Tal como já referido anteriormente, tiveram de ser colocados 2 painéis solares em série, uma vez que a tensão de saída de um só painel é demasiado baixa comparada com a tensão da rede, não havendo capacidade por parte do conversor elevador de efetuar esta conversão no valor da tensão (cerca de 10 vezes superior).

Assim, ao ter uma associação em série de 2 painéis, foram tidos em conta para a simulação (345+117) W de potência extra em relação ao inicialmente projetado para o sistema (462W) decorrentes da adição de um painel solar e de um gerador termoelétrico, havendo no total dois componentes de cada, sendo o valor mínimo indispensável para que o sistema funcione conectado à rede elétrica.

Os resultados obtidos são os presentes na figura (47), onde se podem observar as grandezas de saída dos sistemas indicados, permitindo efetuar a comparação entre estas formas de onda e as formas de onda presentes nas figuras (42) e (43), a partir dos 0,4 segundos, pois despreza-se o transitório nos resultados das simulações do sistema final.

Deste modo, as imagens presentes neste subcapítulo estão todas com início em 0,4 segundos e fim em 1 segundo de tempo de simulação, pois neste intervalo de tempo é possível observar apenas o regime permanente em todas, que é o que de facto importa em termos de análise.

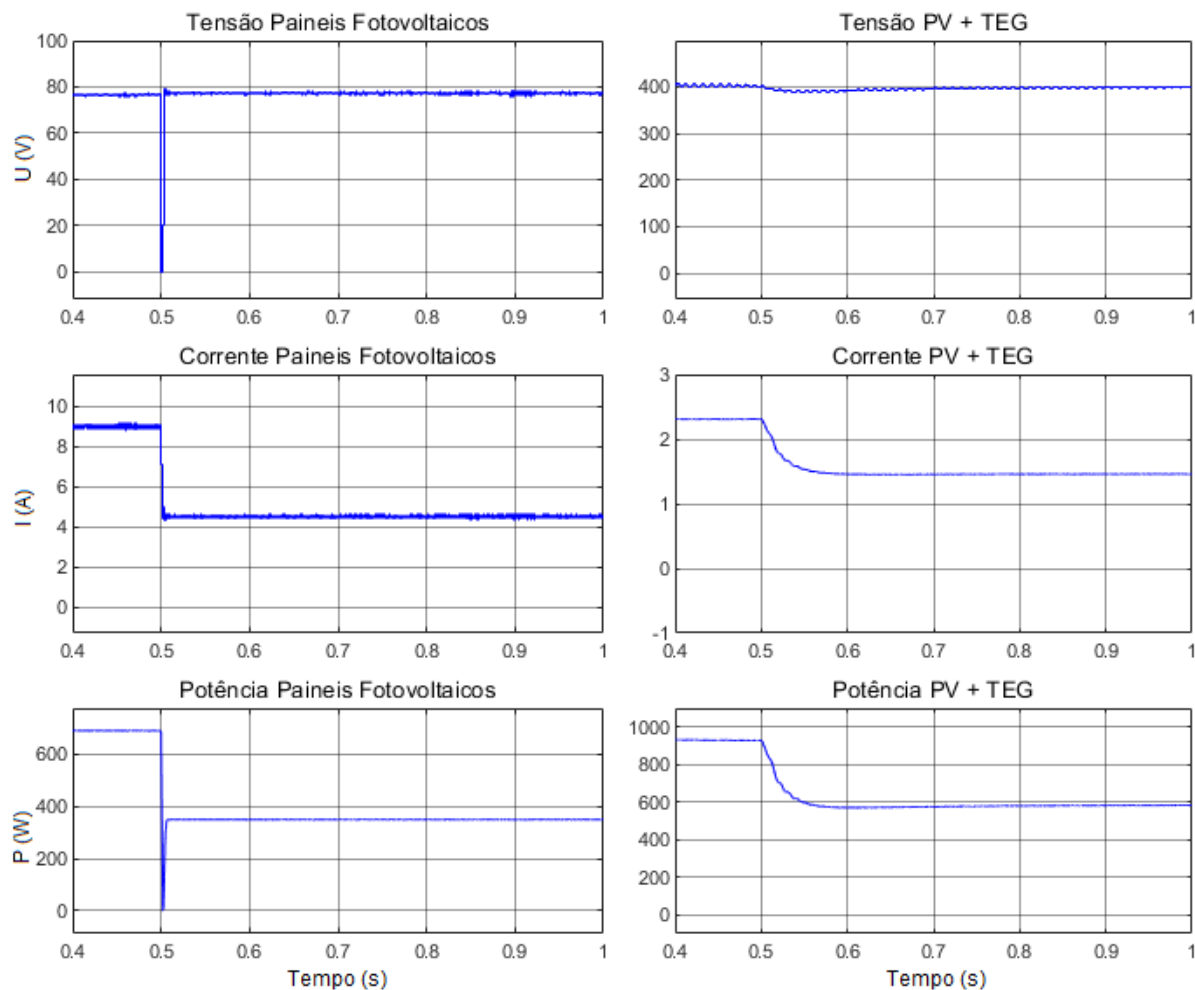


Figura 47: Formas de onda à saída do painel fotovoltaico e do sistema PV-TEG.

Importam analisar as formas de onda da figura acima, daí estarem representadas na dissertação, uma vez que a interligação entre o sistema PV-TEG com o inversor introduz perturbações no funcionamento do painel em regime transitório.

