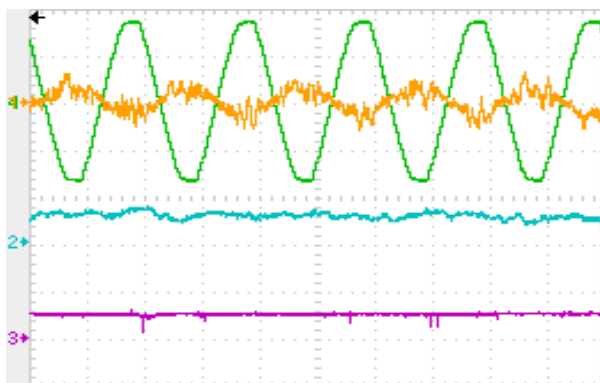




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Seguidor de Potência Máxima para Sistema Fotovoltaico com Conversor Matricial

Miguel Assunção Cardador

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Prof. Paulo José da Costa Branco

Orientador(a): Prof^a. Sónia Maria Nunes dos Santos Paulo Ferreira Pinto

Co-Orientador: Prof. José Fernando Alves da Silva

Vogal: Prof. Joaquim Rodrigues Monteiro

Vogal: Prof. João Carlos Pires de Palma

Junho 2011

Agradecimentos

Gostaria em primeiro lugar de agradecer à Professora Doutora Sónia Ferreira Pinto, por me ter permitido efectuar esta dissertação, agradecer ainda a sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e resolução de questões que foram surgindo. Agradeço ao Professor Doutor Joaquim Monteiro pela sua disponibilidade e ajuda prestada na parte experimental e ao Professor Doutor Fernando Silva pela sua colaboração.

Gostaria de agradecer ao meu pai António Francisco, à minha mãe Olga Cardador, ao meu irmão Bruno Cardador, à minha madrinha e tia Augusta Francisco e aos meus avós, Eliziário Ascensão, Maria Lapa e Zulmira Cardador pelo apoio, carinho e incentivo que me foi dado na realização desta dissertação e ao longo de todo o curso.

Aos meus amigos e colegas por toda amizade, pelos bons momentos passados que me permitiram superar as dificuldades ao longo de todo o curso.

E por último, gostaria ainda de agradecer à minha namorada, Telma André, pela compreensão e apoio.

Resumo

Nos dias de hoje, as energias renováveis têm um papel cada vez mais importante na nossa sociedade, sendo necessários estudos cada vez mais aprofundados, com o propósito de se obterem melhores rendimentos/desempenhos, a custos cada vez mais baixos.

Os painéis fotovoltaicos são uma das opções possíveis de aproveitamento das energias renováveis e neste trabalho propõe-se a ligação de um painel fotovoltaico à rede de energia usando um conversor matricial para a conversão DC-AC. O conversor matricial AC-DC utilizado foi obtido a partir de um conversor matricial AC-AC

Na primeira parte do trabalho efectuou-se um estudo teórico do funcionamento dos painéis fotovoltaicos, tendo-se verificado dependências relativas à radiação solar incidente e à temperatura. Posteriormente, construiu-se um protótipo de painel fotovoltaico e verificou-se que, não sendo o ideal, tem uma boa aproximação da característica V-I para as diferentes radiações.

Com base nos modelos do sistema resultante (painel+conversor+filtros) são efectuadas simulações para várias condições de operação. Realizou-se uma montagem em laboratório com a qual se obtiveram resultados experimentais semelhantes às simulações, tendo sido possível verificar o correcto funcionamento do MPPT. Observaram-se ainda as potências activas e reactivas injectadas na rede, que permitiram verificar o factor de potência quase unitário na ligação à rede eléctrica.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico, conversor matricial, filtros, MPPT, potências e correntes injectadas na rede.

Abstract

Nowadays, the renewable energies have an important role in our lives, a further study is necessary to obtain best performances and more efficiency a low cost.

The photovoltaic panel are one different way to use renewable energies and in this work was proposed to connect a photovoltaic system to electric grid, using an AC-DC matrix converters. The AC-DC matrix converter used was obtained by an AC-AC matrix converters.

On the first part of this work was carried out a theoretical study of the operation of the photovoltaic panels. It was verify that are dependences relative to incident solar radiation and temperature. Furthermore an assembly was carried out, that permits to verify that, not being the ideal, the photovoltaic panel has a good approximation of the V-I characteristic to different radiations.

Based on resultant system models (panel+convertors+filters) were done simulations to different operational conditions. It was carried out a laboratory assembly with which were obtained experimental results similar to the simulations and it was possible to verify the correct operation of the MPPT. It was also observed that the active and reactive power injected on the grid permit to verify the power factor almost unitary on the electric grid connection.

Keywords: photovoltaic panels, matrix converters, filter, MPPT, network injected current, active and reactive power.

Índice

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | V |
| ÍNDICE..... | VII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABELAS | XI |
| SIMBOLOGIA..... | XIII |
| CONSTANTES | XV |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. PAINEL FOTOVOLTAICO | 3 |
| 2.1 MODELO TEÓRICO | 3 |
| 2.2 INFLUÊNCIA DE FACTORES EXTERNOS NO RENDIMENTO DAS CÉLULAS | 5 |
| 2.2.1 <i>Influência da temperatura nas células.....</i> | <i>5</i> |
| 2.2.2 <i>Influência da radiação nas células.....</i> | <i>6</i> |
| 2.2.3 <i>Influência no ponto de máxima potência devido a factores externos.....</i> | <i>7</i> |
| 2.3 CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS R_{SH} E R_S | 8 |
| 2.4 MODELO SIMULADO | 9 |
| 2.5 SIMULADOR DO PAINEL FOTOVOLTAICO | 10 |
| 3. CONVERSOR MATRICIAL | 14 |
| 3.1 CONVERSOR MATRICIAL AC-DC..... | 15 |
| 3.2 CONVERSOR MATRICIAL/INVERSOR DE CORRENTE (CSI)..... | 17 |
| 3.3 FILTRO DE ENTRADA | 18 |
| 3.4 FILTRO DE SAÍDA..... | 22 |
| 4. CONTROLO DO SISTEMA..... | 25 |
| 4.1 SEGUIDOR DA POTÊNCIA MÁXIMA GERADA – MPPT | 25 |
| 4.2 CONTROLO DAS CORRENTES INJECTADAS NA REDE | 28 |
| 4.3 POTÊNCIA INJECTADA NA REDE | 31 |
| 4.4 CONTROLO POR MODO DE DESLIZAMENTO | 32 |
| 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 34 |
| 5.1 SIMULAÇÃO DE PAINEL FOTOVOLTAICO COM SÉRIE DE DÍODOS DE POTÊNCIA | 34 |
| 5.1.1 <i>Comportamento do MPPT/ conversor</i> | <i>37</i> |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 5.2 | SIMULAÇÃO DE PAINEL FOTOVOLTAICO ATRAVÉS DE SIMULADOR (DÍODOS + TRANSISTORES) | 38 |
| 5.2.1 | <i>Variação da radiação solar (fonte de tensão controlada em corrente)</i> | 38 |
| 5.3 | VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO | 43 |
| 6. | CONCLUSÃO | 45 |
| ANEXOS | | 49 |
| | ANEXO A | 51 |
| | ANEXO B | 53 |
| | ANEXO C | 55 |
| | ANEXO D | 57 |
| a. | Painel fotovoltaico | 57 |
| b. | Bloco de controlo | 58 |
| i. | Bloco divisão zonas de Tensão | 59 |
| ii. | Bloco de controlo da potência reactiva | 60 |
| iii. | Bloco MPPT | 61 |
| c. | Controlo do conversor | 62 |
| | ANEXO E | 65 |
| | ANEXO F | 68 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica | 3 |
| Figura 2.2 – Modelo de um painel fotovoltaico com $N_s \times N_p$ células | 4 |
| Figura 2.3 – Características V-I a radiação constante (1000W/m^2) para diferentes temperaturas. ^[6] ... | 6 |
| Figura 2.4 – Característica V-I para diferentes radiações a temperatura constante de 25°C ^[6] | 7 |
| Figura 2.5 – Variação da característica V-I em função de R_s (a) e de R_{sh} (b) | 8 |
| Figura 2.6 – Fluxograma de algoritmo usado no cálculo de R_s e R_{sh} | 8 |
| Figura 2.7 – Esquema equivalente de um painel fotovoltaico (simulação) | 9 |
| Figura 2.8 – Característica V-I para diferentes valores de radiação a temperatura constante | 9 |
| Figura 2.9 - Característica V-I para diferentes valores de temperatura a radiação constante | 10 |
| Figura 2.10 – Esquema de N diodos de potência para simular o painel KC 50T | 10 |
| Figura 2.11 – Esquema (a) e fotografia (b) de montagem de protótipo realizada em laboratório | 11 |
| Figura 2.12 – Característica V-I obtida laboratorialmente com simulador de painel..... | 11 |
| Figura 2.13 – Curva de Potência em função da tensão obtida laboratorialmente | 12 |
| Figura 2.14 – Característica V-I do painel simulado ideal (sem resistências), do painel simulado real (com resistências) e do simulador laboratorial do painel. | 13 |
| Figura 2.15 – Ampliação da característica V-I no local de máxima potência. | 13 |
| Figura 3.1- Conversor matricial trifásico AC-AC | 14 |
| Figura 3.2 – Interruptor bi-direccional..... | 14 |
| Figura 3.3 – Estrutura de um RB-IGBT [9]..... | 15 |
| Figura 3.4 – Esquema do conversor matricial AC-DC | 15 |
| Figura 3.5 – Interruptor unidireccional..... | 17 |
| Figura 3.6 – Inversor de corrente..... | 17 |
| Figura 3.7- Equivalente monofásico do filtro trifásico LC de ligação do conversor matricial à rede eléctrica..... | 18 |
| Figura 3.8 – Representação vectorial das correntes..... | 19 |
| Figura 3.9 - Equivalente monofásico do filtro LC de segunda ordem com amortecimento, de ligação do conversor matricial à rede..... | 19 |
| Figura 3.10 – Diagrama de bode..... | 21 |
| Figura 3.11 – <i>Root locus</i> | 22 |
| Figura 3.12 – Representação do sistema, com o filtro indutivo de ligação do conversor matricial ao painel fotovoltaico..... | 22 |
| Figura 4.1 - Curva de Potência P-V representando o MPP | 25 |
| Figura 4.2 - Divisão da tensão da rede em zonas | 26 |
| Figura 4.3 – Representação dos vectores de corrente (tabela 4.2) e das zonas de tensão | 30 |
| Figura 4.4 – Representação da componente I_d da corrente numa zona fixa (zona 2) | 30 |
| Figura 5.1 – Montagem realizada em laboratório (simplificada) | 34 |
| Figura 5.2 – Tensão composta da rede de 35V (série de 22 diodos) | 35 |
| Figura 5.3 - Simulação da série de díodos nas mesmas condições da Figura 5.2 | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.4 – Tensão composta da rede de 60V (série de 36 diodos) | 36 |
| Figura 5.5 - Simulação do série de diodos nas mesmas condições da Figura 5.4..... | 36 |
| Figura 5.6 – Teste de mppt para (série de 36 diodos) | 37 |
| Figura 5.7 – Simulador do painel (díodo+transístor) com 30V na rede ($G=1000 \text{ W/m}^2$) | 38 |
| Figura 5.8 – Simulador do painel (díodo+transístor) com 30V na rede ($G=846 \text{ W/m}^2$) | 39 |
| Figura 5.9 – Simulador do painel (díodo+transístor) com 30V na rede ($G=700 \text{ W/m}^2$) | 39 |
| Figura 5.10 – Simulador do painel (díodo+transístor) com 30V na rede ($G=540 \text{ W/m}^2$) | 40 |
| Figura 5.11 - Simulação para mesmas condições da figura 5.7..... | 41 |
| Figura 5.12 - Simulação para mesmas condições da figura 5.8..... | 42 |
| Figura 5.13 - Simulação para mesmas condições da figura 5.9..... | 42 |
| Figura 5.14 - Simulação para mesmas condições da figura 5.10..... | 43 |
| Figura 5.15 – Simulador do painel (díodo+transístor) com 40V na rede..... | 43 |
| Figura 5.16 – Simulador (díodo+transístor) com uma tensão na rede de 35V..... | 44 |
| Figura 0.1 – Placa de aquisição de dados..... | 68 |
| Figura D.1 - Esquema para simulação de painel fotovoltaico | 57 |
| Figura D.2 – Blocos de controlo dos semi-condutores..... | 58 |
| Figura D.3 – Bloco para divisão de zonas | 59 |
| Figura D.4 – Divisão das tensões simples e compostas 6 zonas distintas | 59 |
| Figura D.5 – Bloco de controlo da corrente | 60 |
| Figura D.6 - MPPT..... | 61 |
| Figura D.7 – Bloco de junção dos sinais de controlo | 62 |
| Figura E.1 – Característica V-I e curva de potência dos diodos..... | 66 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Valores obtidos para diferentes valores de radiação e temperatura constante | 9 |
| Tabela 2.2 – Valores obtidos para diferentes valores de temperatura e de radiação constante..... | 10 |
| Tabela 3.1– Estados possíveis para um conversor matricial DC-AC..... | 16 |
| Tabela 3.2 – Tensões e correntes obtidas consoante a selecção de interruptores..... | 16 |
| Tabela 3.3 – Valores de dimensionamento do filtro de entrada RLC..... | 21 |
| Tabela 3.4 – Valores de dimensionamento de filtro L_{DC} | 23 |
| Tabela 4.1 – Influência dos vectores de tensão na corrente | 27 |
| Tabela 4.2– Vectores de corrente, consoante os interruptores activos | 29 |
| Tabela 4.3 – Efeito das combinações de ligação do conversor matricial na componente I_q da corrente injectada na rede | 31 |
| Tabela 5.1 – Valores da radiação face à corrente | 40 |
| Tabela 5.2 – Valores teóricos e experimentais..... | 40 |
| Tabela 5.3- Valores de potência para diferente tensão na rede..... | 44 |
| Tabela A.1- Factor n dependente da tecnologia..... | 51 |
| Tabela B.1- Valores obtidos laboratorialmente..... | 53 |
| Tabela C.1 – Estados do conversor matricial AC-AC | 55 |
| Tabela D.1 - Tensões de entrada e respectiva zona de tensão | 60 |
| Tabela D.2 – Conjugação dos sinais S_p e S_q | 62 |
| Tabela D.3 – Sinais de controlo | 63 |
| Tabela E.1 – Tabela com valores experimentais do simulador laboratorial do painel fotovoltaico realizado com ligação em série de diodos de potência..... | 65 |

Simbologia

C – Matriz de Concordia

C_f – Condensador do filtro RLC

f_c – Frequência de corte do filtro

f_s – Frequência de comutação

G – Radiação fotovoltaica

G_{ref} – Radiação fotovoltaica de referência do painel/célula

I – Corrente à saída da célula fotovoltaica

i_A, i_B, i_C – Correntes simples

i_{Cf} – Corrente no condensador do filtro RLC

I_d – Corrente inversa de saturação máxima no diodo

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*

I_L – Corrente gerada pela radiação solar

i_{Lf} – Corrente na bobine do filtro RLC

I_M – Corrente de saída do painel fotovoltaico

i_{mat} – Corrente de entrada do conversor matricial

I_{mp} – Corrente no painel para a qual a potência é máxima

I_o – Corrente inversa máxima de saturação no diodo

I_{sc} – Corrente de curto-circuito de uma célula fotovoltaica

I_{scM} – Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico

I_{sh} – Corrente na resistência *shunt*

K_i – Coeficiente de temperatura da corrente

K_v – Coeficiente de temperatura da tensão

L_{DC} – Bobine do filtro L

L_f – Bobine do filtro de entrada

n – Constante de idealidade do diodo

N_p – Número de células fotovoltaicas em paralelo

N_s – Número de células fotovoltaicas em série

P – Potência no painel

$p(t)$ – Potência activa instantânea
 P_{DC} – Potência no andar DC
 P_{perdas} – Potência perdas na bobine L_{DC}
 $q(t)$ – Potência reactiva instantânea
 RB – IGBT - *Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor*
 R_{DC} – Resistência de perdas da bobine
 r_i – Resistência fictícia
 r_p – Resistência de amortecimento do filtro de entrada
 R_s – Resistência série do painel fotovoltaico
 R_{sh} – Resistência de paralelo (*shunt*) do painel fotovoltaico
S – Matriz de estados do conversor
 S_{ij} – Estado dos interruptores ij do conversor
T – Matriz de Bondel-Park
 T – Temperatura ambiente
 T_{ref} – Temperatura de referência do painel/célula
Trr – Matriz Rotação de Referencial
 V - Tensão aos terminais da célula fotovoltaica
 V_a, V_b, V_c – Tensões simples da rede
 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} – Tensões compostas da rede
 V_{cf} – Tensão no condensador do filtro RLC
 v_i – Tensão à entrada do filtro RLC
 v_{LDC} – Queda de tensão nas bobines
 V_M – Tensão aos terminais do painel fotovoltaico
 v_{mat_DC} – Tensão no conversor lado DC
 V_{mp} – Tensão para a qual a potência é máxima
 V_{ocM} – Tensão aos terminais do painel em circuito aberto
 v_{painel} – Tensão aos terminais do painel
 V_t - Potencial térmico
 Z_f – Impedância do filtro de ligação do conversor matricial à rede eléctrica
 θ – Desfasagem entre tensão e primeira harmónica de corrente da rede

ξ – Constante de amortecimento do filtro do conversor matricial

Constantes

k – Constante de Boltzmann $1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K

q – Carga de um electrão $1.60217653 \times 10^{-19}$ C

1. Introdução

Portugal é um dos países da União Europeia que tem maior possibilidade de aproveitamento da energia solar, tendo perto de 2300 horas/ano na Região Norte e 3000 horas/anos no Algarve. O uso desta forma de energia permite uma redução da importação de energia e do uso de combustíveis fósseis, que além do elevado nível de poluição provocado tendem a esgotar-se. No entanto é necessário ter-se em conta que alguma poluição é afectada à construção dos painéis fotovoltaicos. Os impactos ambientais são superiores na produção, construção e desmantelamento dos painéis, pois estes são construídos com materiais nocivos para a saúde pública.

O efeito fotovoltaico foi descoberto por volta de 1839, tendo sido atribuído a Edmund Becquerel. Contudo, só uma década depois é que apareceriam as primeiras tecnologias fazendo uso desta descoberta. Através das células fotovoltaicas (semicondutores feitos geralmente em Silício) é possível converter radiação solar em energia eléctrica. Cada célula por si só produz uma baixa tensão e baixa corrente, pelo que um painel fotovoltaico será a associação de várias células em série e/ou paralelo. O rendimento de conversão fotovoltaica é relativamente baixo, aproximadamente 15%.

O estudo do conversor matricial iniciou-se na década de 80 com o trabalho de Alesina e Venturini [1]. Ao contrário de outros conversores AC-DC-AC não precisa do andar de armazenamento intermédio DC, não necessitando de um banco de condensadores, que diminuem o tempo de vida útil (limitado pelo número de cargas e descargas do condensador) e as perdas do conversor. Devido à quase inexistência de componentes de armazenamento de energia é possível diminuir perdas, com consequente aumento do rendimento.

O conversor matricial permite ainda obter tensões e correntes quase sinusoidais, com conteúdo harmónico reduzido (as harmónicas mais significativas são de alta frequência e podem ser filtradas), com frequência e factor de potência regulável. Permite o fluxo de corrente em ambos os sentidos, através dos interruptores bidireccionais e apresenta um tamanho reduzido e menor peso do que os conversores convencionais, uma vez que quase não dispõe de componentes de armazenamento de energia (só um pequeno filtro de ligação à rede eléctrica). Contudo não tem só vantagens, pois a inexistência de elementos de armazenamento de energia tornam o conversor mais sensível à poluição na rede AC, nomeadamente à 5ª e 7ª harmónicas de tensão [2]. Além disso, a máxima relação de tensões entrada/saída não ultrapassa os 86% para ondas sinusoidais e requiere mais semicondutores do que os convencionais conversores AC-AC indirectos.[3].