A corrente que vai para o inversor nunca toma valores constantes, é uma corrente impulsiva pois o inversor tem semicondutores que ou colocam o valor correto da corrente, ou colocam o valor zero, uma vez que o inversor tem 3 níveis. Assim, quando a tensão de saída é zero, o inversor não coloca corrente à saída.

Em relação à primeira simulação, as formas de onda da tensão e corrente a injetar na rede, estão representadas na figura (48).

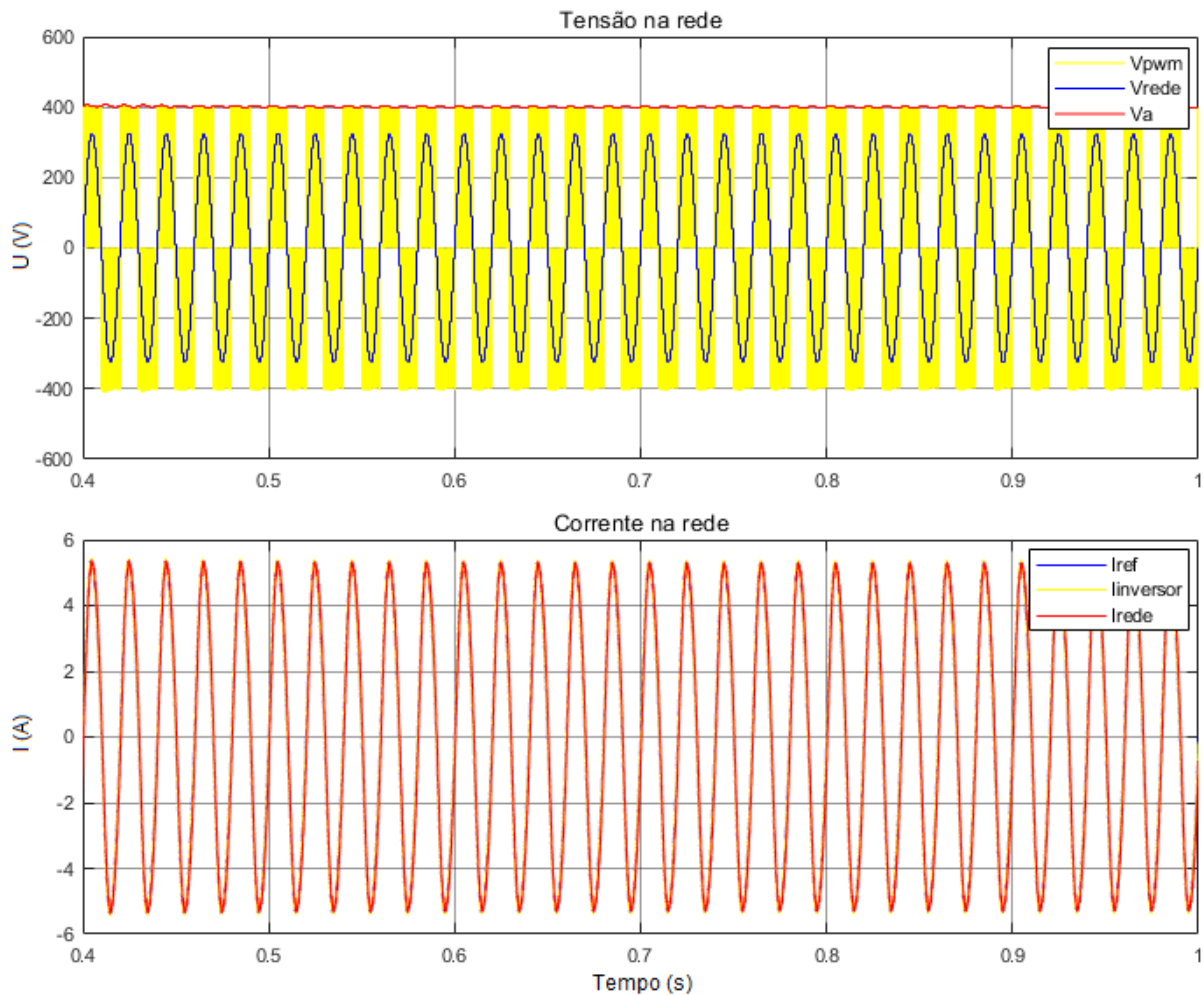


Figura 48: Formas de onda à saída do sistema.

Em termos de rendimento do inversor, é possível comprovar o valor presente na subsecção 4.4.2 de 97,2% a partir da figura (48) uma vez que se sabe que a potência de entrada no inversor é de 924,6W (dois painéis fotovoltaicos de 345W e dois geradores termoelétricos que acrescentam 117,3W cada) e a potência de saída de 897W (valor eficaz da tensão de 230V e valor eficaz da corrente de 3,9A) no caso da irradiância $G = 1000W/m^2$.

Para além da verificação analítica, é também possível efetuar a verificação visual através de comparação de figuras, pois no caso do sistema ideal da figura (46), a corrente é ligeiramente superior à da figura (48), demonstrando que existem perdas no inversor nesta última.

Os resultados da segunda simulação, em que se manteve o sistema conectado apenas à rede elétrica e se efetuou a diminuição para metade da irradiância, estão representados na figura (49).

Note-se que, uma vez mais, representa-se apenas a partir dos 0,4 segundos pois despreza-se o regime transitório do sistema, estando representado o regime estacionário de 0,4 a 0,5 segundos, sendo de seguida efetuada a perturbação na irradiância.

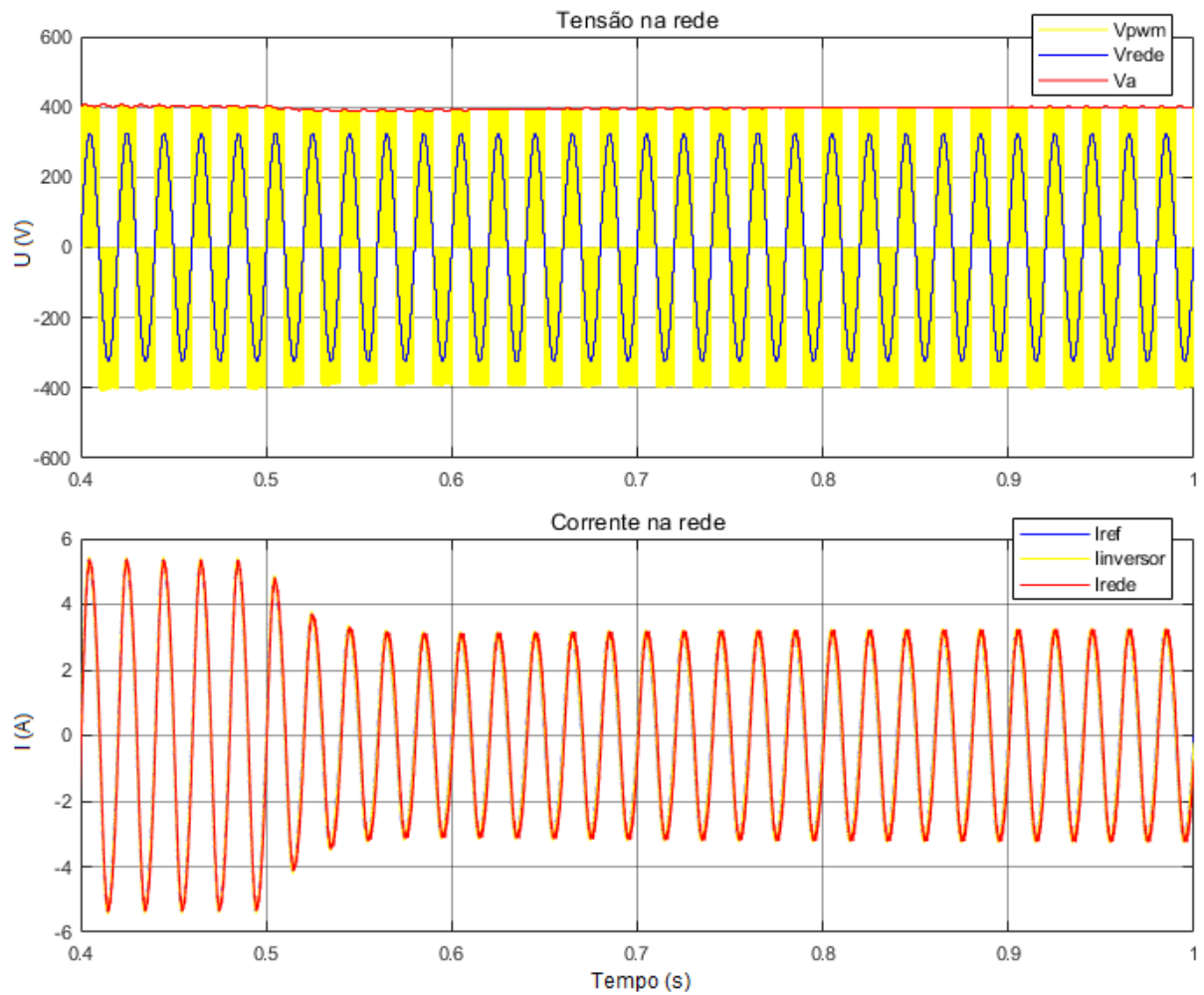


Figura 49: Formas de onda à saída do sistema, perante uma diminuição da irradiância.

Em relação à terceira simulação, foi efetuado o teste sobre se o sistema conseguiria cumprir o propósito de alimentar uma carga doméstica, tendo colocado a resistência de carga em paralelo com a rede.

Deste modo, observou-se as seguintes formas de onda para a tensão e corrente no sistema, representado na figura (50), estando estas formas de onda também representadas a partir dos 0,4 segundos devido ao transitório inicial.