Para garantir a extracção da máxima potência é implementado um algoritmo MPPT (Maximum Point Power Tracking). Existem diferentes tipos de métodos de MPPT, por exemplo, o *P&O* (*Perturb and Observe*) e o *ES* (*extremum seeking control*). O *P&O* é um método de fácil implementação, baseado numa medição constante da corrente e tensão num painel onde se calcula a potência máxima de saída, movendo este ponto em busca do ponto de potência máxima. No entanto este método não é suficientemente robusto, oscilando em torno do MPP para um estado estacionário e por vezes perdendo-se numa mudança brusca da radiação. Para minimizar esses

inconvenientes a partir do *P&O* surgiram outros métodos, entre eles a condutância incremental.

Neste trabalho são construídos dois simuladores de painéis fotovoltaicos e é proposto um sistema de conversão em que o painel é ligado à rede eléctrica através de um conversor matricial, tentando assim obter-se um sistema de conversão com rendimentos mais elevados. O controlador desenvolvido para o conversor matricial deverá garantir não só o MPPT, mas também factor de potência quase unitário na ligação à rede eléctrica de baixa tensão.

Esta dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos, sendo o primeiro a introdução.

No segundo capítulo será efectuado um estudo sobre os painéis fotovoltaicos, onde será analisada a característica V-I e o ponto de potência máxima do painel face a variações de temperatura e radiação. Será efectuado um estudo que permite a representação computacional do painel e será elaborado um simulador laboratorial de um painel fotovoltaico.

No terceiro capítulo é apresentado o conversor matricial trifásico AC-AC e, posteriormente, o conversor matricial DC-AC que permitirá ligar o painel fotovoltaico à rede eléctrica trifásica de baixa tensão. Neste capítulo efectua-se ainda o dimensionamento dos filtros de ligação à rede eléctrica e conversor ao painel.

No quarto capítulo será abordado o controlo do conversor: um controlador que garante a extracção da máxima potência disponível, ou seja, um controlador MPPT (*maximum power point tracker*) e outro controlador que garante potência reactiva nula na ligação à rede eléctrica.

No quinto capítulo serão analisadas os resultados experimentais e comparados com as simulações efectuadas em *matlab simulink*.

No sexto capítulo serão apresentadas as conclusões gerais de toda a dissertação, onde serão sugeridas algumas melhorias a efectuar em dissertações futuras.

2. Painei Fotovoltaico

2.1 Modelo teórico

Ao longo dos anos têm sido estudados e propostos vários modelos que permitam a simulação computacional das células fotovoltaicas.

Uma possível modelação de uma célula fotovoltaica pode ser obtida pelo esquema da figura 2.1, onde a fonte de corrente permite simular a radiação incidente, que é proporcional à intensidade de corrente I_L . Esta fonte é ligada em paralelo com um diodo (D) e uma resistência *shunt* (R_{sh}) que representa a corrente de fuga para terra. As perdas internas devido ao fluxo de corrente e da ligação entre células são representadas por uma pequena resistência em série (R_s).[4]

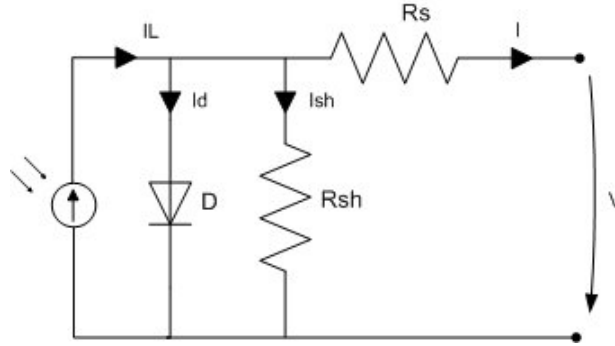


Figura 2.1 - Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica

De acordo com o modelo apresentado na figura 2.1, a corrente fornecida pela célula fotovoltaica é dada por (2.1):

$$I_L = I_d + I + I_{sh} \quad (2.1)$$

A corrente I_{sh} é dada por (2.2)

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

A corrente do diodo, I_d é dada por (2.3), onde q é a carga de um electrão, k é a constante de Boltzmann, n a constante de idealidade do diodo (tabela A.1), T a temperatura e I_0 a corrente inversa do diodo.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V + R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Substituindo (2.2) e (2.3) em (2.1) obtém-se (2.4):

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V + R_s I)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Resolvendo (2.4) em ordem a R_{sh} , obtém-se a resistência paralelo equivalente do painel dada pela equação (2.5) [4]. Onde I_{mp} e V_{mp} são respectivamente a corrente e tensão para as quais a potência é máxima.

$$R_{sh} = \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{I_{mp} - I_L + I_o \left(e^{\frac{q(V_{mp} + R_s I_{mp})}{nkTN_s}} \right)} \quad (2.5)$$

Os valores de tensão e/ou corrente obtidos a partir de uma única célula são geralmente baixos, pelo que é usual a utilização de associações de N células equivalentes em série (N_s) e N células em paralelo (N_p), possibilitando obter a tensão e/ou corrente desejada, uma vez que a corrente varia com a associação de células em paralelo e a tensão com a associação de células em série.

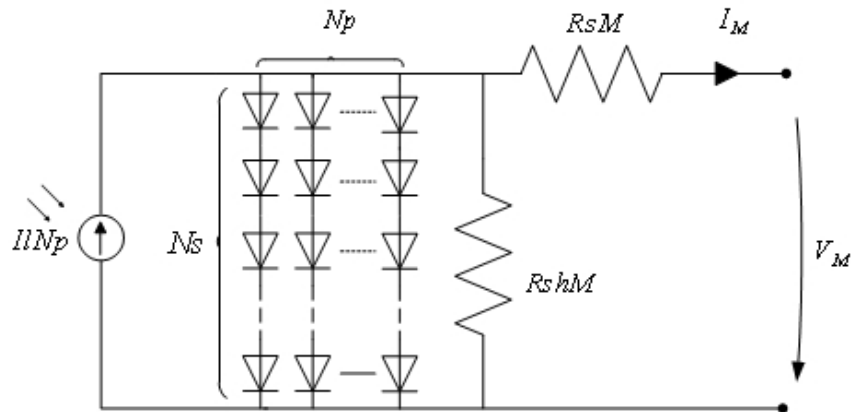


Figura 2.2 – Modelo de um painel fotovoltaico com $N_s \times N_p$ células

Sendo um painel fotovoltaico uma matriz de células equivalentes ($N_s \times N_p$) (figura 2.2) as correntes e tensões do painel são dadas por (2.6), onde M representa as grandezas relativas painel fotovoltaico (conjunto células) e as grandezas sem M representam apenas uma célula.

$$\begin{aligned} I_M &= N_p I \\ I_{SCM} &= N_p I_{SC} \\ V_M &= N_s V \\ V_{ocM} &= N_s V_{oc} \end{aligned} \quad (2.6)$$

As resistências série e paralelo do painel são dadas por (2.7):

$$\begin{aligned} R_{shM} &= \frac{N_s}{N_p} R_{sh} \\ R_{sM} &= \frac{N_s}{N_p} R_s \end{aligned} \quad (2.7)$$

Das equações (2.4) e (2.6) obtêm-se a equação equivalente (2.8) de um painel fotovoltaico permitindo assim a obtenção da característica V-I ($I_{LM} = I_{scM}$).

$$I_M = I_{LM} - N_p I_o \left[\exp \left(\frac{q \left(V_M + R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) I_M \right)}{N_s n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_M + R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) I_M}{R_{sh} \left(\frac{N_s}{N_p} \right)} \quad (2.8)$$

2.2 Influência de factores externos no rendimento das células

As características eléctricas dos painéis fotovoltaicos são fornecidas aos utilizadores/consumidores finais para uma determinada radiação e temperatura de referência (geralmente para uma temperatura de 25°C e uma radiação de 1000W/m²). No entanto, os valores nominais das características eléctricas de um painel variam consoante as diferentes condições de funcionamento. A variação destas características provoca alguns problemas, pois ao efectuar-se a instalação de um sistema fotovoltaico é importante que este funcione em pleno, de modo a rentabilizar-se o investimento o mais rápido possível (fornecer em energia o valor monetário que permitirá pagar a compra e a construção de infra-estruturas de suporte), pelo que será necessário estudar-se o comportamento das características dos painéis fotovoltaicos face às condições externas (temperatura e radiação).

A corrente de curto-circuito (I_{sc}) é proporcional à radiação e tem um coeficiente de temperatura (K_i) positivo. A tensão de circuito aberto (V_{oc}) tem um coeficiente de temperatura (K_v) negativo e depende logaritmicamente da radiação [5]. Os valores dos coeficientes de temperatura são fornecidos nos catálogos do painel [4].

2.2.1 Influência da temperatura nas células

Os materiais usados no fabrico das células fotovoltaicas, desde os cristais aos semicondutores são sensíveis à temperatura. Quando a célula se encontra exposta a temperaturas elevadas, a corrente de curto-circuito aumenta (2.9) e a tensão em circuito aberto diminui (2.10).

$$I_L(T) = I_L(T_{ref}) + K_i(T - T_{ref}) \quad (2.9)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_{ref}) + K_v(T - T_{ref}) \quad (2.10)$$

A figura 2.3 permite ilustrar a situação descrita anteriormente, onde se efectua a variação da temperatura para uma radiação fixa. Pode observar-se que a tensão em vazio sofre uma variação mais acentuada do que a corrente de curto-circuito, que tem uma pequena variação.

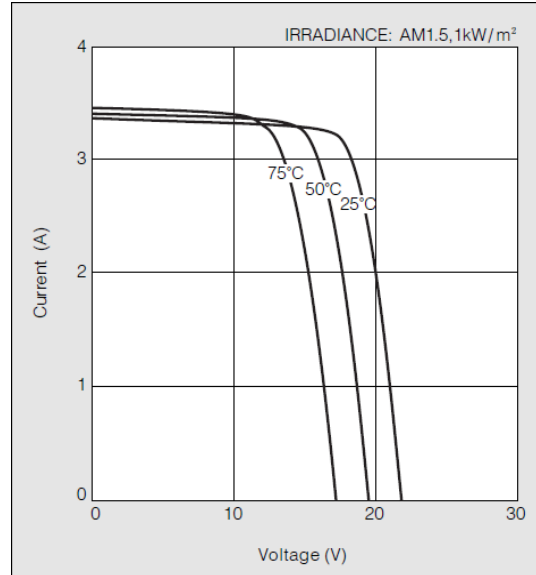


Figura 2.3 – Características V-I a radiação constante (1000W/m^2) para diferentes temperaturas. [6]

2.2.2 Influência da radiação nas células

Os painéis fotovoltaicos devem ser colocados de modo a que a radiação recebida seja máxima.

A radiação depende essencialmente das condições atmosféricas e do posicionamento geográfico, dependendo fortemente da orientação e do ângulo de inclinação do painel [5]. Por isso, é importante que se conheça com exactidão a radiação do local de instalação dos painéis, garantindo ainda que estes sejam instalados de modo a que a radiação recebida seja máxima.

$$I_L(T) = I_{L_{Gref}}(T) \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.11)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc_{Gref}}(T) + V_t \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (2.12)$$

Pela figura 2.4 é possível observar-se a forte dependência da corrente de curto-circuito (I_L) (2.11) a e pequena variação da tensão em circuito aberto (V_{oc}) (2.12), face aos diferentes valores de radiação.

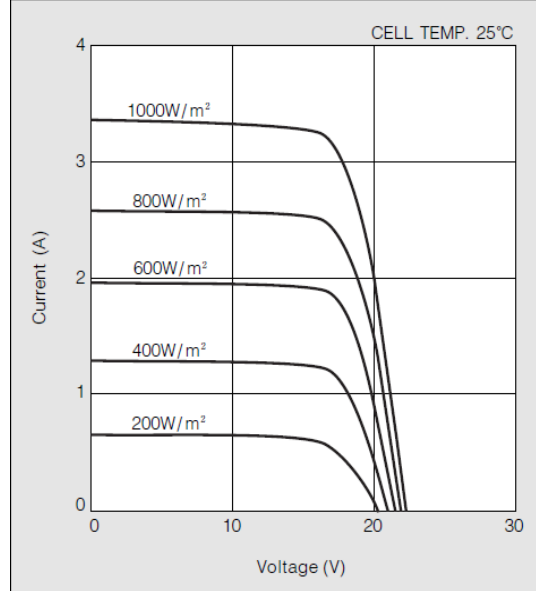


Figura 2.4 – Característica V-I para diferentes radiações a temperatura constante de 25°C^[6]

2.2.3 Influência no ponto de máxima potência devido a factores externos

A radiação e a temperatura influenciam tanto os valores de corrente como os valores de tensão, sendo a potência fornecida pelo painel por (2.13),

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (2.13)$$

É de notar que a potência vai sofrer variações, nomeadamente com a temperatura, sendo a tensão (V_{mp}) e corrente (I_{mp}) no ponto de potência máxima dadas por (2.14) e (2.15) .

$$V_{mp} = V_{mp}(T_{ref}) + \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) V_t + K_v(T - T_{ref}) \quad (2.14)$$

$$I_{mp} = (I_{mp}(T_{ref}) + K_i(T - T_{ref})) \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.15)$$

2.3 Cálculo das Resistências R_{sh} e R_s

Para possibilitar uma reprodução aproximada de uma célula fotovoltaica é importante que se efectue uma estimativa dos valores de R_{sh} e R_s . A resistência R_s tem efeito na característica I-V próxima das condições de circuito aberto, sendo que a resistência R_{sh} tem maior influência na tensão de potência máxima.

A partir de (2.5) (resistência *shunt*) foi desenvolvido um modelo de simulação em *matlab/simulink* fazendo variar os valores da resistência em série de modo a que o valor da potência seja o mais exacto possível.

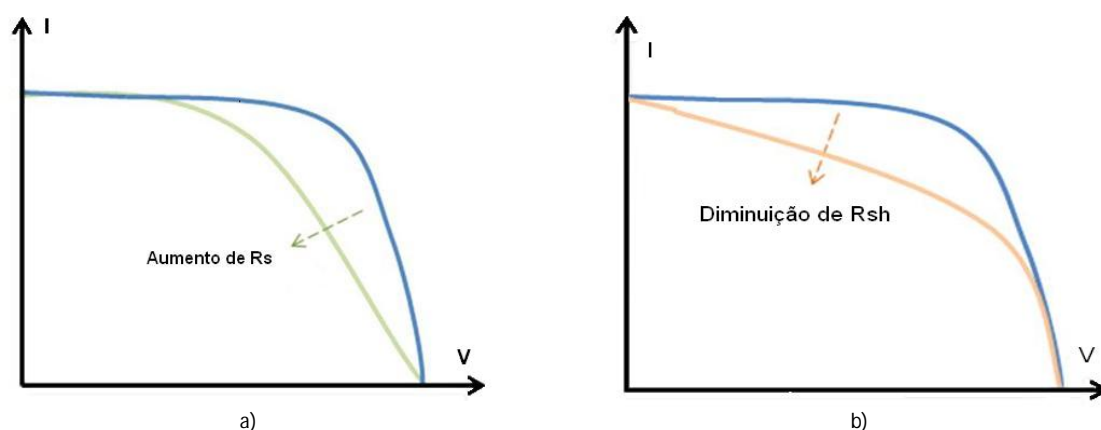


Figura 2.5 – Variação da característica V-I em função de R_s (a) e de R_{sh} (b)

As etapas principais do programa estão descritas na figura 2.6.

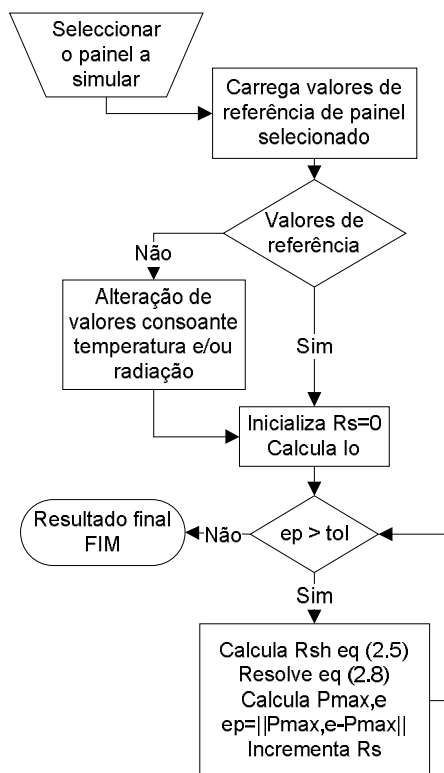


Figura 2.6 – Fluxograma de algoritmo usado no cálculo de R_s e R_{sh}

2.4 Modelo simulado

A simulação do esquema equivalente do painel fotovoltaico com a contabilização das resistências torna este modelo mais aproximado aos painéis usados, uma vez que considera algumas perdas provocadas pela dissipação de energia através de resistências internas, que no modelo ideal ($R_{sh}=\infty$ e $R_s=0$) não são contabilizadas.

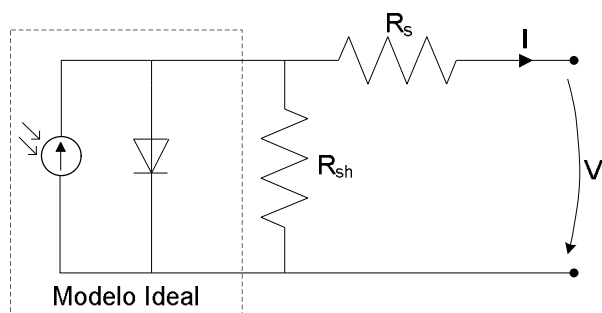


Figura 2.7 – Esquema equivalente de um painel fotovoltaico (simulação)

A resistência paralela R_{sh} varia segundo a equação (2.5): ao variar-se a radiação, esta influencia a tensão e corrente de acordo com (2.14) e (2.15), originando a variação do ponto de potência máximo, pelo que o declive das rectas será influenciado (variação das resistência série e paralelo).

Tabela 2.1 – Valores obtidos para diferentes valores de radiação e temperatura constante

| Temperatura 25°C | | | | | |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Radiação [W/m ²] | 1000 | 800 | 600 | 400 | 200 |
| R_s [Ω] | $3,0 \times 10^{-1}$ | $3,7 \times 10^{-1}$ | $5,0 \times 10^{-1}$ | $7,3 \times 10^{-1}$ | 1,45 |
| R_{sh} [Ω] | $7,7 \times 10^3$ | $7,3 \times 10^3$ | $1,6 \times 10^4$ | $7,1 \times 10^3$ | $7,8 \times 10^3$ |
| Potência [W] | 54,11 | 42,62 | 31,32 | 20,27 | 9,61 |
| I_{sc} [A] | 3,11 | 2,65 | 1,99 | 1,32 | 0,66 |
| V_{oc} [V] | 21,70 | 21,43 | 21,09 | 20,60 | 19,76 |

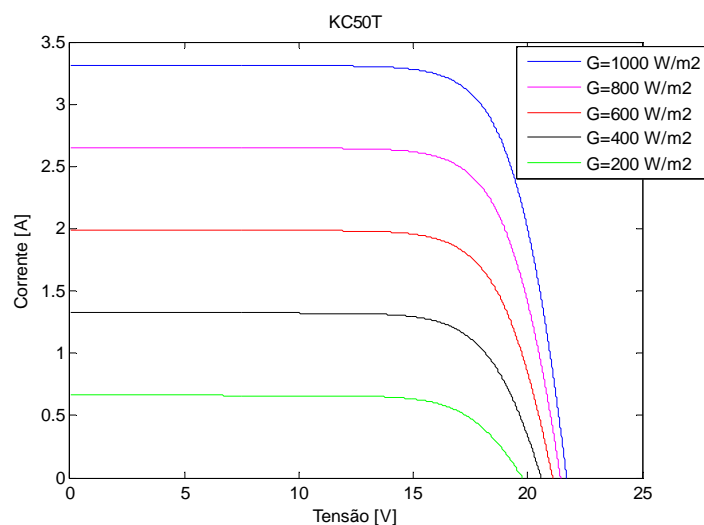


Figura 2.8 – Característica V-I para diferentes valores de radiação a temperatura constante

Variando da temperatura, os valores de referência do painel também vão sofrer alterações. A corrente de curto-circuito varia com (2.9) e a tensão em vazio varia com (2.10), tendo-se obtido pelo programa de simulação os valores das resistências (tabela 2.2 e figura 2.9).