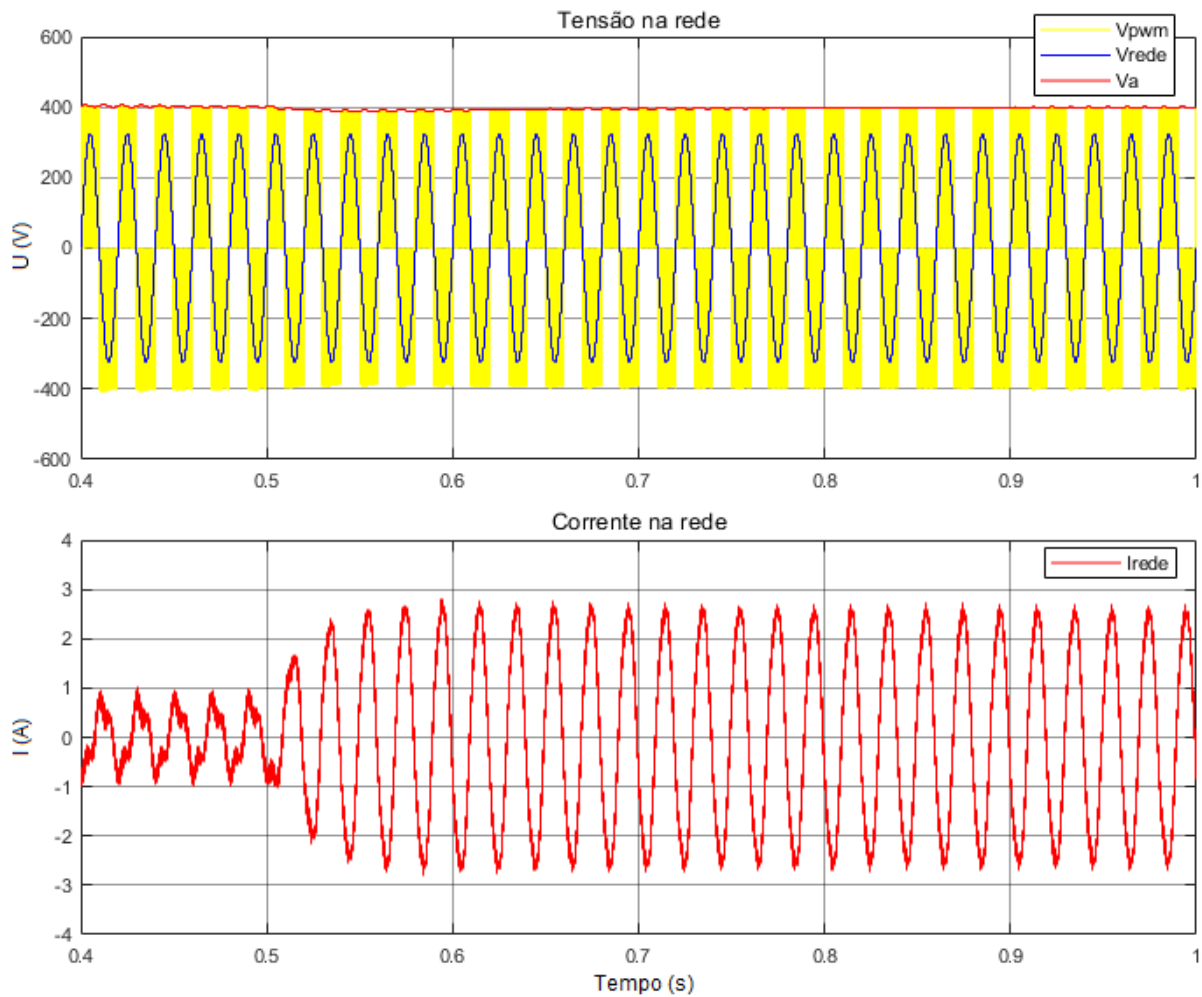


Figura 50: Formas de onda à saída do sistema ao alimentar uma carga perante diminuição da irradiância.

Observa-se que até aos 0,5 segundos, a corrente apresenta um valor muito baixo (pois o painel está sob condições de irradiância máxima) estando assim a alimentar apenas o consumo doméstico, sobrando pouca potência a fluir para a rede.

A partir dos 0,5 segundos, a irradiância diminui para metade, fazendo com que o sistema necessite de recorrer à rede para alimentar a carga (pode observar-se que corrente e tensão estão em anti-fase neste momento, comparando I_{rede} com V_{rede} dos 0,5 segundos até 1 segundo).

Foi necessário por fim, de modo a validar a simulação, testar a situação inversa, sendo que aos 0,5 segundos a irradiância deixa de ser metade e passa a ser máxima, simulando uma hipotética nuvem a deixar de estar por cima do painel. O resultado encontra-se na figura (51).