Tabela 2.2 – Valores obtidos para diferentes valores de temperatura e de radiação constante

| Radiação 1000 W/m ² | | | |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Temperatura [°C] | 75 | 50 | 25 |
| R_s [Ω] | $1,2 \times 10^{-1}$ | $2,0 \times 10^{-1}$ | $3,0 \times 10^{-1}$ |
| R_{sh} [Ω] | $6,2 \times 10^2$ | $2,0 \times 10^3$ | $7,7 \times 10^3$ |
| Potência [W] | 42,23 | 48,24 | 54,11 |
| I_{sc} [A] | 3,38 | 3,34 | 3,31 |
| V_{oc} [V] | 17,60 | 19,65 | 21,7 |

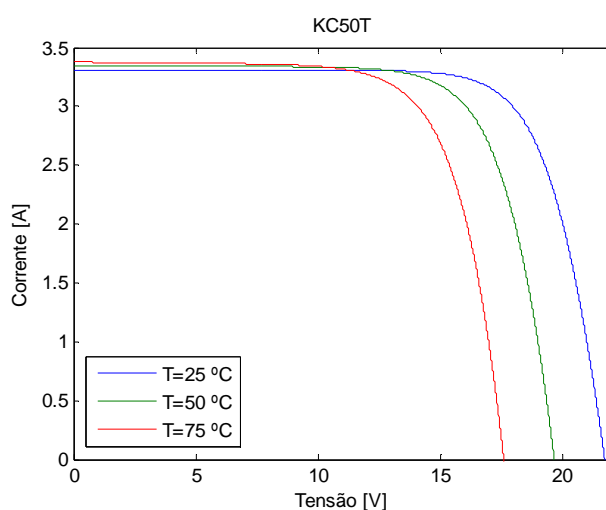


Figura 2.9 - Característica V-I para diferentes valores de temperatura a radiação constante

2.5 Simulador do painel fotovoltaico

Partindo do esquema ideal (figura 2.1), é possível a realização de um simulador de painel fotovoltaico (figura 2.10), usando uma fonte de corrente controlada de modo a simular a radiação e N diodos em série de modo a obter-se a tensão V_{oc} desejada. Devido ao comportamento ôhmico dos diodos, a resistência em série pode ser suprimida. Considerou-se como uma boa aproximação ao modelo catalogado (KC50T [6]) uma resistência paralelo de 200 Ω .

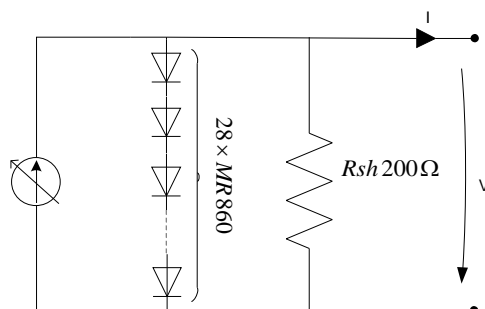


Figura 2.10 – Esquema de N diodos de potência para simular o painel KC 50T

No esquema da figura 2.10 seria necessário o uso de dissipadores nos diodos de potência, o que originaria uma montagem de dimensões aceitáveis. Para tornar a realização do circuito mais simples e evitar os efeitos da temperatura efectuou-se também a montagem da figura 2.11, em que se usou uma cadeia de diodos ligados do colector à base de um transístor, permitindo assim a redução da corrente que passa nestes, não sendo necessário o uso de díodos de potência e respectivos dissipadores que iriam ocupar uma grande área **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

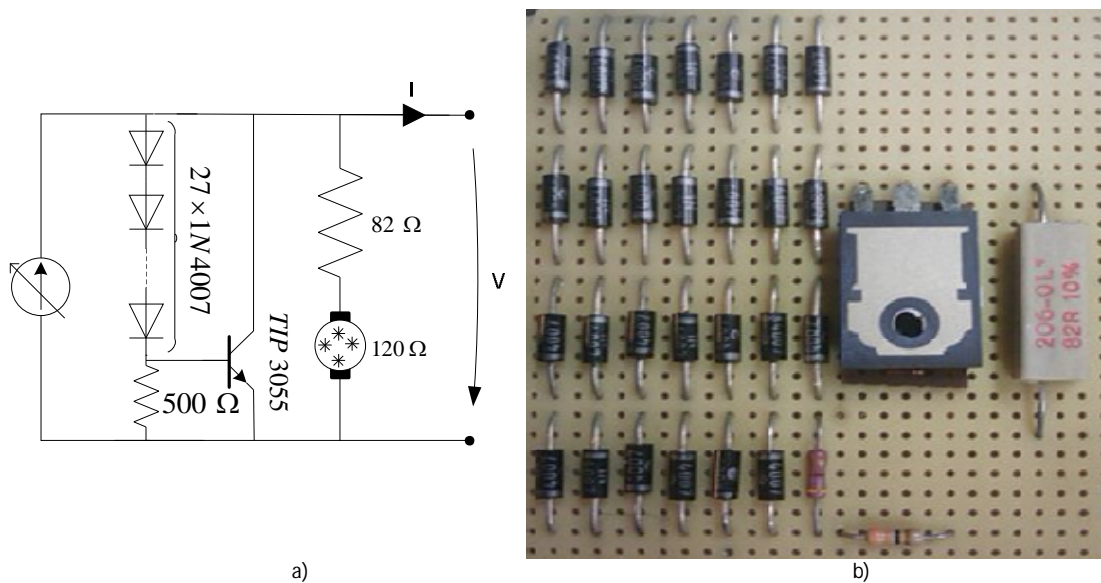


Figura 2.11 – Esquema (a) e fotografia (b) de montagem de protótipo realizada em laboratório

Efectuando-se a variação da carga aos terminais do protótipo e uma fonte de tensão controlada em corrente ligada à entrada, obteve-se a característica V-I do modelo.

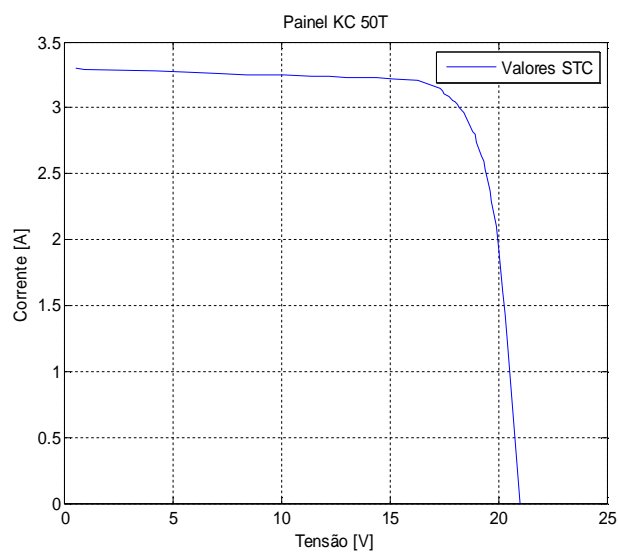


Figura 2.12 – Característica V-I obtida laboratorialmente com simulador de painel

Quando comparada a característica V-I experimental com a característica do painel Kyocera do modelo KC 50 T, constata-se que existe uma diferença nos valores quando a tensão tende para o seu valor máximo, ou seja, o valor em vazio. Obteve-se no laboratório um valor de V_{oc} de 21V enquanto que o valor catalogado é de 21,7V (erro de 3%).

Com os valores de tensão e corrente obtidos em laboratório e através de (2.16) calculou-se os valores da potência (anexo B), obtendo-se a figura 2.13.

$$P_{DC} = I_{DC} V_{DC} \quad (2.16)$$

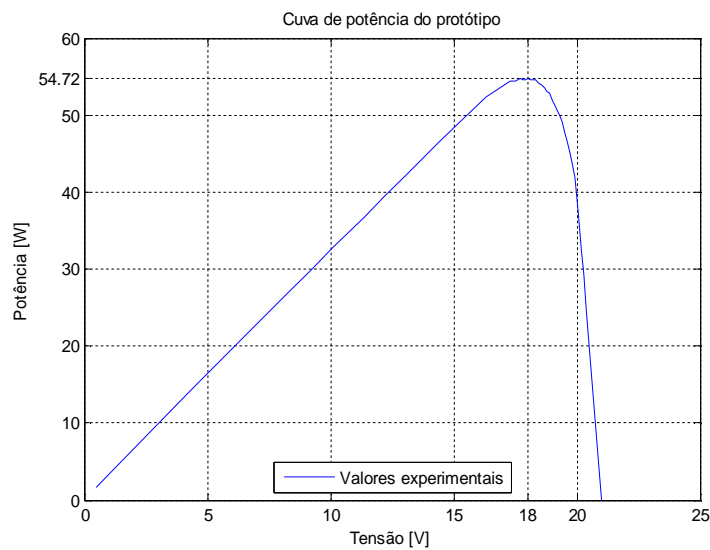


Figura 2.13 – Curva de Potência em função da tensão obtida laboratorialmente

O MPP (*maximum power point*) obtido no simulador do painel fotovoltaico é de 54,72 W que, comparando com o valor catalogado de 54 W apresenta um erro relativo de 1.5%

De modo a comparar resultados de simulação com resultados experimentais, efectuou-se uma simulação que permite a comparação das características V-I do painel ideal (sem resistências), do painel simulado (com resistências) e do simulador de painel construído em laboratório (figura 2.11).

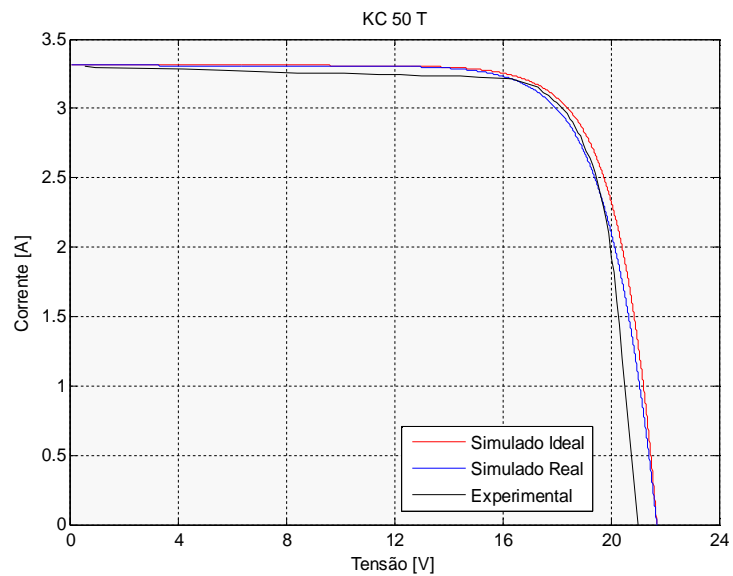


Figura 2.14 – Característica V-I do painel simulado ideal (sem resistências), do painel simulado real (com resistências) e do simulador laboratorial do painel.

Pode-se observar (figura 2.15) que a característica V-I simulada com as resistências e a experimental têm o ponto de potência máximo muito próximo.

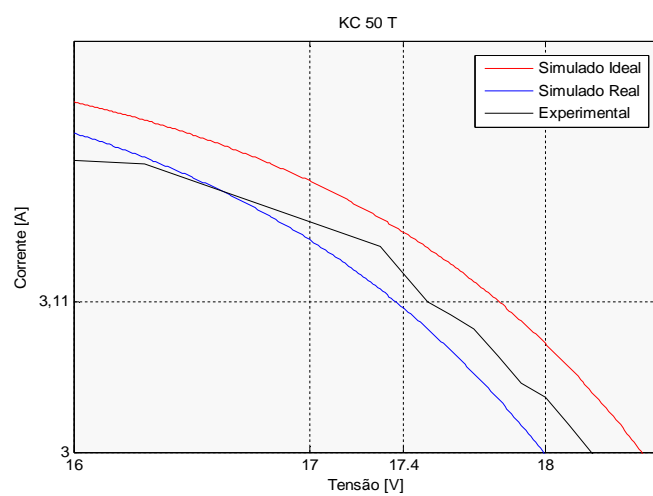


Figura 2.15 – Ampliação da característica V-I no local de máxima potência.

3. Conversor Matricial

O conversor matricial permite efectuar a conversão directa AC-AC (figura 3.1) e embora teoricamente seja possível ter 512 (2^9) diferentes estados de comutação, no entanto não se podem obter todos estes estados, devido às restrições topológicas:

- As tensões do lado da rede de energia eléctrica não podem ser curto-circuitadas;
- As correntes indutivas de carga/do painel não devem ser interrompidas, necessitando sempre de um caminho alternativo de modo a permitir assim a sua continuidade.

Com a aplicação das duas condições referidas o conversor matricial AC-AC fica limitado a 27 estados possíveis [3], que se encontram descritos no anexo C.

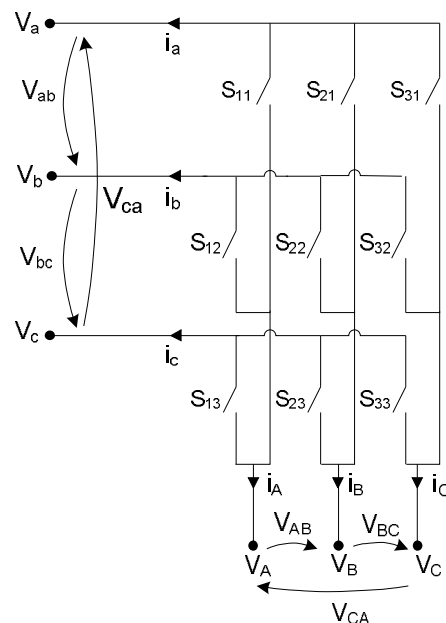


Figura 3.1- Conversor matricial trifásico AC-AC

Os interruptores bidireccionais do conversor matricial devem ser capazes de conduzir corrente e suportar tensão com diferentes polaridades, contudo ainda não é possível garantir essa funcionalidade num único dispositivo semiconductor, pelo que é necessário recorrer a uma associação de semicondutores, geralmente constituída por 2 transístores IGBT e 2 díodos (figura 3.2).

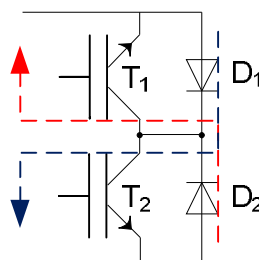


Figura 3.2 – Interruptor bi-direccional

Recentemente surgiram os RB-IGBT que conseguem bloquear tensões directas e inversas, dispensando a utilização de diodos no conversor matricial, uma vez que cada “interruptor bidireccional” pode ser fisicamente realizado pela ligação em antiparalelo de dois RB-IGBT. Desta forma será possível reduzir o número de semicondutores do conversor, resultando em menores perdas de condução.

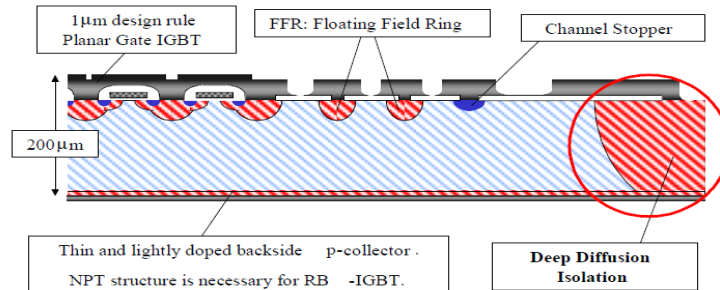


Figura 3.3 – Estrutura de um RB-IGBT [9].

3.1 Conversor Matricial AC-DC

Uma vez que o painel fotovoltaico funciona em corrente contínua, o terceiro braço do conversor deixa de ser necessário, resultando no conversor AC-DC representado na figura 3.4. Deste modo, as 27 combinações possíveis do conversor matricial (AC-AC) trifásico são reduzidas para apenas 9 no conversor AC-DC.

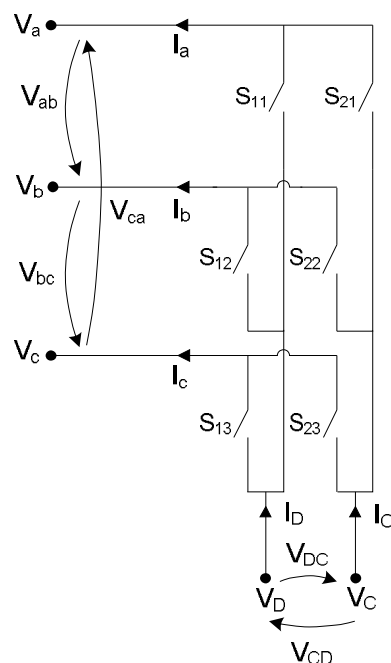


Figura 3.4 — Esquema do conversor matricial AC-DC

Os interruptores ideais da figura 3.4 podem ser representados pela matriz (3.1), em que cada elemento pode tomar o valor 0 ou 1, de acordo com o estado de corte ou de condução dos semicondutores (0 quando estão OFF e 1 quando estão ON).

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Uma vez que as fases do lado da rede eléctrica não se podem curto-circuitar e tem de ser garantida a continuidade da corrente do lado DC, os estados possíveis de ligação dos interruptores são apresentados na tabela 3.1

Tabela 3.1– Estados possíveis para um conversor matricial DC-AC

| Estado | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{21} | S_{22} | S_{23} |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

As relações entre as tensões da rede e do painel serão dadas por (3.2):

$$\begin{bmatrix} V_D \\ V_C \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A relação das correntes de entrada/saída é dada pela equação (3.3)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \mathbf{S}^T \begin{bmatrix} I_D \\ I_C \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Através da equação (3.1), (3.2) e (3.3) e com o auxílio da tabela 3.1 é possível obter a tabela 3.2 [10].

Tabela 3.2 – Tensões e correntes obtidas consoante a selecção de interruptores

| Estado | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{21} | S_{22} | S_{23} | V_D | V_C | V_{DC} | I_a | I_b | I_c |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | V_a | V_b | V_{ab} | I_{DC} | $-I_{DC}$ | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | V_b | V_a | $-V_{ab}$ | $-I_{DC}$ | I_{DC} | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | V_b | V_c | V_{bc} | 0 | I_{DC} | $-I_{DC}$ |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | V_c | V_b | $-V_{bc}$ | 0 | $-I_{DC}$ | I_{DC} |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | V_a | V_c | $-V_{ca}$ | $-I_{DC}$ | 0 | I_{DC} |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | V_c | V_a | V_{ca} | $-I_{DC}$ | 0 | $-I_{DC}$ |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | V_a | V_a | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | V_b | V_b | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | V_c | V_c | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.2 Conversor Matricial/Inversor de Corrente (CSI)

Uma vez que os painéis fotovoltaicos são apenas fornecedores de energia, a corrente só irá circular no sentido do painel para o conversor, ou seja, do painel para a rede de energia. Deste modo o interruptor bi-direccional usado no conversor matricial figura 3.2 deixa de ter o seu sentido prático (condução em ambos os sentidos) passando apenas a um interruptor unidireccional representado na figura 3.5.