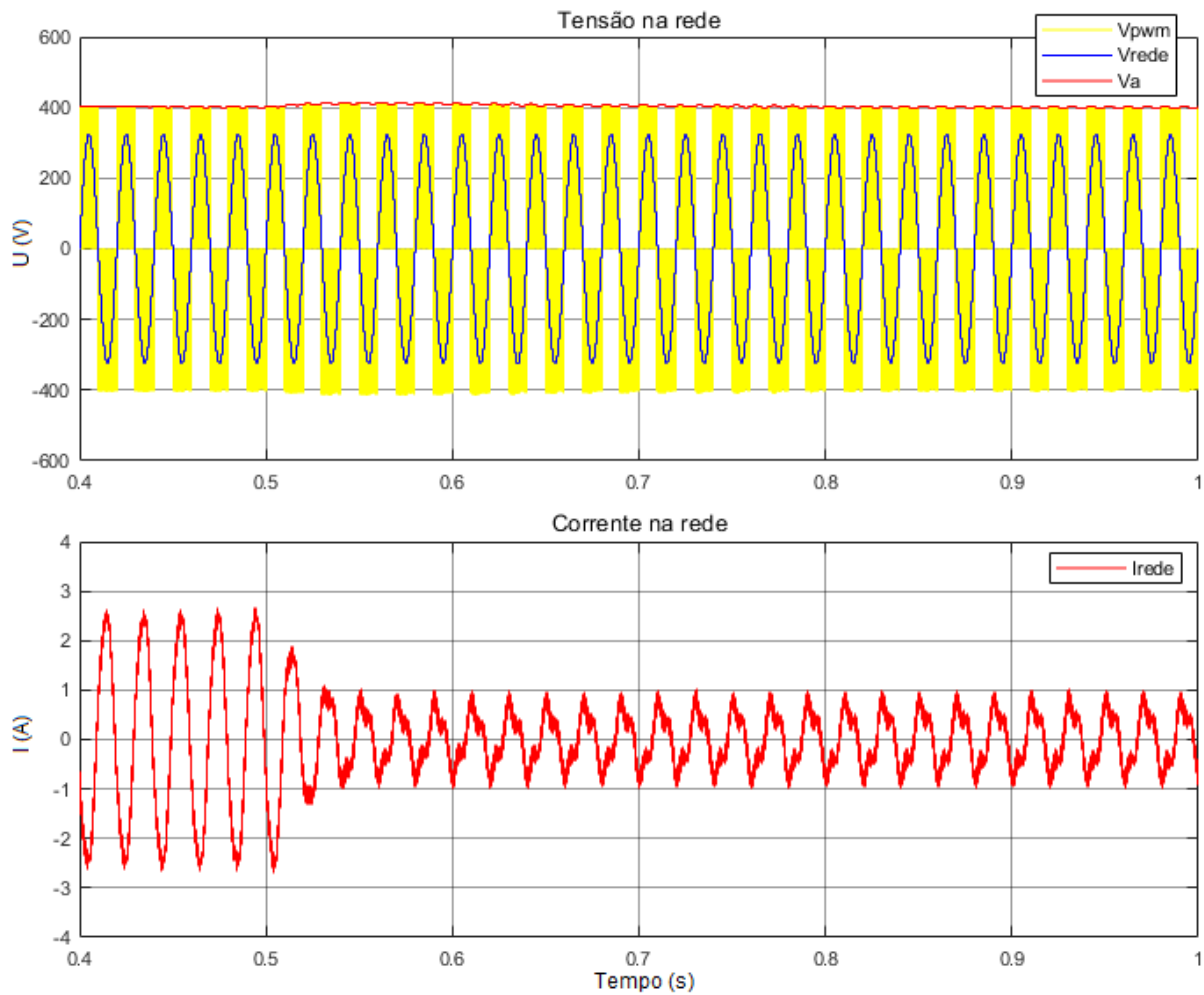


Figura 51: Formas de onda à saída do sistema ao alimentar uma carga perante aumento da irradiância.

As distorções que ocorrem na forma de onda da corrente quando esta tem um valor próximo a zero, prendem-se com o facto de o controlador utilizado ser linear. Este controlador tem como uma das características efetuar um melhor controlo da tensão do que da corrente.

Deste modo, ao estar próximo de zero, existem harmónicas a serem introduzidas da rede para o circuito (de modo a completar a pouca potência que falta para satisfazer a carga, quando se está perante a situação de irradiância $G = 1000W/m^2$).

Para além disto, o controlador de tensão, ao não ter o valor DC constante, irá também contribuir com harmónicas para a distorção da forma de onda da corrente.

Por último, note-se que ao pretender uma resposta rápida do sistema perante variações, o controlador ao permitir esta mesma rapidez, perde qualidade no que diz respeito à distorção das formas de onda.

6 Conclusão

Este capítulo encerra a dissertação, apresentando-se as conclusões acerca de todo o trabalho desenvolvido e quais os possíveis aspetos a melhorar no desenvolvimento desta tecnologia no futuro.

6.1 Conclusões a retirar

Inicialmente, foi efetuada a introdução ao tema, sendo abordados os aspetos teóricos de todos os componentes e subsistemas a utilizar na dissertação. Foi também numa fase inicial que foi focada a importância da recuperação de energia num painel fotovoltaico, devido ao elevado desperdício que este apresenta.

No estudo do sistema foram apresentadas diversas soluções de modo a que se pudesse obter um rendimento energético mais elevado num sistema PV-TEG do que num sistema que fosse apenas composto por painéis fotovoltaicos. Verificou-se que era possível, de facto, obter um aumento do rendimento, mantendo o sistema relativamente económico.

Em termos de modelação do sistema, foram efetuados os cálculos e os dimensionamentos necessários para que o sistema estivesse em equilíbrio e pudesse ser interligado, funcionando como um só na produção e aproveitamento mais eficiente da energia solar e térmica.

Assim, tendo em conta todas estas questões, foram implementados controladores no inversor, de modo a que o sistema pudesse ser viável, quer para se efetuar uma interligação à rede elétrica, quer para a alimentação de uma carga doméstica, mantendo os níveis de tensão exigidos pela rede e pelos equipamentos domésticos.

É de notar que existiram ligeiras diferenças nos valores teóricos calculados com os valores obtidos nas simulações, nomeadamente no que diz respeito ao gerador termoelétrico, em que se obteve uma potência gerada de cerca de 5% a menos do que o esperado. Ainda assim, foi possível validar o modelo e encontrar a solução ideal para implementar o sistema.

A conclusão mais importante a retirar desta dissertação é a de que é de facto possível aumentar o rendimento de um painel fotovoltaico, através da utilização de módulos termoelétricos conectados em paralelo a este, aproveitando o seu calor. Em termos numéricos, o rendimento aumentou de 17,8% (690W) para os painéis escolhidos, para cerca de 23,8% (924,6W) após a implementação do paralelo com os TEGs. Estes valores de rendimento são tendo em conta a área de 2 painéis e a irradiância em condições ideais.

Em termos económicos, apesar de ainda não ser viável, num futuro próximo será, pois há a previsão de uma redução de custos nos materiais que permitem produzir os módulos termoelétricos, tornando-se ainda mais apetecível nessa altura. No entanto, neste momento, já seria um bom investimento pois apesar de ter um custo um pouco superior à utilização de mais painéis, permite manter a mesma área ocupada, o que representa uma grande vantagem, devido a impactos ambientais e de poluição visual.