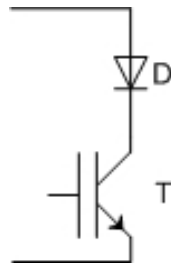


Figura 3.5 – Interruptor unidireccional

Efectuando as simplificações no conversor matricial AC-AC inerentes ao uso de um painel fotovoltaico este passa a funcionar como um inversor de corrente representado na figura 3.6 (CSI - *Current Source Inverter*).

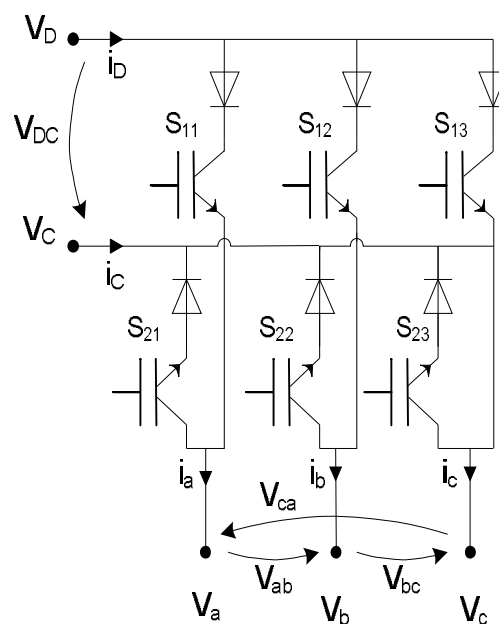


Figura 3.6 – Inversor de corrente

3.3 Filtro de entrada

Na sua ligação à rede eléctrica, o conversor matricial necessita de um filtro que permita reduzir o conteúdo harmónico das correntes injectadas na rede. Uma das vantagens deste conversor é a utilização de pequenos filtros [11], uma vez que, em geral, as harmónicas mais significativas das correntes de entrada do conversor matricial são da ordem de grandeza da frequência de comutação dos semicondutores (kHz). Habitualmente é utilizado um filtro de entrada LC, de acordo com o representado na figura 3.7.

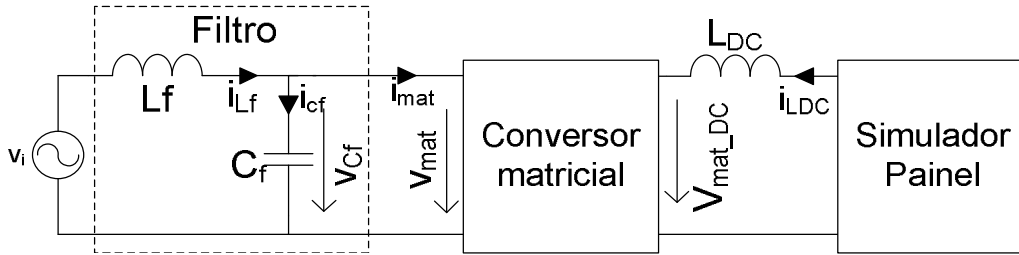


Figura 3.7- Equivalente monofásico do filtro trifásico LC de ligação do conversor matricial à rede eléctrica.

Assumindo que a queda de tensão na bobine é desprezável, considera-se que a tensão V_{cf} aos terminais do condensador é aproximadamente igual à tensão da rede V_i (3.4):

$$v_{cf} \cong v_i = V_m \cos \omega_i t \quad (3.4)$$

A corrente i_{mat} à entrada do conversor matricial pode relacionar-se com a corrente i_L na bobina e a corrente i_C no condensador (3.5):

$$i_{mat} = i_L - i_{cf} \quad (3.5)$$

Desprezando harmónicas de alta frequência, a corrente de entrada do conversor matricial pode ser dada por (3.6), onde I_m representa a amplitude da harmónica fundamental,

$$i_{mat} = I_m \cos \omega_i t \quad (3.6)$$

Desprezando harmónicas de alta frequência, a corrente no condensador é dada por (3.7):

$$i_{cf} = C_f \frac{dv_{cf}}{dt} \leftrightarrow I_{cf} = j\omega C_f v_{cf} \quad (3.7)$$

Geralmente o condensador do filtro tem uma maior influência na desfasagem existente entre a tensão e a primeira harmónica de corrente, impondo um ligeiro avanço da corrente face à tensão. Nessas condições, o condensador será dimensionado impondo uma desfasagem máxima de aproximadamente 18° (factor de potência $\approx 0,95$), para uma potência de operação de 1kW [12].

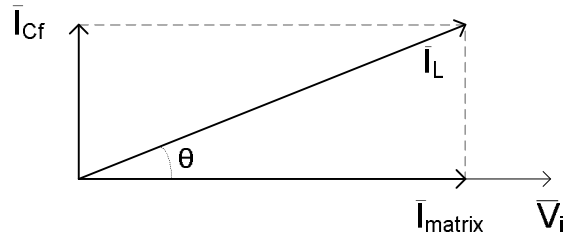


Figura 3.8 – Representação vectorial das correntes

Da figura 3.8 obtém-se (3.8):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_i C_f V_m}{I_m} \right) \quad (3.8)$$

Resolvendo (3.7) em ordem a C_f obtém-se o condensador (3.8), que depende da defasagem tensão/corrente θ , da mínima amplitude da primeira harmónica de corrente I_m , do valor máximo da tensão V_m na entrada do conversor matricial e da frequência da rede ω_i .

$$C_f = \frac{I_{m(min)}}{\omega_i V_{m(max)}} \tan(\theta) \quad (3.9)$$

Uma vez que o cálculo do condensador foi efectuado com base no equivalente monofásico do filtro, o valor obtido em (3.9) é válido se os condensadores do filtro estiverem ligados em estrela. Na ligação em triângulo o valor das capacidades do filtro deverá ser um terço de (3.9).

Para garantir o amortecimento das oscilações do filtro LC, colocou-se uma resistência de amortecimento (r_p) em paralelo com a bobine (L_f), esquema da figura 3.9.

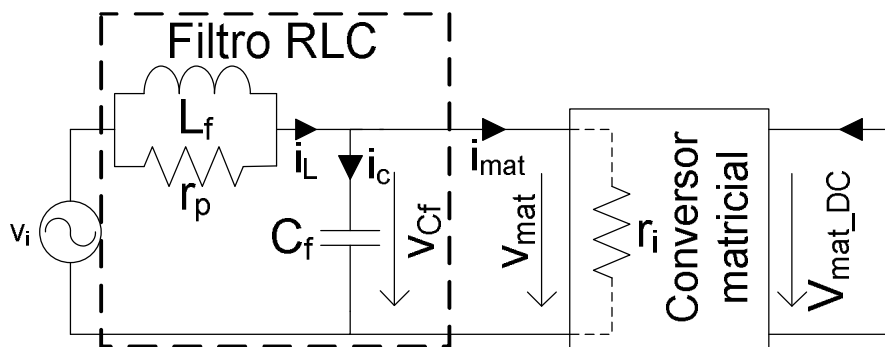


Figura 3.9 - Equivalente monofásico do filtro LC de segunda ordem com amortecimento, de ligação do conversor matricial à rede

Da figura 3.9, a impedância equivalente do paralelo de r_p e L_f é dada por (3.10).

$$Z_{eq1}(s) = \frac{sL_f r_p}{sL_f + r_p} \quad (3.10)$$

A impedância equivalente de C_f e r_i onde r_i é uma resistência fictícia que representa a impedância do conversor, é dada por (3.11).

$$Z_{eq2}(s) = \frac{r_i}{1 + r_i s C_f} \quad (3.11)$$

Por observação da figura 3.9 verifica-se que se tem um divisor de tensão, pelo que a função de transferência do filtro (V_{mat}/V_i) é dada pela equação (3.12) [13].

$$\frac{V_{mat}(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{r_i}{sC_f r_i + 1}}{\frac{sL_f r_p}{sL_f + r_p} + \frac{r_i}{sC_f r_i + 1}} = \frac{(sL_f + r_p)r_i}{s^2 L_f C_f r_p r_i + sL_1(r_p + r_i) + r_p r_i} = \frac{\left(s \frac{L_f}{r_p} + 1\right) \frac{1}{L_f C_f}}{\left(s^2 + s \frac{r_p + r_i}{C_f r_p r_i} + \frac{1}{L_f C_f}\right)} \quad (3.12)$$

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.13)$$

Comparando a equação (3.12) com o polinómio de segunda ordem (3.13), sendo ω_n a frequência natural de oscilação e ξ a constante de amortecimento, é possível obterem-se os valores para a bobine e para a resistência de amortecimento.

$$2\xi\omega_n = \frac{r_p + r_i}{C_f r_p r_i}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_f C_f}} \quad (3.14)$$

Manipulando as equações (3.14) e considerando a impedância característica do filtro sendo $Z_f = \sqrt{L_f/C_f}$ obtém-se (3.15):

$$r_p = \frac{r_i}{C_f 2\xi\omega_n r_i - 1} = \frac{r_i}{2\xi r_i \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} - 1} = \frac{r_i Z_f}{2\xi r_i - Z_f} \quad (3.15)$$

O factor de qualidade do filtro é dado por (3.16).

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (3.16)$$

Com base nestes critérios de dimensionamento, na tabela 3.3 apresentam-se os valores utilizados no protótipo laboratorial do conversor matricial.

Tabela 3.3 – Valores de dimensionamento do filtro de entrada RLC

| $f_c = 550 \text{ Hz}$ | C_f | L_f | r_i | Z_f | r_p |
|------------------------|--------------------|--------|-----------------|---------------|---------------|
| $\xi=0.5$ | 19,6 μF | 4,3 mH | - 52,9 Ω | 14,8 Ω | 20,6 Ω |

Na função de transferência (3.12) substituem-se as variáveis pelos valores da tabela 3.3

$$F(s) = \frac{2489s + 1.194 \times 10^7}{s^2 + 3456s + 1.194 \times 10^7} \quad (3.17)$$

Com base na função de transferência do filtro foi traçado o diagrama de Bode e Root-Locus.

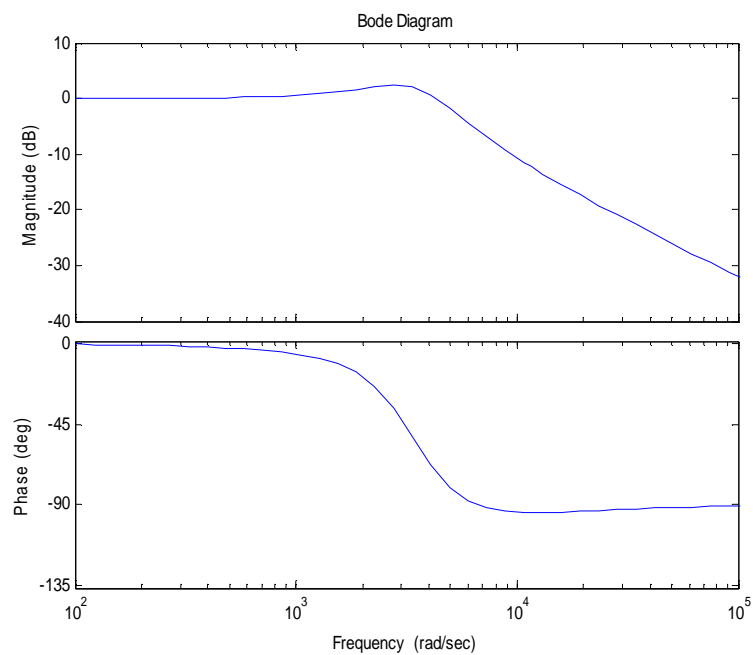


Figura 3.10 – Diagrama de bode

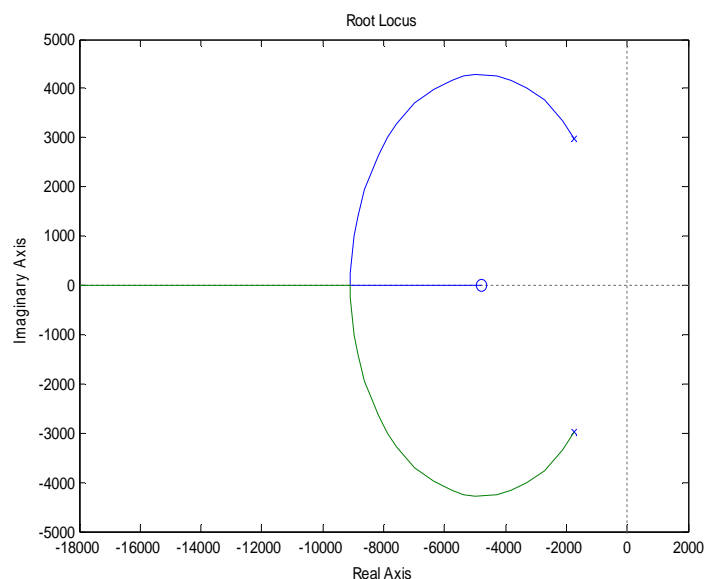


Figura 3.11 – Root locus

Por observação da figura 3.10, verifica-se que a frequência de corte do filtro é mais de uma década acima da frequência da rede, o que está de acordo com o dimensionamento realizado.

3.4 Filtro de saída

Na interligação do conversor ao painel fotovoltaico será necessário utilizar-se um filtro, para garantir a correcta adequação das tensões e correntes dos dois sistemas.

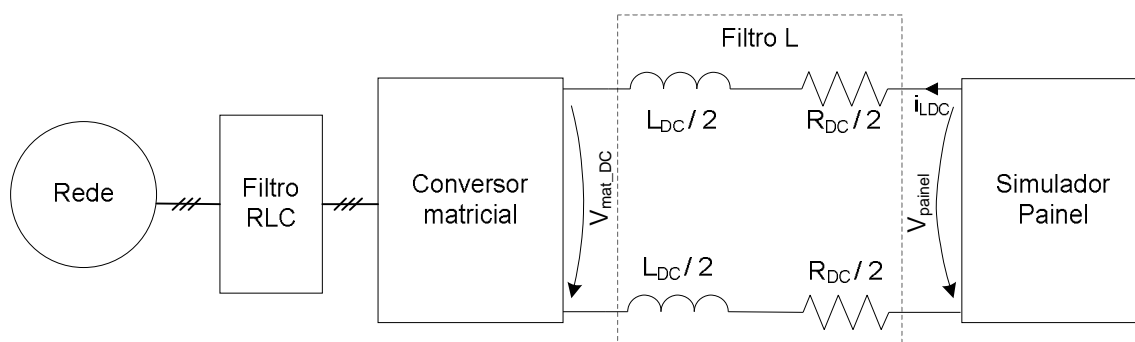


Figura 3.12 – Representação do sistema, com o filtro indutivo de ligação do conversor matricial ao painel fotovoltaico.

A corrente contínua à saída do conversor (inversor) vai apresentar alguma oscilação, que irá provocar uma pequena pulsação na potência fornecida pelo painel, pelo que será importante o uso de uma bobine. Sendo a bobine componente de armazenamento de energia, irá possibilitar uma

redução na variação da potência instantânea, limitando a variação de corrente na entrada do inversor.

O algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) muda o ponto de operação até atingir o ponto de funcionamento de potência máxima. As oscilações tanto de corrente como de tensão à entrada do MPPT devem ser mínimas, minimizando assim as oscilações na potência extraída do painel. Por outro lado as oscilações devem ser suficientemente grandes para se distinguir os efeitos de comutação do conversor.

A tensão aos terminais da bobine é dada pela equação (3.18)

$$v_{L_{DC}} = v_{mat_DC} - v_{painel} = L_{DC} \frac{di_{L_{DC}}}{dt} \cong L_{DC} \frac{\Delta i_{L_{DC}}}{\Delta t} \quad (3.18)$$

A bobina (3.19) de ligação do painel fotovoltaico ao conversor matricial pode ser obtida de (3.18), considerando $\Delta t = 1/(2f_s)$, onde f_s representa a frequência de comutação.

$$L_{DC} = v_{mat_DC} - v_{painel} \frac{\Delta t}{\Delta i_{L_{DC}}} = \frac{v_{mat_DC} - v_{painel}}{2f_s \Delta i_L} \quad (3.19)$$

A bobine não é um componente ideal. Como tal, terá perdas que podem ser estimadas e que deverão ser relativamente baixas para garantir rendimento de conversão elevados.

Partindo da potência de perdas na bobine, estima-se o valor de R_{DC} (3.20)

$$\frac{P_{perdas}}{I_{L_{DC}}^2} = R_{DC} \quad (3.20)$$

Neste trabalho considera-se que as perdas na bobina representam aproximadamente 2% do valor da potência do painel.

Para as condições de trabalho consideradas e, com base em (3.19) e (3.20), obtêm-se os valores de dimensionamento do filtro L_{DC} (tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Valores de dimensionamento de filtro L_{DC}

| Valores atribuídos | | | Valores calculados | |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| $f_s = 5 \text{ kHz}$ | $v_{mat_DC} = 60 \text{ V}$ | $P_{perdas} = 2\%P_o$ | $L_{DC} = 21.2 \text{ mH}$ | $R_{DC} = 99.2 \text{ m}\Omega$ |
| $I_{LDC}=3.3 \text{ A}$ | $v_{painel} = 25 \text{ V}$ | $\Delta I_{LDC} = 0.165 \text{ A}$ | $L_{DC}/2 = 10.6 \text{ mH}$ | $R_{DC}/2 = 49.6 \text{ m}\Omega$ |

Para efeitos de cálculo da bobina, o tremor da corrente foi considerado não superior a 5% do seu valor nominal da corrente.

4. Controlo do Sistema

Para garantir o MPPT e factor de potência quase unitário na ligação à rede eléctrica, é utilizada uma estratégia de controlo não linear para o sistema.

4.1 Seguidor da Potência Máxima Gerada – MPPT

O método de MPPT utilizado é baseado na derivada da potência em função da tensão sendo a derivada nula no ponto de potência máxima. A potência aos terminais do painel fotovoltaico é dada por (4.1).

$$P = V_{\text{painel}} I_{DC} \quad (4.1)$$

Derivando a potência do painel P em relação à tensão V e igualando a zero, obtém-se (4.4), onde $-I/V$ representa o simétrico da condutância instantânea das células dos painéis fotovoltaicos e dI/dV representa a condutância incremental, que no MPP serão iguais.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \leftrightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \leftrightarrow -\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (4.2)$$

À direita do MPP (figura 4.1) $dI/dV < -I/V$, sendo necessária uma redução da tensão para se encontrar o ponto de potência máxima. Similarmemente, à esquerda do MPP $dI/dV > -I/V$ é necessário um aumento da tensão de modo a encontrar-se o ponto de potência máxima. Por exemplo: para se obter a deslocação do ponto 1 (figura 4.1) será necessário aumentar-se a tensão; para a deslocação do ponto 4 será necessário diminuir a tensão [14].

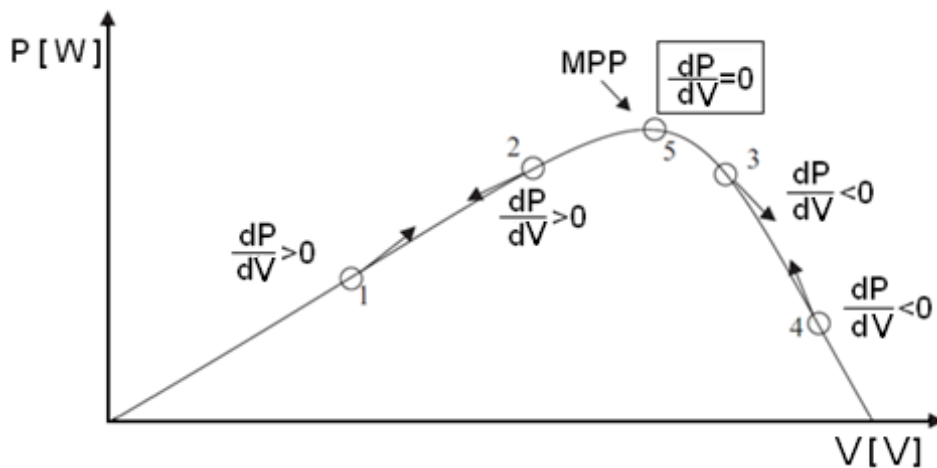


Figura 4.1 - Curva de Potência P-V representando o MPP

De modo a decidir qual a tensão a aplicar à saída do conversor será então necessário conhecer a localização das tensões da rede (4.3).

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{2} V_{ef} \cos(\omega t) \\ V_b = \sqrt{2} V_{ef} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = \sqrt{2} V_{ef} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4.3)$$

As tensões compostas serão dadas por (4.4):

$$\begin{cases} V_{ab} = V_a - V_b = \sqrt{6} V_{ef} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{bc} = V_b - V_c = \sqrt{6} V_{ef} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{ca} = V_c - V_a = \sqrt{6} V_{ef} \cos\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (4.4)$$

As tensões compostas encontram-se representadas na figura 4.2 e podem ser divididas em 6 zonas.

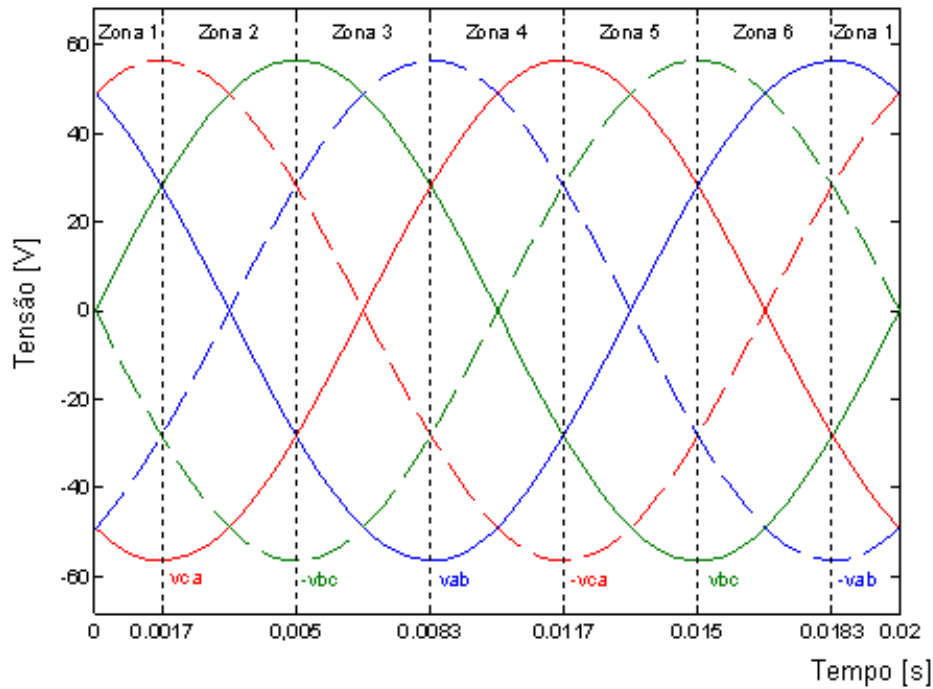


Figura 4.2 - Divisão da tensão da rede em zonas

Da equação (3.18) obtém-se (4.5).

$$\frac{di_{L_{DC}}}{dt} L_{DC} = v_{painel} - v_{mat_{DC}} = v_{DC} \quad (4.5)$$

De acordo com a tensão aplicada pelo conversor matricial, caso esta seja maior do que o valor da tensão do painel, a tensão aos terminais da bobina (v_{dc}) será negativa, pelo que a corrente i_{LDC} fornecida pelo painel irá decrescer. Isto significa que, de acordo com a característica dos painéis fotovoltaicos (Fig. 2.12) (decrescer corrente => aumentar tensão), a tensão V_{painel} aos terminais do painel irá aumentar. No caso de o conversor matricial aplicar uma tensão menor do que a tensão do painel, a tensão aos terminais da bobina resultará positiva, pelo que a corrente i_{LDC} irá aumentar. Isto significa que, de acordo com a característica dos painéis fotovoltaicos (Fig. 2.12) (aumentar corrente => diminuir tensão), a tensão V_{painel} aos terminais do painel irá decrescer.

Uma vez que o conversor se comporta como elevador de DC para AC, a tensão do painel V_{painel} deverá ter sempre um valor inferior à amplitude da tensão da rede. Nestas condições e, para ilustrar a selecção dos estados de comutação do conversor matricial considere-se, por exemplo, que as tensões da rede estão na zona 1 (figura 4.2). Se o conversor matricial aplicar a tensão v_{ab} , de acordo com (4.5) a tensão v_{DC} aos terminais da bobina será negativa, pelo que a corrente i_{LDC} irá decrescer, aumentando a tensão V_{painel} aos terminais do painel. No entanto, na mesma zona de funcionamento, se o conversor matricial aplicar a tensão v_{bc} na saída, a tensão V_{DC} aos terminais da bobina vai ser positiva até que v_{bc} seja igual à tensão do painel e, para valores superiores à tensão do painel a tensão V_{DC} aos terminais da bobine será negativa. Isto significa que o sinal da tensão v_{DC} é indefinido, o que implica que, dependendo do valor instantâneo da tensão da rede a corrente i_{LDC} fornecida pelo painel poderá aumentar ou diminuir. O mesmo sucederá noutras zonas com tensões que não apresentem um valor bem definido ao longo de toda a zona.

Na tabela 4.1 encontra-se representado o sinal da tensão v_{DC} , em função da aplicação das tensões de saída do conversor matricial, considerando todas as zonas de tensão.

| Tensão do matricial | | V_{ab} | $-V_{ab}$ | V_{bc} | $-V_{bc}$ | V_{ca} | $-V_{ca}$ | 0 | 0 | 0 |
|---------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Zona de tensão | 1 | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | x | x | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ |
| | 2 | x | x | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ |
| | 3 | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | x | x | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ |
| | 4 | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} < 0$ | x | x | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ |
| | 5 | x | x | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ |
| | 6 | $v_{dc} < 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} < 0$ | x | x | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ | $v_{dc} > 0$ |

Tabela 4.1 – Influência dos vectores de tensão na corrente

Pela tabela 4.1 pode verificar-se que, para todas as zonas de tensão existe mais do que uma combinação de ligação do conversor matricial que garante o aumento ou a diminuição da tensão v_{DC} . No entanto a selecção final será efectuada com base nos vectores de corrente, possibilitando o controlo simultâneo do factor de potência.

4.2 Controlo das correntes injectadas na rede

Um dos objectivos do trabalho é controlar a corrente injectada na rede, garantindo factor de potência quase unitário. Para facilitar a realização do processo de controlo, é habitual recorrer-se a um sistema de coordenadas síncrono com as tensões da rede. Deste modo utiliza-se a transformação de Blondel-Park ou transformação de Park (4.8) que é a composição da transformação de Clark Concordia (4.6) com a transformação de rotação de referencial (4.7) [14].

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{T}_{rr} = \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & 0 \\ \sin \rho & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\rho - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\rho - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\rho - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\rho - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Considerando à entrada do conversor um sistema equilibrado de correntes, pode efectuar-se a transformação de Blondel-Park.

$$\begin{aligned} i_A &= \sqrt{2}I \cos(\omega t + \alpha) \\ i_B &= \sqrt{2}I \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C &= \sqrt{2}I \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \mathbf{T}^T \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Sendo $\rho = \omega t + \alpha_m$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} I \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha_u - \omega t - \alpha_m) \\ \sin(\omega t + \alpha_u - \omega t - \alpha_m) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Sendo $\alpha_u = \alpha_m$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} I \begin{bmatrix} \cos(\alpha_u - \alpha_m) \\ \sin(\alpha_u - \alpha_m) \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{matrix} i_d = \sqrt{3} I \\ i_q = 0 \end{matrix} \quad (4.12)$$

De modo a garantir que as tensões simples se encontram em fase com as correntes, será então necessário garantir uma corrente com componente i_q nula (4.12).

Para controlar as correntes de entrada do conversor é necessário conhecer a influência de todas as combinações de ligação dos interruptores nas correntes de entrada. Aplicando a transformação de Concordia às correntes de entrada resultantes da ligação de cada uma das combinações possíveis de interruptores, obtêm-se os vectores de corrente da tabela 4.2.

Tabela 4.2– Vectores de corrente, consoante os interruptores activos

| Estado (k) | Interruptores activos (ON) | I_A | I_B | I_C | Modulo I_k | Argumento μ_k |
|------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------------------|
| 1 | $S_{11} S_{22}$ | I_{DC} | $-I_{DC}$ | 0 | $\sqrt{2} I_{DC}$ | -30 |
| 2 | $S_{12} S_{21}$ | $-I_{DC}$ | I_{DC} | 0 | $-\sqrt{2} I_{DC}$ | -30 |
| 3 | $S_{12} S_{33}$ | 0 | I_{DC} | $-I_{DC}$ | $\sqrt{2} I_{DC}$ | 90 |
| 4 | $S_{22} S_{13}$ | 0 | $-I_{DC}$ | I_{DC} | $-\sqrt{2} I_{DC}$ | 90 |
| 5 | $S_{21} S_{13}$ | $-I_{DC}$ | 0 | I_{DC} | $-\sqrt{2} I_{DC}$ | 30 |
| 6 | $S_{11} S_{33}$ | I_{DC} | 0 | $-I_{DC}$ | $\sqrt{2} I_{DC}$ | 30 |
| 7 | $S_{11} S_{21}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | $S_{12} S_{22}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | $S_{13} S_{23}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Os vectores de corrente calculados estão representados na figura 4.3 a azul. As zonas de tensão encontram-se representadas por setas entre os dois vectores de corrente.

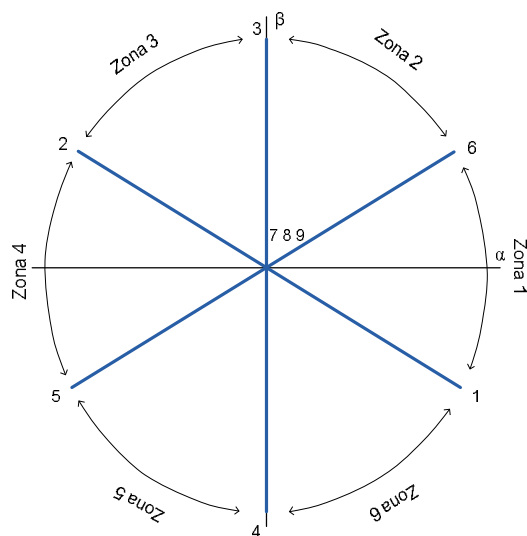


Figura 4.3 – Representação dos vectores de corrente (tabela 4.2) e das zonas de tensão

Por exemplo, se o eixo d do referencial estiver na zona de tensão 2 o eixo q do referencial (em quadratura) se encontrar na zona 3, então para se diminuir I_q deve aplicar-se o vector 1, 4 ou 6 ; para aumentar I_q deve aplicar-se o vector 2, 3 ou 5; para manter o valor de I_q pode-se aplicar qualquer um dos vectores 7, 8 ou 9.

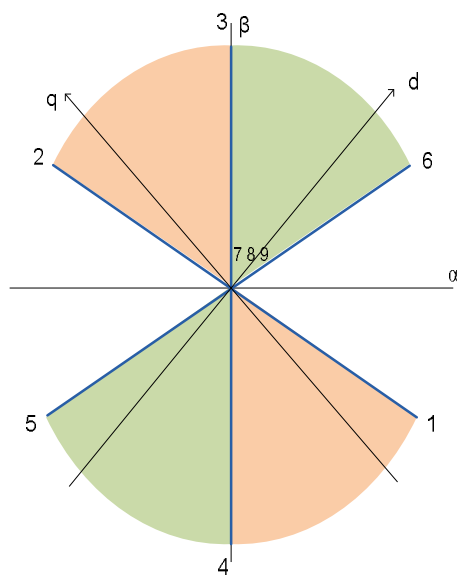


Figura 4.4 – Representação da componente I_d da corrente numa zona fixa (zona 2)

É de notar que apesar de ser possível aplicar três vectores para aumentar e três vectores para diminuir o valor da corrente, a selecção do vector final dependerá do controlador de MPPT.

Tabela 4.3 – Efeito das combinações de ligação do conversor matricial na componente I_q da corrente injectada na rede.

| Vector | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Tensão Matricial | V_{ab} | $-V_{ab}$ | V_{bc} | $-V_{bc}$ | V_{ca} | $-V_{ca}$ | 0 | 0 | 0 |
| Zona de Tensão | 1 | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q = 0$ | $I_q = 0$ |
| | 2 | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q = 0$ | $I_q = 0$ |
| | 3 | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q = 0$ | $I_q = 0$ |
| | 4 | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q = 0$ | $I_q = 0$ |
| | 5 | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q = 0$ | $I_q = 0$ |
| | 6 | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q < 0$ | $I_q < 0$ | $I_q > 0$ | $I_q = 0$ | $I_q = 0$ |

4.3 Potência injectada na rede

Para uma melhor verificação dos resultados obtidos, ter-se-á todo o interesse em medir as potências injectadas na rede de energia. Como é de esperar a potência reactiva deverá ser quase nula, uma vez que a corrente deverá estar em fase com a tensão, e a potência activa será tanto maior quanto maior a corrente e a tensão no andar DC.

Sendo a matriz de Clark Concordia dada por (4.6), as potências foram calculadas através das componentes $\alpha\beta$ das correntes e das tensões da rede. No novo sistema de coordenadas as correntes injectadas na rede e as tensões da rede serão dadas por (4.15) e (4.16):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{C}^T \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{C}^T \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Na ponto de ligação à rede as potências activa e reactiva instantâneas são dadas pelas equações (4.15) e (4.16) respectivamente [15].

$$p(t) = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (4.15)$$

$$q(t) = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (4.16)$$

4.4 Controlo por modo de deslizamento

Considerando o conversor conservativo, desprezando as harmónicas de alta frequência e as perdas do conversor, a potência de entrada é igual à de saída.

A desfasagem entre a tensão e a corrente deve ser controlada, actuando directamente na corrente de entrada, de forma a controlar a componente q da corrente de entrada (potência reactiva).

$$Q_{in} \cong v_{i_d}(t)i_{i_q}(t) \quad (4.17)$$

O erro da corrente injectada na rede (4.19) é dado pela diferença entre o valor de referência i_{qref} e o valor medido i_q :

$$e_{i_q} = i_{qref} - i_q \quad (4.18)$$

A superfície de deslizamento (4.20) irá depender directamente do erro da corrente depende da corrente de entrada, sendo k o ganho, superior a zero e os seus limites máximos delimitados pela máxima frequência de comutação.

$$S_Q(e_{i_q}, t) = k(i_{qref} - i_q) \quad (4.19)$$

Em geral, a superfície de deslizamento para um conversor não é sempre zero. No entanto, se a condição de estabilidade (4.21) se verificar, garante-se que o sistema atinge o modo de deslizamento.

$$S_Q(e_{i_q}, t) \dot{S}_Q(e_{i_q}, t) < 0 \quad (4.20)$$

De modo a garantir que o sistema desliza ao longo da superfície (4.20) é necessário garantir que a trajectória de deslizamento verifica as condições de estabilidade [18], ou seja:

- se $S_Q(e_{i_q}, t) > 0$ o vector escolhido deve conseguir aumentar i_q ;
- se $S_Q(e_{i_q}, t) < 0$ o vector escolhido deve ser capaz de diminuir i_q ;
- se $S_Q(e_{i_q}, t) = 0$, o vector escolhido não deve provocar qualquer alteração i_q .

Para que o painel forneça a potência máxima, foi implementado um controlador baseado no mesmo método, sendo o erro dado pela diferença entre o valor de referência e o valor medido (4.22).

$$e_P = \frac{dP_{ref}}{dV} - \frac{dP}{dV} \quad (4.21)$$

A superfície de deslizamento do controlo de potência é dada por (4.23) .

$$S_P(e_P, t) = \frac{dP_{ref}}{dV} - \frac{dP}{dV} \quad (4.22)$$

Sendo $dP_{ref}/dV = 0$ obtém-se:

$$S_p(e_p, t) = -\frac{dP}{dV} \quad (4.23)$$

Para implementar o controlador foram utilizados comparadores de histerese de 3 níveis. Para valores inferiores à banda de histerese maior vem $S_Q < 0$ e $S_P < 0$, para valores dentro da banda de histerese menor vem $S_Q = 0$ e $S_P = 0$ e para valores acima da banda de histerese maior vem $S_Q > 0$ e $S_P > 0$. (anexo D)

5. Resultados experimentais

Foi realizada uma montagem (Figura 5.1), que permite analisar o comportamento do sistema painel+conversor ligado à rede.

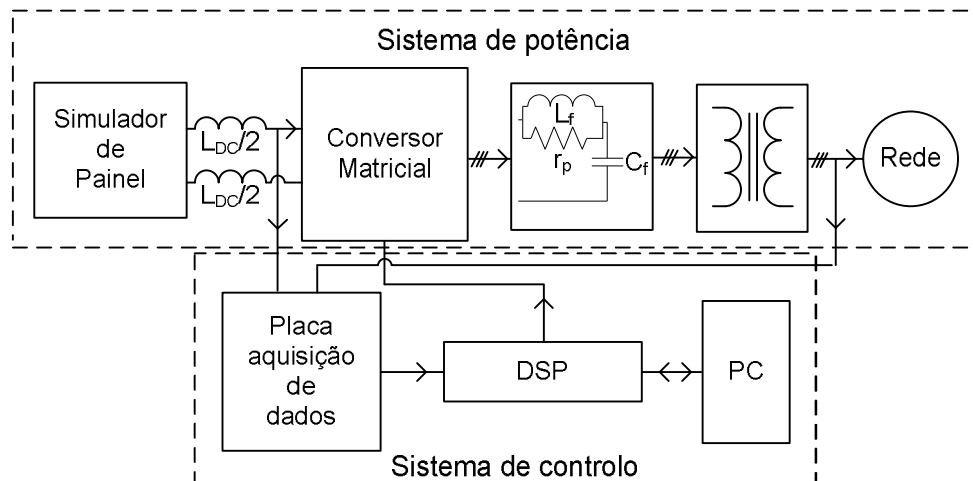


Figura 5.1 – Montagem realizada em laboratório (simplificada)

A montagem é constituída por um simulador de painel (díodos+transístor ou série de díodos ligados a uma fonte de tensão controlada em corrente) que se encontra ligado a um conversor matricial através de um filtro indutivo. Por sua vez o conversor matricial está ligado à rede eléctrica através de um filtro RLC e de um auto-transformador que permite regular a tensão da rede.

A placa de aquisição de sinais (tensão e corrente) adquire à saída do filtro L_{DC} a corrente e tensão contínua e a tensão e corrente da rede de energia para efectuar o sincronismo com a rede. Esta envia os sinais para o DSP que se encontra ligado a um Computador (PC) que através de *Matlab Simulink* permite efectuar o controlo do conversor matricial.