6.2 Trabalho Futuro

Como futura abordagem ao problema presente nesta dissertação, note-se que esta continua a ser uma área pouco desenvolvida em termos científicos a nível global, sendo portanto interessante do ponto de vista de desenvolvimento tecnológico analisar o que foi tido em conta nesta e as soluções que apresenta.

Assim, recomenda-se a implementação física do sistema, efetuando testes e analisando resultados em condições reais, verificando as possibilidades apresentadas.

Referências

- [1] <https://about.bnef.com/blog/world-reaches-1000gw-wind-solar-keeps-going/>. Consultado em 30-11-2021.
- [2] Castro, R. M. G.: *Introdução à Energia Fotovoltaica*. Maio 2007.
- [3] Pica, C., Munteanu, R., Pavel, S. and Beileu, H.: *Modeling of Photovoltaic Panels*. 10th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2018.
- [4] Elbaset, A., Ali, H., Sattar, M.A.: *Novel seven-parameter model for photovoltaic modules*. July 2014.
- [5] Shahjehan, M., Shahjehan W., Arbab, M. N.: *Grid-Tied PV System with Energy Optimization*. October 2017.
- [6] Wu, H., Jia, Y., Yang, F., Zhu, L. and Xing, Y.: *Two-Stage Isolated Bidirectional DC–AC Converters With Three-Port Converters and Two DC Buses*. IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics, VOL. 8, NO. 4, December 2020.
- [7] Lemos, D. C.: *Algoritmo MPPT para Conversor CC-CC para aplicação em Painéis Fotovoltaicos*. Novembro 2015.
- [8] Soufi, Y., Bechouat M., Kahla S. and Bouallegue K.: *Maximum power point tracking using fuzzy logic control for photovoltaic system*. 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Milwaukee, USA. October 2014.
- [9] M.S. Ait Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras: *Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme*. September 2007.
- [10] Riquelme-Dominguez, J. M. and Sergio, M.: *Comparison of Different Photovoltaic Perturb and Observe Algorithms for Drift Avoidance in Fluctuating Irradiance Conditions*. 2020.
- [11] Anowar, M. H. and Roy, P.: *A Modified Incremental Conductance Based Photovoltaic MPPT Charge Controller*. 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), February 2019.
- [12] Parthasarathy, S. K., Ahmed, K. Z., Alexandrov, B., Kumar, S. and Mukhopadhyay S.: *Energy Efficient Active Cooling of Integrated Circuits Using Autonomous Peltier/Seebeck Mode Switching of a Thermoelectric Module*. 2013.
- [13] Mihalache, S., Flamaropol, I., Dumitru, F.-S., Dobrescu, L. and Dobrescu, D.: *Automated Cooling Control System through Peltier Effect and High Efficiency Control using a DC-DC Buck Converter*. 2015.
- [14] Admasu, B. T. and Luo, X.: *Effects of Thermal Contact Resistance and Thomson Heating on the Outputs of Solar Thermoelectric Power Generation System*. 14th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2013.
- [15] Fraden, J.: *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer, 2010.

-
- [16] Rana, D., Kumar, G. and Gupta, A. R.: *Increasing the Output Power and Efficiency of Solar Panel by Using Concentrator Photovoltaic (CPV) and Low Cost Solar Tracker*. International Conference on "Computational Intelligence and Communication Technology"(CICT 2018).
- [17] H. J. Goldsmith: *Introduction to thermoelectricity*. Springer, 2010.
- [18] A. C. Pinto, R. R. de Lima, C. S. Barbosa, D. M. C. Xavier: *Desenvolvimento de um Multiconversor CC-CC Push-pull de Elevada Potência para Aplicação em Sistemas Fotovoltaicos*. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2010.
- [19] Silva, J. F. A.: *Electrónica Industrial: Semicondutores e Conversores de Potência*. 2013 Fundação Calouste Gulbenkian.
- [20] Pradhan, A. and Panda, B.: *A Simplified Design and Modeling of Boost Converter for Photovoltaic Sytem*. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 8, No. 1, February 2018.
- [21] Daniel W. Hart: *Introduction to Power Electronics*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey USA, 1997.
- [22] Rashid, Muhammad H.: *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*. 2001.
- [23] Xiao, B., Filho, F., Tolbert, L. M.: *Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with Nonactive Power Compensation for Grid-Connected Photovoltaic Generators*. 2010.
- [24] M.C.B. Rodrigues, E.C. Teixeira, H.A.C. Braga.: *Uma visão topológica sobre sistemas fotovoltaicos monofásicos conectados à rede de energia elétrica*. Actas do V Congresso Latino-Americano: Geração e Transmissão de Energia Elétrica (V CLAGTEE), São Pedro, Brasil, 2003.
- [25] Chávez-Urbiola, E. A., Vorobiev, Y. V., Bulat, L.P.: *Solar hybrid systems with thermoelectric generators*. 2011.
- [26] Guiqiang, L., Shittu, S., Zhou, K., Zhao, X., Ma, X.: *Preliminary experiment on a novel photovoltaic-thermoelectric system in summer*. 2019.
- [27] Omair, Z., Scranton, G., Pazos-Outón, L. M., Xiao, T. P., Steiner, M. A., Ganapati, V., Peterson, P. F., Holzrichter, J., Atwater, H., Yablonovitch, E.: *Ultraefficient thermophotovoltaic power conversion by band-edge spectral filtering*. 2019.
- [28] Huen, P., Daoud, W. A.: *Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators*. 2017.
- [29] Kok, S. L., Yun, G. S.: *Optimization of electrical energy harvesting from focused infrared light using thermoelectric module with uniform heat distribution*. 2018.
- [30] Mamur, H., Çoban, Y.: *Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking*. 2019.
- [31] Antonio, R. C., Eugenio, R. G., José, C. A.: *Development and automation of a thermoelectric characterization system*. 2018.
- [32] Kang, F., Park, S., Park, H., Kim, C.: *A novel high performance single-phase 3-level PWM inverter*. 2001.
- [33] Paterakis, F., Marouchos, C. C., Darwish, M.: *Comparison of a PWM Inverter and a Multilevel Inverter using the Switching Function Analysis for Harmonic Content and Efficiency*. 2017.
-