As grandezas a observar nesta montagem são a tensão na rede, as corrente e a tensão (em coordenadas abc e dq), a corrente e a tensão máximas fornecidas pelo painel, e a potência reactiva e activa.

5.1 Simulação de painel fotovoltaico com série de díodos de potência

Os diodos de potência ligados em série possibilitam a obtenção de uma característica V-I similar a um painel fotovoltaico, que permitiram observar os valores de tensão e de corrente para os quais a potência é máxima.

Para este modelo de painel fotovoltaico em que se consideraram díodos em série, obtiveram-se os resultados da figura 5.2.

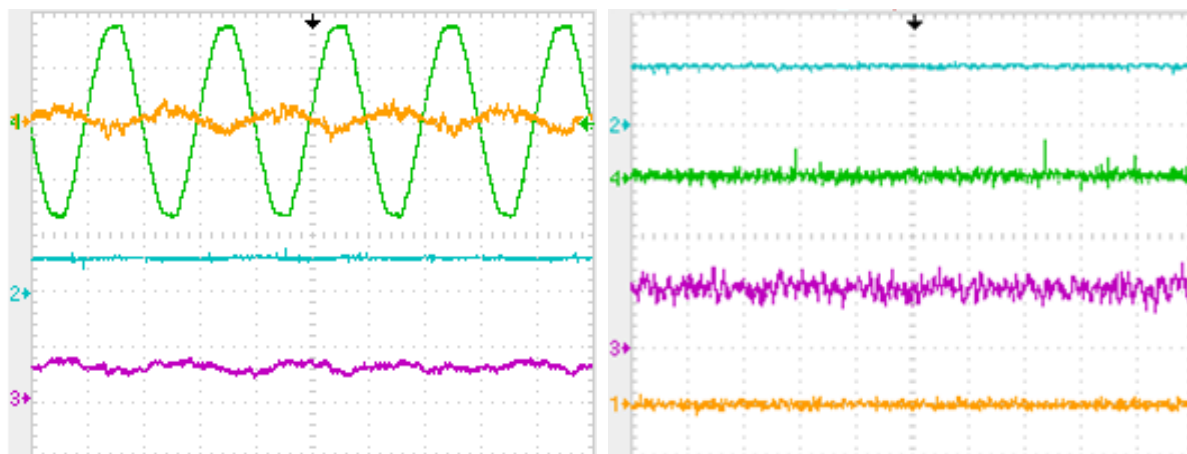


Figura 5.2 – Tensão composta da rede de 35V (série de 22 díodos)

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (I_a) (5A/Div)
Verde – Tensão simples amostrada (V_a) (20V/Div)
Azul – Tensão Contínua (40V/Div)
Roxo – Corrente Contínua (5A/Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente q da Corrente (2A/Div)
Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
Azul – Tensão Contínua (25V/Div)
Roxo – Potência Activa injectada na rede (62,5W/Div)

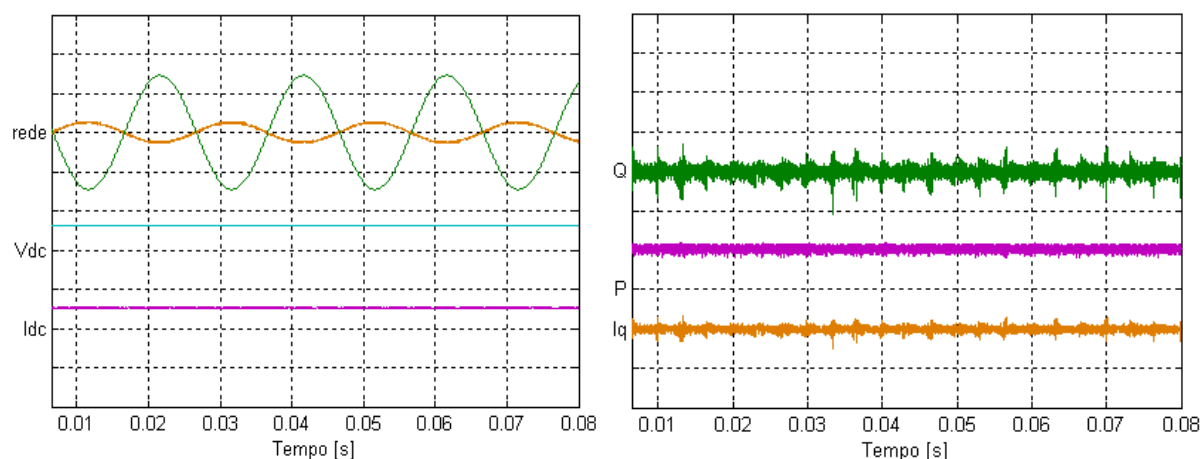


Figura 5.3 - Simulação da série de díodos nas mesmas condições da Figura 5.2

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (I_a) (5A/Div)
Verde – Tensão simples amostrada (V_a) (20V/Div)
Azul – Tensão Contínua (40V/Div)
Roxo – Corrente Contínua (5A/Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente q da Corrente (2A/Div)
Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
Roxo – Potência Activa injectada na rede (62,5W/Div)

Ao colocar-se a fonte com uma corrente de 7,65A obteve-se à saída do painel, em vazio, uma tensão de 27V. Ao efectuar-se a ligação do sistema (painel+conversor+rede de energia) observou-se que a corrente e a tensão, na saída do painel fotovoltaico para o ponto de máxima potência, seriam respectivamente 2,65A e 25,12V. Os valores obtidos para o ponto de potência máxima não se apresentam de acordo com os esperados, sendo que a tensão e corrente, segundo a característica obtida em laboratório, isoladamente, são 17,6V e 6,87A, respectivamente.

Os diodos quando ligados ao sistema dissipam energia, podendo a característica V-I estimada ser visualizada na figura E.3. Não sendo esta característica V-I a ideal é aceitável, sendo possível visualizar a corrente em oposição de fase com a tensão e o fornecimento de potência activa à rede.

Aumentando o número de diodos em série de 22 para 36, obtiveram-se os resultados da figura 5.4:

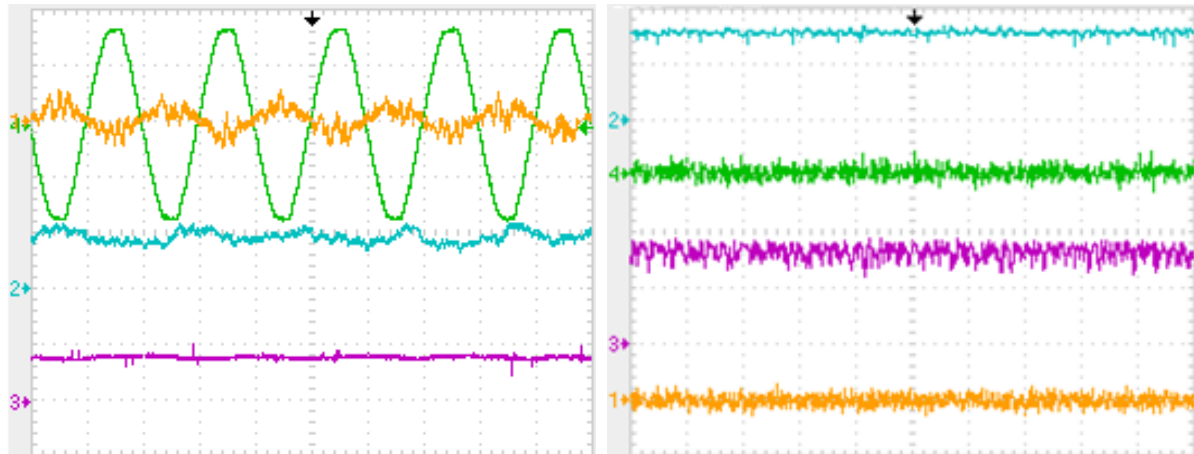


Figura 5.4 – Tensão composta da rede de 60V (série de 36 diodos)

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (5A/Div)
Verde – Tensão simples amostrada V_a (20V/Div)
Azul – Corrente Contínua (5A /Div)
Roxo – Tensão Contínua (40V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
Azul – Tensão Contínua (20V/Div)
Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

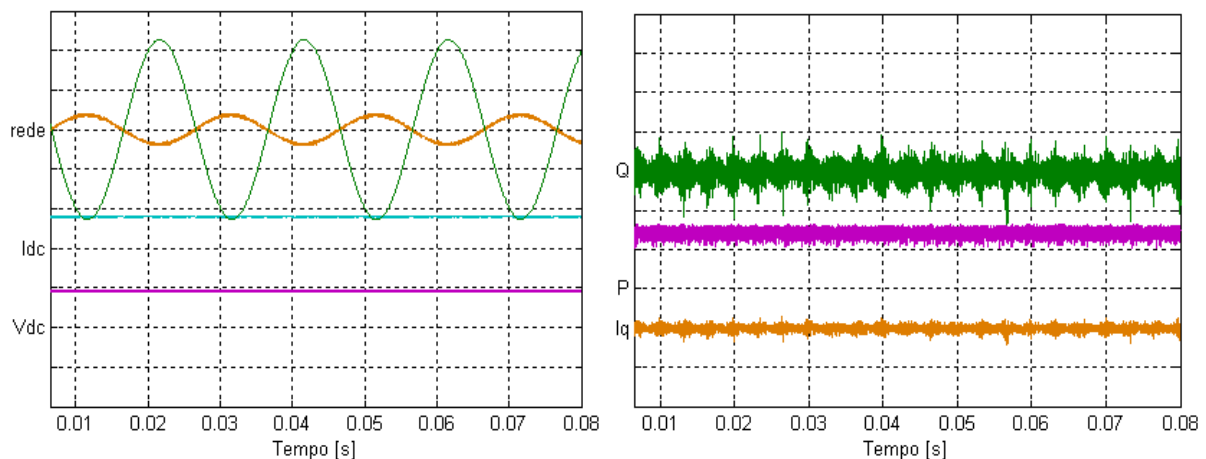


Figura 5.5 - Simulação do série de diodos nas mesmas condições da Figura 5.4

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (5A/Div)
Verde – Tensão simples amostrada V_a (20V/Div)
Azul – Corrente Contínua (5A /Div)
Roxo – Tensão Contínua (40V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

Comparando a figura 5.2 com a figura 5.4, pode observar-se que com o aumento do número de díodos em série a tensão para o ponto máximo de potência aumentou, tal como seria de esperar. Aumentando o número de díodos, aumenta a resistência provocando assim um aumento na queda de tensão, no entanto, a corrente à saída do painel também sofreu um incremento no seu valor, podendo este facto ser justificado pelas diferentes características dos díodos quando ligados ao sistema (figura E.1).

5.1.1 Comportamento do MPPT/ conversor

Para verificar a resposta do controlador a uma variação brusca da corrente colocou-se um reóstato em paralelo com a fonte, fazendo-a variar rapidamente até ao curto-circuito, ou seja, diminuindo a corrente na entrada dos díodos até que esta seja nula. Este tipo de variação pode ser comparado à passagem de um objecto de grandes dimensões em frente do painel, ficando instantaneamente sem radiação solar (sombra).

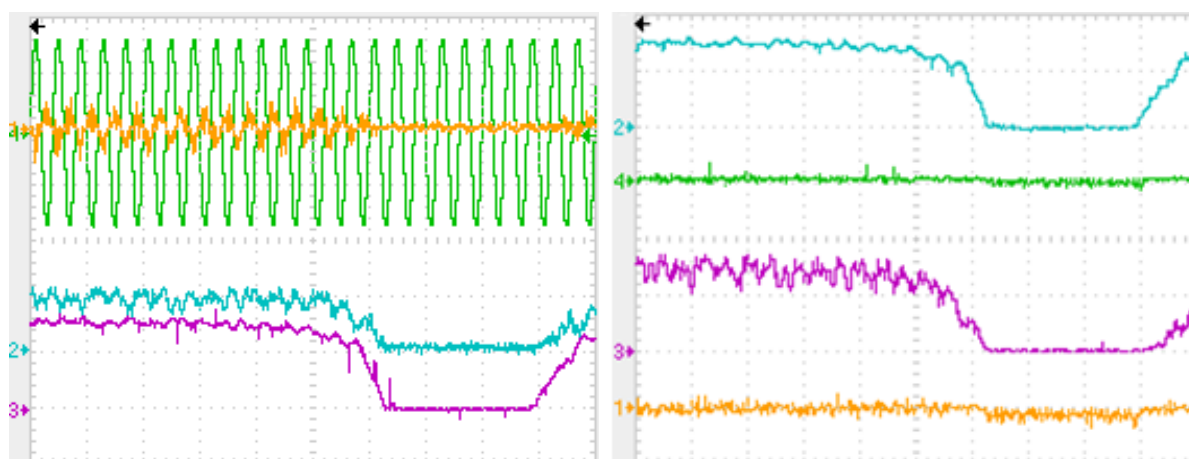


Figura 5.6 – Teste de mppt para (série de 36 díodos)

a) Corrente e tensões visualizadas
Amarelo – Corrente injectada na rede (5A/Div)
Verde – Tensão simples amostrada V_a (20V/Div)
Azul – Corrente Contínua (5A /Div)
Roxo – Tensão Contínua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas
Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
Azul – Tensão Contínua (21V/Div)
Roxo – Potência Activa injectada na rede (105W/Div)

Ao diminuir a corrente que passa nos díodos para zero, a corrente, para o máximo ponto de potência, tende para zero obrigando a tensão a diminuir, pelo que se poderá observar pela característica dos díodos (figura E.1). Em seguida com o aumento da corrente nos díodos (aumento da resistência colocada em paralelo) o MPPT inicia o seu funcionamento e o conversor retoma os valores antes da perturbação, podendo concluir-se que este é sensível às perturbações provocadas, conseguindo retomar ao seu valor inicial. Através das variações efectuadas foi possível verificar que o controlador MPPT se encontra a funcionar correctamente.

5.2 Simulação de painel fotovoltaico através de simulador (díodos +transístores)

Utilizando o protótipo do painel fotovoltaico desenvolvido nesta dissertação (figura 2.11) como simulador do painel e mantendo o esquema apresentado na figura 5.1, visualizaram-se as formas de onda das tensões e correntes. Foram efectuadas posteriormente duas simulações, numa das quais a tensão do lado da rede foi alterada mantendo a radiação constante e na outra foi verificada a desfasagem entre as correntes.

5.2.1 Variação da radiação solar (fonte de tensão controlada em corrente)

Com o protótipo do painel, obtiveram-se algumas figuras que permitiram simular a variação da radiação e verificar o comportamento tanto do MPPT como do conversor.

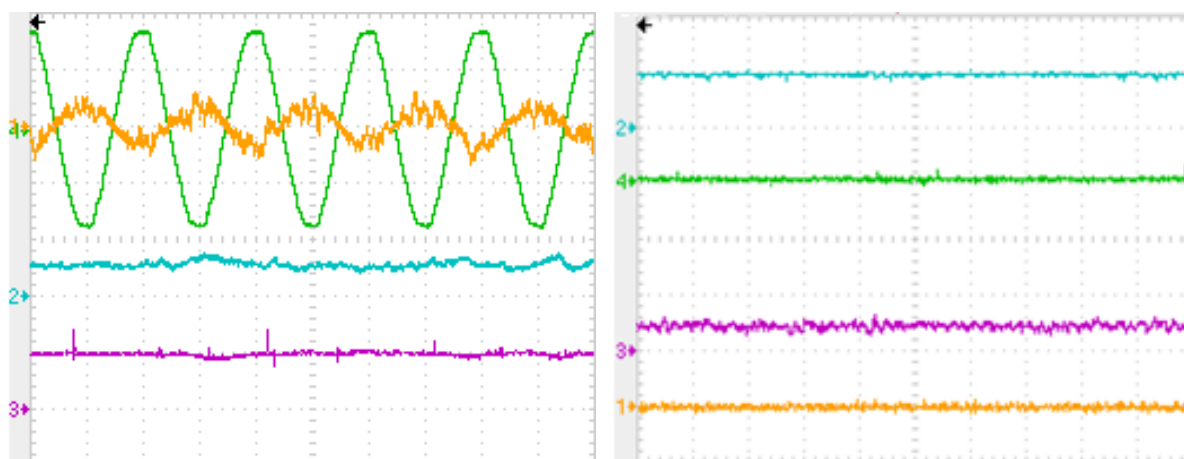


Figura 5.7 — Simulador do painel (díodo+transístor) com 30V na rede ($G=1000 \text{ W/m}^2$)

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)
Verde – Tensão simples amostrada V_a (20V/Div)
Azul – Corrente Continua (5A /Div)
Roxo – Tensão Continua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
Azul – Tensão Continua (21V/Div)
Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

Simulação da variação da radiação (continuação)

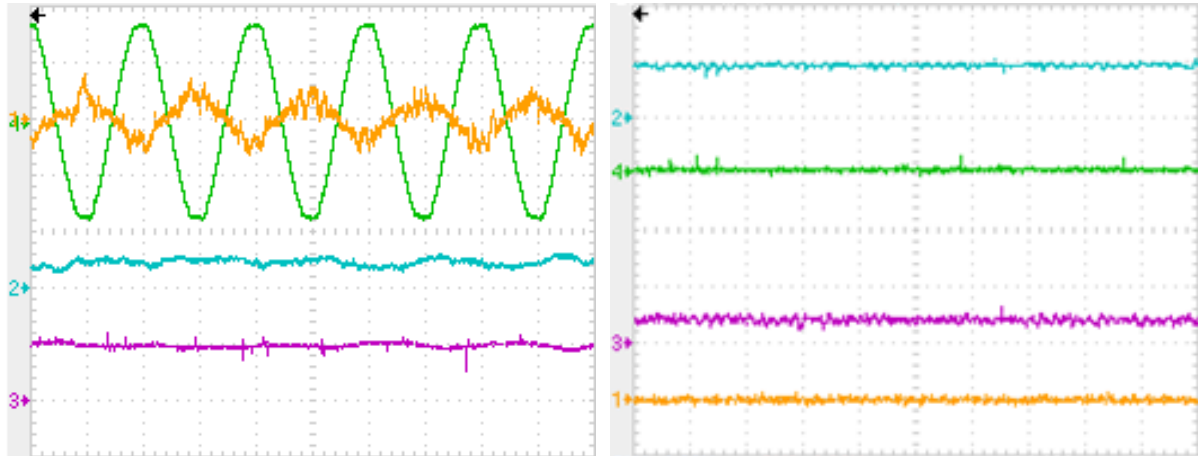


Figura 5.8 – Simulador do painel (diodo+transistor) com 30V na rede ($G=846 \text{ W/m}^2$)

a) Corrente e tensões visualizadas
 Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)
 Verde – Tensão simples V_a (20V/Div)
 Azul – Corrente Continua (5A /Div)
 Roxo – Tensão Continua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas
 Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
 Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
 Azul – Tensão Continua (21V/Div)
 Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