ANEXO A - Código MPPT

```
function D=MPPT(V,v,I,i,d1)

deltaD=0.015; %fator de ciclo
dv=V-v;
di=I-i;

if(dv==0)
    if(di==0)
        D=d1;
    else
        if(di>0)
            D=d1-deltaD;
        else
            D=d1+deltaD;
        end
    end
end

if(di/dv==-(I/V))
    D=d1;
else
    if(di/dv > -I/V)
        D=d1-deltaD;
    else
        D=d1+deltaD;
    end
end

if D>0.99
    D=0.99;
else
    if D<0.75
        D=0.75;
    end
end
end
```

ANEXO B - Catálogo Painel Fotovoltaico



Normal SERIES

HTM 325~345 PA-72

Polycrystalline Silicon PV Modules



ANTI-PID CHARACTERISTICS

Ensure large-scale production polycrystalline modules pass PID test



LOW-LIGHT PERFORMANCE

High-transmittance glass and surface texturing allows for excellent performance in low-light environments



LOAD CAPACITY

Entire module certified to withstand high wind loads (2400 Pascal) and snow loads (5400 Pascal)



HARSH ENVIRONMENT ADAPTATION

High salt mist and ammonia resistance certified by TUV

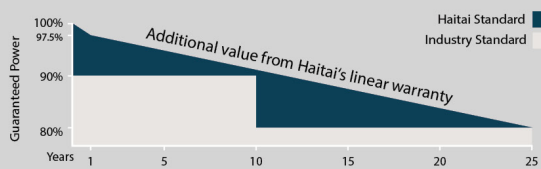


FIREPROOF CAPABILITY

TUV certified fire test

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

12-year product warranty / 25-year linear power warranty



Mechanical Data

Cell Type	156.75×156.75mm Poly
Cell Orientation	72(6×12)
Module Dimensions	1957×992×40mm
Weight	21.5kg
Glass	3.2mm high transmittance, reinforced glass
Backsheet	Anti-aging film
Frame Material	Anodized aluminum alloy
Junction Box	Protection class IP68
Cable	4.0 mm ² positive pole: 1200 mm negative pole: 1200 mm wire length can be customized
Connector	MC4 compatible connector

HTM325~345PA-72

Polycrystalline Silicon PV Modules

Electrical Data (STC)

	325	330	335	340	345
Maximum Power (Pmax/W)	325	330	335	340	345
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	37.24	37.52	37.79	38.04	38.30
Current at Maximum Power (Imp/A)	8.73	8.80	8.87	8.94	9.01
Open Circuit Voltage (Voc/V)	45.60	45.95	46.30	46.65	47.00
Short Circuit Current (Isc/A)	9.23	9.29	9.35	9.41	9.47
Module Efficiency (%)	16.74	17.00	17.26	17.51	17.77

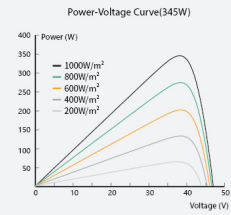
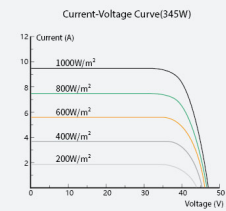
Electrical Data (NMOT)

	240	244	248	252	256
Maximum Power (Pmax/W)	240	244	248	252	256
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	34.79	35.11	35.44	35.75	36.06
Current at Maximum Power (Imp/A)	6.90	6.95	7.00	7.05	7.10
Open Circuit Voltage (Voc/V)	43.15	43.56	43.97	44.38	44.79
Short Circuit Current (Isc/A)	7.29	7.34	7.39	7.44	7.49

STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, AM1.5

NMOT (Nominal Module Operating Temperature): Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, AM1.5, Wind Speed 1m/s.

I-V Curve



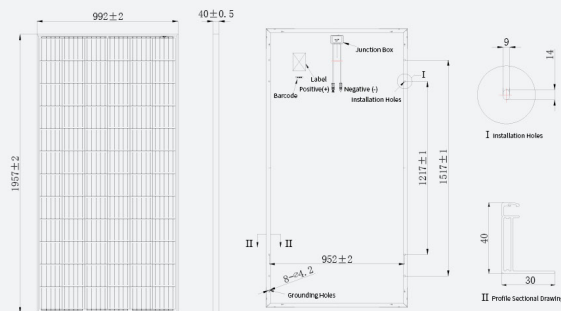
Temperature Coefficients

Temperature Coefficient (Pm)	-0.390 °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.290 °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.050 °C

Operating Parameters

Maximum System Voltage	1000/1500V
Operating Temperature	-40°C ~+85°C
NMOT (Nominal Module Operating Temperature)	41±3°C

Module Dimensions (mm)



Packaging

Modules Per Pallet: 27+27+4 pcs

Modules Per 40'HQ Container: 696 pcs



Tangshan Haitai New Energy Technology Co., Ltd.

Add: No.88, Haomen Road, Yutian County, Tangshan City, Hebei Province, China

Tel: +86-315-5051826 E-mail: ht@htsolargroup.com

Web: www.haitai-solar.com

ANEXO C - Catálogo Módulos Termoeléctricos



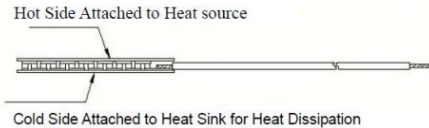
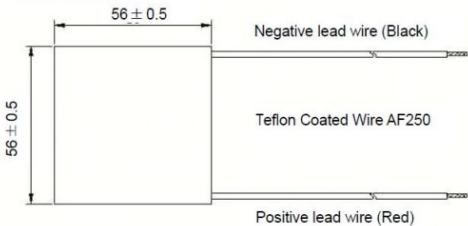
Specifications TEG Module TEG1-12611-6.0



SNAPSHOT SPECIFICATION OF TEG1-12611-6.0

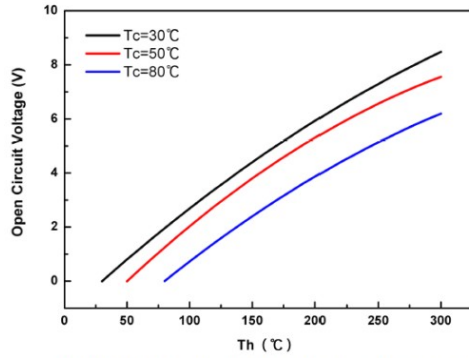
Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	8.4
Matched Load Resistance (ohms)	1.2
Matched load output voltage (V)	4.2
Matched load output current (A)	3.4
Matched load output power (W)	14.6
Heat flow across the module(W)	≈ 365
Heat flow density(Wcm ²)	≈ 11.6
AC Resistance(ohms) Measured under 27°C at 1000Hz	0.5~0.7

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter

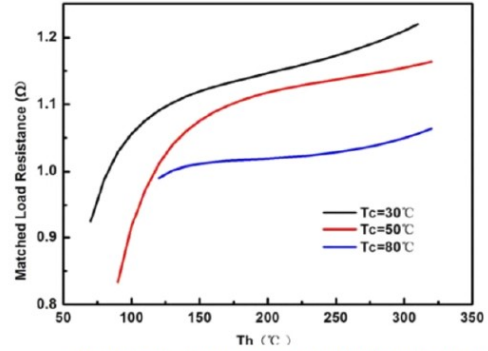




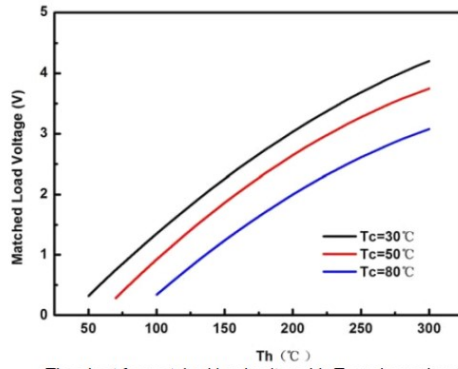
SNAPSHOT SPECIFICATION OF TEG1-12611-6.0



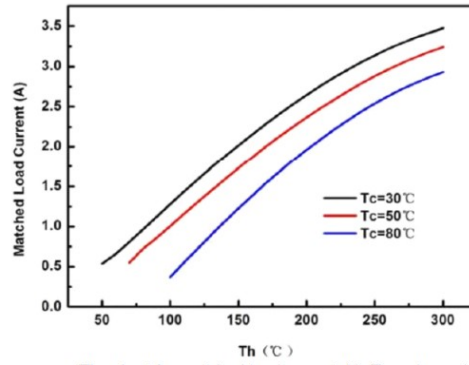
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



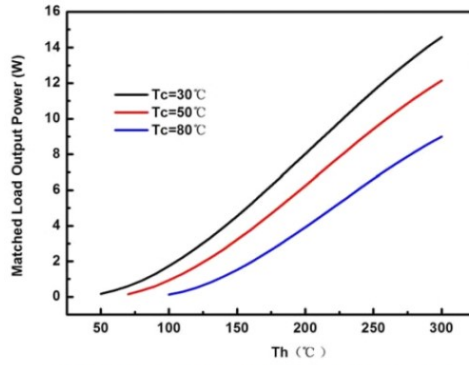
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



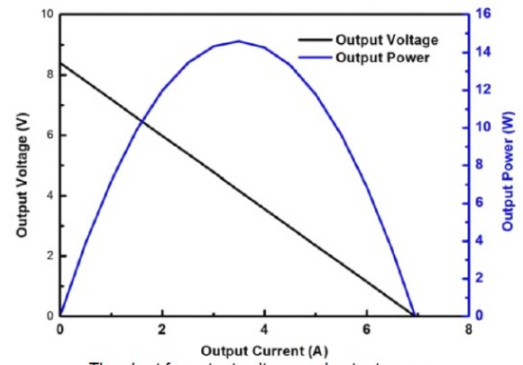
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c



The chart for matched load output power Vs T_h under various T_c



The chart for output voltage and output power Vs output current under $T_h=300^\circ\text{C}$ and $T_c=30^\circ\text{C}$