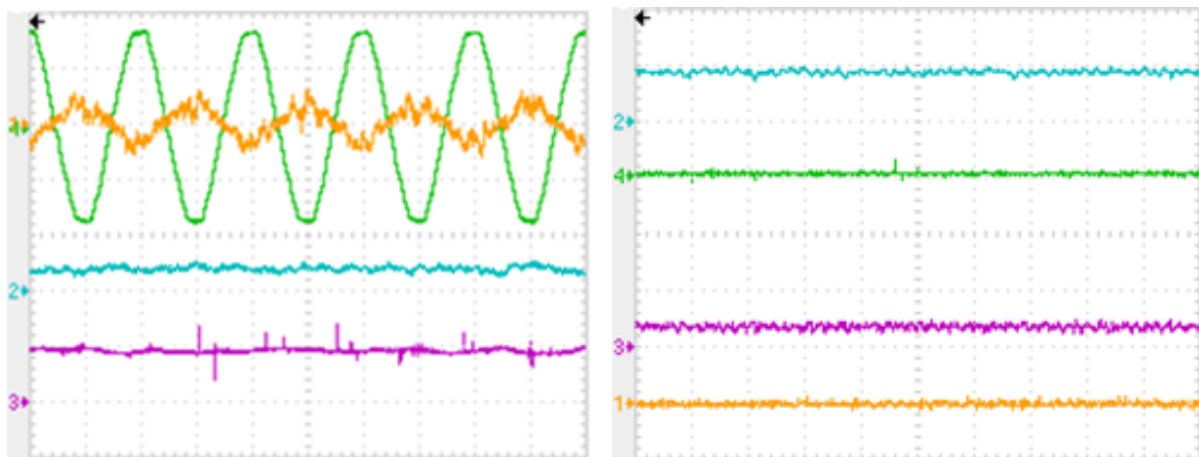


Figura 5.9 – Simulador do painel (diodo+transistor) com 30V na rede ($G=700 \text{ W/m}^2$)

a) Corrente e tensões visualizadas
 Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)
 Verde – Tensão simples amostrada V_a (20V/Div)
 Azul – Corrente Continua (5A /Div)
 Roxo – Tensão Continua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas
 Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
 Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)
 Azul – Tensão Continua (21V/Div)
 Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

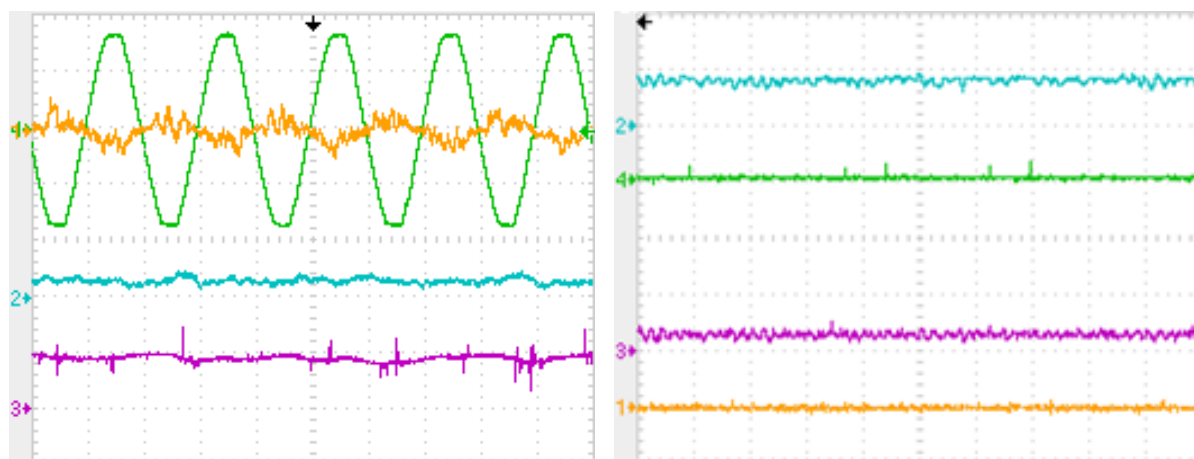


Figura 5.10 – Simulador do painel (diodo+transistor) com 30V na rede ($G=540 \text{ W/m}^2$)

- a) Corrente e tensões visualizadas
- Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)
 - Verde – Tensão simples amostrada V_a (200V/Div)
 - Azul – Corrente Contínua (5A /Div)
 - Roxo – Tensão Contínua (20V /Div)
- b) Corrente, tensão e potências visualizadas
- Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)
 - Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAR/Div)
 - Azul – Tensão Contínua (21V/Div)
 - Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

Através dos valores da corrente de curto-circuito (I_{sc}), assumindo que para um I_{sc} de 3,31A o valor da radiação de referência (1000 W/m^2), pode então calcular-se pela equação (2.11) a variação da radiação face à variação da corrente.

Tabela 5.1 – Valores da radiação face à corrente

| $I_{sc} \text{ [A]}$ | $V_{oc} \text{ [V]}$ | Radiação $[\text{W/m}^2]$ | Gráfico |
|----------------------|----------------------|---------------------------|-------------|
| 3,31 | 22,5 | 1000 | Figura 5.7 |
| 2,8 | 21,8 | 846 | Figura 5.8 |
| 2,32 | 21,5 | 700 | Figura 5.9 |
| 1,79 | 20,9 | 540 | Figura 5.10 |

Conhecendo a radiação, e considerando a temperatura constante e igual à de referência, pode-se através das equações (2.14) e (2.15) calcular os valores teóricos para V_{mp} e I_{mp} respectivamente, e a potência por eles obtida através da equação (2.13).

Tabela 5.2 – Valores teóricos e experimentais

| $G \text{ [W/m}^2\text{]}$ | Valores teóricos | | | Valores experimentais ⁽¹⁾ | | |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | $V_{mp} \text{ [V]}$ | $I_{mp} \text{ [A]}$ | $P_{mp} \text{ [W]}$ | $V_{mp} \text{ [V]}$ | $I_{mp} \text{ [A]}$ | $P_{mp} \text{ [W]}$ |
| 1000 | 17,40 | 3,11 | 54,11 | 19,91 | 2,62 | 52,16 |
| 846 | 17,20 | 2,63 | 45,25 | 19,49 | 2,23 | 43,46 |
| 700 | 16,97 | 2,18 | 36,95 | 18,41 | 1,98 | 36,45 |
| 540 | 16,68 | 1,68 | 27,98 | 17,72 | 1,43 | 25,34 |

¹ Valores experimentais calculados através da média do ficheiro Excel correspondente à figura.

Comparando os valores teóricos com os valores experimentais, verifica-se que existem algumas diferenças. Este facto deve-se essencialmente às perdas associadas ao simulador de painel, que sofre uma alteração na sua característica (figura E.2), e a erros inerentes à leitura e precisão dos aparelhos de medida.

Os resultados experimentais permitiram ilustrar que, com a variação da radiação, os valores de tensão sofrem uma pequena variação e os valores de corrente uma variação mais acentuada.

Os valores de potência teóricos e experimentais encontram-se muito próximos, tendo um erro relativo na ordem dos 4%, com a excepção do último valor que tem um erro relativo na ordem dos 9,4%, sendo este valor compreensível face ao aumento do ruído quando a corrente é inferior.

É ainda de notar nas figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 ao diminuir a corrente (radiação) o ruído inerente ao circuito começa a ter algum peso, provocando mais oscilações na corrente. Devido a estas variações na corrente, o MPPT origina uma variação na tensão contínua tendendo esta a apresentar algumas sobretensões.

Simulação em matlab simulink das figuras experimentais obtidas com o protótipo de painel.

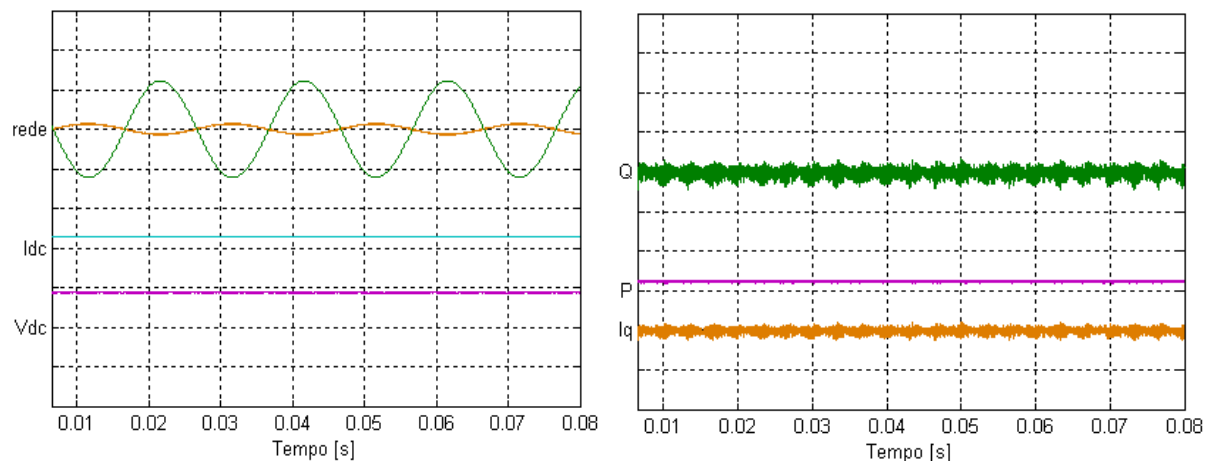


Figura 5.11 - Simulação para mesmas condições da figura 5.7

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)

Verde – Tensão simples V_a (20V/Div)

Azul – Corrente Contínua (5A /Div)

Roxo – Tensão Contínua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)

Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAr/Div)

Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

Simulação em *matlab simulink* das figuras experimentais obtidas com o simulador de painel (continuação)

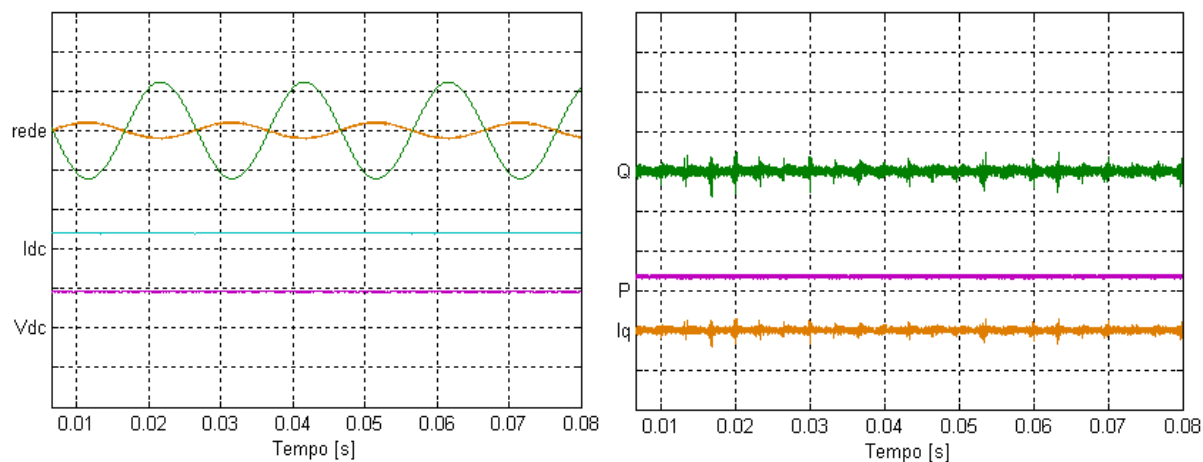


Figura 5.12 - Simulação para mesmas condições da figura 5.8

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)

Verde – Tensão simples V_a (20V/Div)

Azul – Corrente Continua (5A /Div)

Roxo – Tensão Continua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)

Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAR/Div)

Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

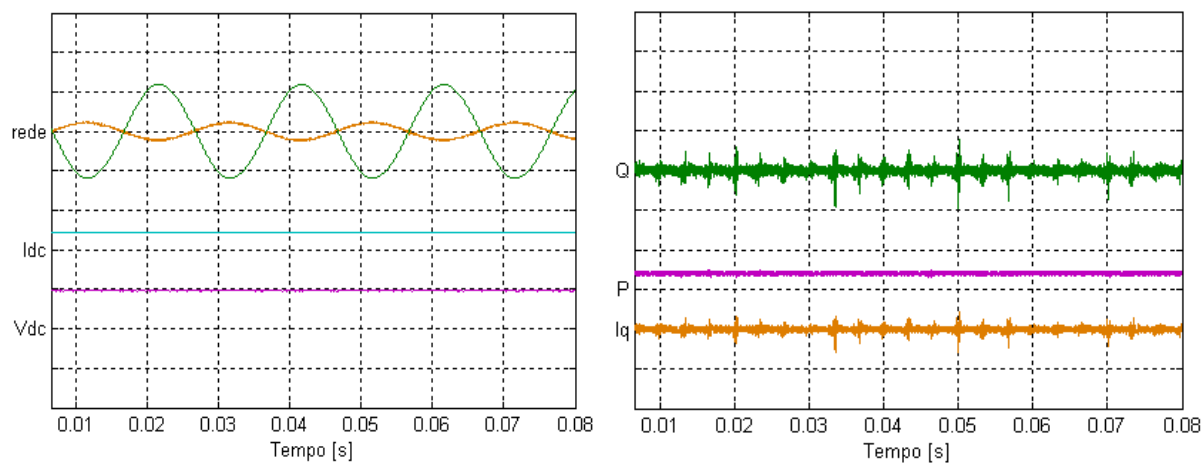


Figura 5.13 - Simulação para mesmas condições da figura 5.9

a) Corrente e tensões visualizadas

Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)

Verde – Tensão simples V_a (20V/Div)

Azul – Corrente Continua (5A /Div)

Roxo – Tensão Continua (20V /Div)

b) Corrente, tensão e potências visualizadas

Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)

Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAR/Div)

Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)

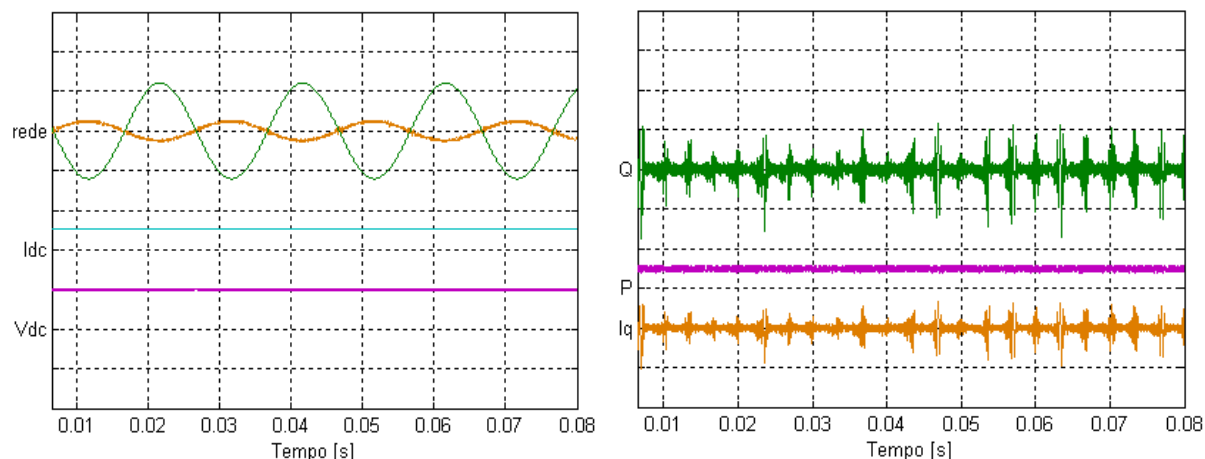


Figura 5.14 - Simulação para mesmas condições da figura 5.10

- | | |
|--|---|
| <p>a) Corrente e tensões visualizadas</p> <p>Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)</p> <p>Verde – Tensão simples V_a (20V/Div)</p> <p>Azul – Corrente Contínua (5A /Div)</p> <p>Roxo – Tensão Contínua (20V /Div)</p> | <p>b) Corrente, tensão e potências visualizadas</p> <p>Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)</p> <p>Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAR/Div)</p> <p>Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)</p> |
|--|---|

Observando as figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 e comparando-as com os resultados experimentais, verifica-se que o ruído é inferior. No entanto verificam-se pequenas variações na corrente contínua devido à comutação dos semicondutores, originando consequentemente variações na tensão contínua.

5.3 Variação das condições de operação

Nestes ensaios mantém-se a corrente na fonte e altera-se a tensão do lado da rede.

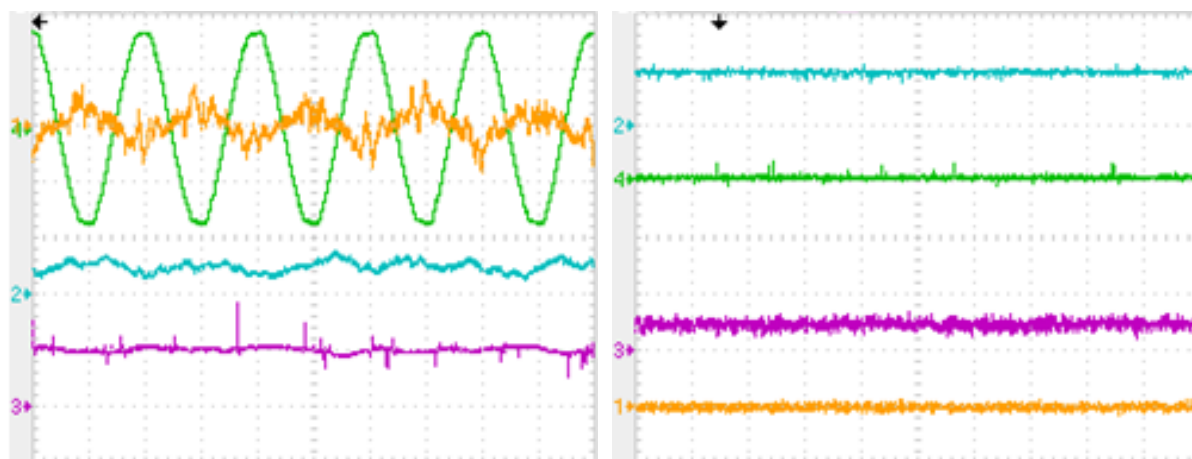


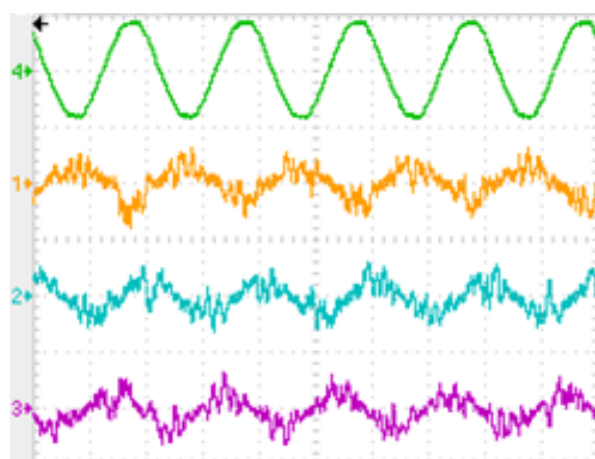
Figura 5.15 – Simulador do painel (diodo+transistor) com 40V na rede

- | | |
|---|---|
| <p>a) Corrente e tensões visualizadas</p> <p>Amarelo – Corrente injectada na rede (2A/Div)</p> <p>Verde – Tensão simples amostrada V_a (200V/Div)</p> <p>Azul – Corrente Contínua (5A /Div)</p> <p>Roxo – Tensão Contínua (20V /Div)</p> | <p>b) Corrente, tensão e potências visualizadas</p> <p>Amarelo – Componente I_q da Corrente (2A/Div)</p> <p>Verde – Potência Reactiva injectada na rede (4VAR/Div)</p> <p>Azul – Tensão Contínua (20V/Div)</p> <p>Roxo – Potência Activa injectada na rede (105 W/Div)</p> |
|---|---|

Verifica-se que, à medida que se aumenta a tensão da rede a potência injectada na rede é aproximadamente a mesma. A corrente tende a diminuir ligeiramente mantendo o balanço de energia inalterado. No entanto, a corrente começa a ter uma maior ondulação provocando algumas oscilações de corrente.

Tabela 5.3- Valores de potência para diferente tensão na rede

| Tensão da rede [V] | V_{mp} [V] | I_{mp} [A] | P_{mp} [W] | Figura |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 30 | 19,91 | 2,62 | 52,16 | Figura 5.7 |
| 40 | 20,12 | 2,44 | 49,09 | Figura 5.15 |



a) Corrente e tensão de amostragem visualizadas
Verde – Tensão simples amostrada V_a (400V/Div)
Amarelo – Corrente injectada na rede (I_a) (2A/Div)
Azul – Corrente injectada na rede (I_b) (2A/Div)
Roxo – Corrente injectada na rede (I_c) (2A/Div)

Figura 5.16 – Simulador (diodo+transistor) com uma tensão na rede de 35V

Na figura 5.16 pode verificar-se que as correntes se encontram desfasadas de 120° entre si, e que a corrente I_a está em oposição face à tensão de amostragem V_a (medição no sentido da rede para o conversor).

6. Conclusão

Esta dissertação teve como objectivo o estudo de um sistema que permitisse a ligação de um painel fotovoltaico à rede de energia através de um conversor matricial.

Através do estudo teórico do painel foi possível analisar o seu comportamento (variação da corrente de curto-circuito, da tensão em vazio e do seu ponto de potência máxima) face a variações da radiação e temperatura. No entanto apenas pode ser testada em laboratório a variação da radiação no protótipo alterando a corrente na fonte.

O simulador do painel fotovoltaico construído no laboratório, permitiu obter uma característica V-I próxima do painel KC50T, apresentando um erro na ordem dos 3% para a tensão em vazio e 1,5% para a corrente de curto-circuito. No entanto, estes erros podem ser melhorados com a introdução de um diodo adicional, que permitirá aumentar ligeiramente a tensão do painel. Verificou-se ainda que a curva característica V-I (anexo E) do simulador do painel sofreu alterações quando o painel foi ligado ao sistema, devido à ocorrência de perdas nos diodos.

Pelos resultados experimentais obtidos verificou-se que o conversor está a ser controlado, garantindo a máxima potência activa entregue à rede e potência reactiva nula. Isto significa que a corrente injectada na rede é sinusoidal e está em oposição de fase em relação à tensão.

Em laboratório foram realizados testes, em que se fez variar a corrente na fonte, que ilustraram variações na radiação solar. Estes testes permitiram verificar o funcionamento do MPPT na busca da corrente e tensão que permitissem um ponto de operação de potência máximo. Os valores obtidos em laboratório foram concordantes com os de simulação.

Através das visualizações das potências, especialmente a reactiva, e observação da tensão e corrente concluiu-se que o controlador das correntes funciona correctamente em laboratório, permitindo que a corrente e tensão se encontrem em fase e que a potência reactiva seja o mais próxima de zero possível.

Apesar dos bons resultados obtidos nesta dissertação, ainda existem factores que podem ser melhorados em dissertações futuras. O uso de um painel real, em vez de um protótipo, pode fornecer valores mais próximos dos referenciados pelos fabricantes, pois não é esperado que estes sejam influenciados pelo circuito a montante. É ainda possível melhorar o controlo do conversor, pois consoante o erro, pode aplicar-se um vector mais correcto, ou seja, para um erro pequeno aplicar um vector pequeno e um erro grande aplicar um vector maior, o que permitirá diminuir a frequência de comutação e o tremor das variáveis controladas.

7. Bibliografia

- [1] Alesina, A.; Venturini, M.; 'Solid State Power Conversion: A Fourier Analysis Approach to Generalized Transformer Synthesis'; IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-28, No 4, Abril 1981, pp. 319-330.
- [2] Rivera M.; Vargas R.; Espinoza J.; Rodríguez J.; Wheeler P. and Silva C., 'Current Control in Matrix Converters Connected to Polluted AC Voltage Supplies', Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference 2008, Rhodes, Greece, Junho 2008.
- [3] Matteini; 'Fundamentals of Matrix Converter', [online] http://www.die.ing.unibo.it/dottorato_it/Matteini/Matteini_PhD_part2.pdf
- [4] Adamo F.; Attivissimo F.; Di Nisio A.; Lanzolla A. M. L. and Spadavecchia M.; 'Parameters Estimation for A Model of Photovoltaic Panels', in *XIX IMEKO World Congress of Fundamental and Applied Metrology*, Lisbon, Portugal, 6 a 11 de Setembro, 2009
- [5] Castañer L. and Silvestre S.; 'Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice', John Wiley & Sons, LTD, *Universidade Politécnica de Catalunya, Barcelona*, England, 2002
- [6] Kyocera, 'KC50T - High Efficiency Multicristal Photovoltaic Module', [online], <http://www.kyocerasolar.com.au/pdf/kc50t.pdf>
- [7] Votzi H.; Himmelstoss F. A. and Ertl H.; 'Basic Linear-Mode Solar-Cell Simulators', Proc of IEEE 35th Annual Conference of the Industrial Electronics Society - IECON '09, Porto, Portugal, Novembro 2009.
- [8] Huber, L.; Borojevic, D.; Burany, N.; 'Analysis, Design and Implementation of the Space-Vector Modulator for Forced-Commutated Cycloconverters'; IEE Proceedings-B Electric Power Applications, Vol.139, No 2, March 1992, pp. 103-113.
- [9] Motto E. R.; Donlon J. F.; Tabata M.; Takahashi H.; Yu Y. and Majumdar G.; 'Application Characteristics of an Experimental RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT) Module', Proc of IEEE Industry Applications Conference 2004, 39th IAS Annual Meeting, Seattle, USA, Outubro 2004
- [10] Santos C.; 'Aplicação de Conversores Matriciais em Sistemas Fotovoltaicos', Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2007.
- [11] She H.; Lin H.; Wang X. and Yue L.; 'Damped Input Filter Design of Matrix Converter', Proc of IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2009, Taipei, Taiwan, Novembro 2009.
- [12] Monteiro J.; 'Conversão Matricial Trifásica no Condicionamento do Trânsito de Energia Eléctrica', PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, July 2010.
- [13] Silva J., 'Input LC Filters For Power Converters', Cie3,IST,TULisbon, 2010
- [14] Hohm P. and Ropp E.; 'Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed'. Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth, in *IEEE*, 2000.
- [14] Marques G.; 'Dinâmica das Máquinas Eléctricas', Instituto Superior Técnico, Setembro 2007
- [15] Willems J.; 'A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations', *Transactions on Instrumentation and Measurement*, VOL. 41, NO. 4,

in IEEE August 1992

- [16] Villalva M; Gazoli J. and Ruppert Filho E.; 'Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays' *in 10th Brazilian Power Electronics Conference*, 2009
- [17] Pinto S.F.; Silva J.F.; Sliding Mode Direct Control of Matrix Converters, IET Electric Power Applications, vol.1, no.3, pp. 439-448, Maio 2007.

ANEXOS

ANEXO A

O factor de idealidade depende da tecnologia de construção dos painéis, de acordo com os valores apresentados na tabela A.1.

Tabela A.1- Factor n dependente da tecnologia

| Tecnologia | Factor idealidade n |
|-------------------|----------------------------|
| Si-mono | 1.2 |
| Si-poly | 1.3 |
| a-Si:H | 1.8 |
| a-Si:H tandem | 3.3 |
| a-Si:H triple | 5 |
| CdTe | 1.5 |
| CIS | 1.5 |
| AsGa | 1.3 |

ANEXO B

O valor de tensão e corrente observados em laboratório para o protótipo construído encontram-se na tabela abaixo:

Tabela B.1- Valores obtidos laboratorialmente

| Valores de corrente e tensão obtidos laboratorialmente com protótipo de painel fotovoltaico | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Corrente [A] | Tensão [V] | Potência [W] | Corrente [A] | Tensão [V] | Potência [W] | Corrente [A] | Tensão [V] | Potência [W] |
| 3,3 | 0,5 | 1,650 | 3,11 | 17,5 | 54,425 | 2,69 | 19,1 | 51,379 |
| 3,29 | 0,90 | 2,961 | 3,10 | 17,6 | 54,560 | 2,64 | 19,2 | 50,688 |
| 3,28 | 4,20 | 13,776 | 3,09 | 17,7 | 54,693 | 2,59 | 19,3 | 49,987 |
| 3,27 | 5,70 | 18,639 | 3,07 | 17,8 | 54,646 | 2,53 | 19,4 | 49,082 |
| 3,26 | 7,10 | 23,146 | 3,05 | 17,9 | 54,595 | 2,45 | 19,5 | 47,775 |
| 3,25 | 8,40 | 27,300 | 3,04 | 18,0 | 54,720 | 2,37 | 19,6 | 46,452 |
| 3,25 | 9,20 | 29,900 | 3,02 | 18,1 | 54,662 | 2,29 | 19,7 | 45,113 |
| 3,25 | 10,1 | 32,825 | 3,00 | 18,2 | 54,600 | 2,20 | 19,8 | 43,560 |
| 3,24 | 11,4 | 36,936 | 2,98 | 18,3 | 54,534 | 2,10 | 19,9 | 41,790 |
| 3,24 | 12,2 | 39,528 | 2,96 | 18,4 | 54,464 | 1,92 | 20,0 | 38,400 |
| 3,23 | 13,0 | 41,990 | 2,92 | 18,5 | 54,020 | 1,82 | 20,1 | 36,582 |
| 3,23 | 14,4 | 46,512 | 2,90 | 18,6 | 53,940 | 1,61 | 20,2 | 32,522 |
| 3,22 | 15,1 | 48,622 | 2,86 | 18,7 | 53,482 | 1,44 | 20,3 | 29,232 |
| 3,21 | 16,3 | 52,323 | 2,82 | 18,8 | 53,016 | 1,20 | 20,4 | 24,480 |
| 3,15 | 17,3 | 54,495 | 2,80 | 18,9 | 52,920 | 0 | 21 | 0 |
| 3,13 | 17,4 | 54,462 | 2,74 | 19,0 | 52,060 | | | |

ANEXO C

O conversor matricial AC-AC tem 27 estados possíveis, representados na tabela C.1, que podem ser separados e analisados em três grupos. No primeiro grupo cada fase de saída está directamente ligada à fase de entrada, tendo com isso seis combinações possíveis. Neste caso o ângulo de fase do vector de tensão de saída depende do ângulo da fase do vector de tensão de entrada. No segundo grupo existem 18 combinações de interruptores possíveis, tendo o vector de tensão uma amplitude variável. A amplitude da tensão de saída depende da tensão de entrada seleccionada e a fase da tensão de saída não depende da fase do vector da tensão de entrada. No terceiro e último grupo existem três combinações de ligação dos interruptores que dão origem ao vector zero. Neste caso todas as fases de saída estão ligadas à mesma fase de entrada **Erro! A**

Tabela C.1 – Estados do conversor matricial AC-AC

origem da referência não foi encontrada..

| Estado | S ₁₁ | S ₁₂ | S ₁₃ | S ₂₁ | S ₂₂ | S ₂₃ | S ₃₁ | S ₃₂ | S ₃₃ |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 13 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 14 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 16 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 19 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 22 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 23 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 24 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 25 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

ANEXO D

a. Painel fotovoltaico

Este bloco tem como objectivo simular um painel fotovoltaico, sendo G a radiação e T a temperatura. Geralmente, o painel é representado por uma fonte de corrente em paralelo com uma série de díodos. No entanto, neste trabalho, foi usada uma fonte controlada de tensão, cujo valor é obtido por resolução da equação (2.4) em ordem à tensão considerando-se o painel como ideal ($R_s=0$ e $R_{sh}=\infty$). Nestas condições, obteve-se a equação (D.1).

$$V = nV_t \log\left(\frac{-I_{dc} + I_{pv}}{I_o} + 1\right) \quad (D.1)$$

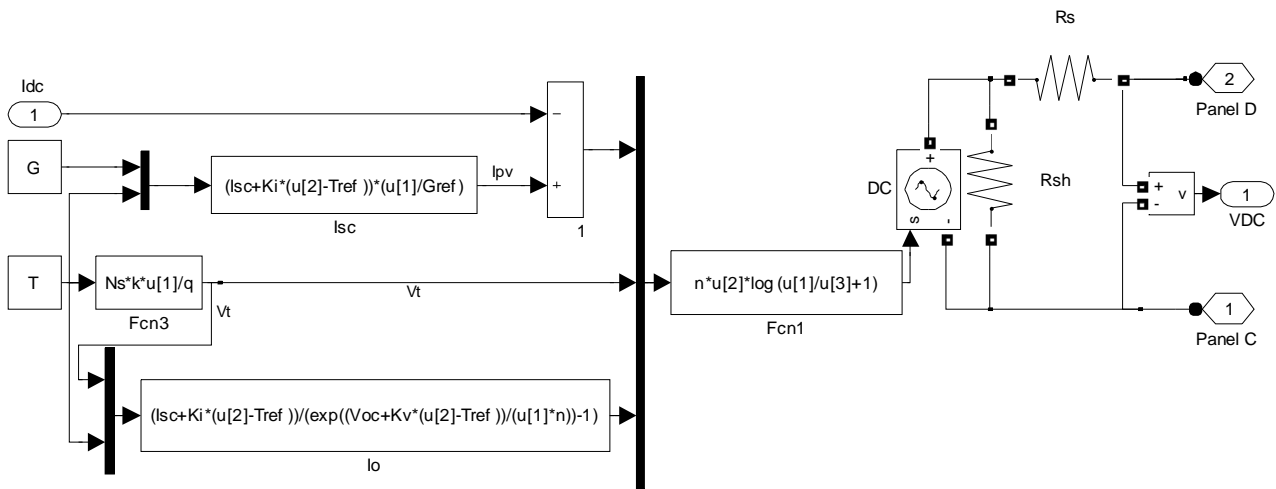


Figura D.1 - Esquema para simulação de painel fotovoltaico

b. Bloco de controlo

Este bloco tem por objectivo efectuar o controlo do sistema (através do comando dos semicondutores) através das correntes e tensões da rede e da tensão e corrente no painel.

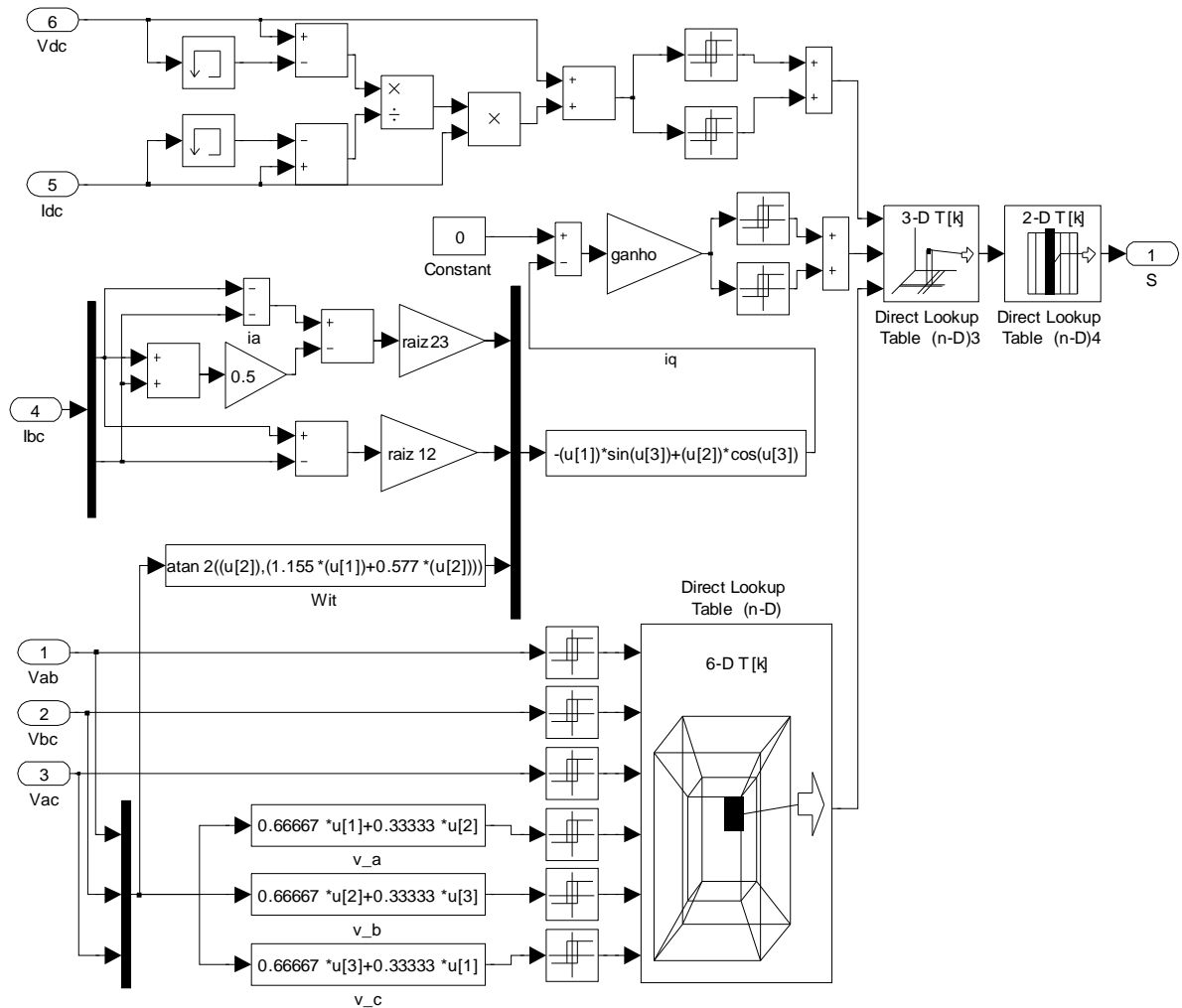


Figura D.2 – Blocos de controlo dos semi-condutores

Para efectuar uma explicação mais detalhada deste bloco optou-se por dividi-lo em três sub-blocos.

i. Bloco divisão zonas de Tensão

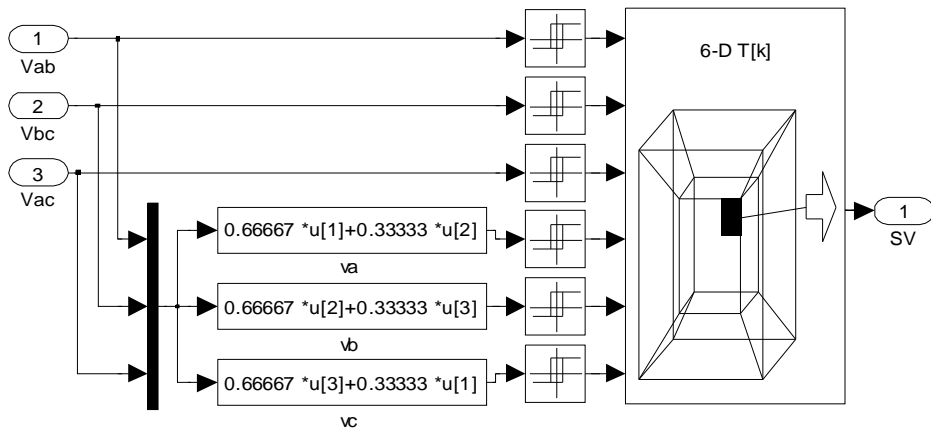


Figura D.3 – Bloco para divisão de zonas

Este bloco tem como objectivo dividir a tensão em 6 zonas distintas de modo a que se possam identificar as zonas onde ocorrem os máximos e mínimos de tensão.

As tensões (compostas ou simples) podem ser positivas ou negativas, pelo que o comparador toma o valor lógico 1 ou 0 na sua saída quando a tensão tem amplitude positiva ou negativa, respectivamente. Observando as formas de onda das tensões representadas na figura D.4 pode verificar-se, por exemplo, que para a zona de tensão 2 as tensões V_{bc} , V_a e V_b são positivas (valor lógico 1) e que as tensões V_{ac} e V_c são negativas (valor lógico 0). Na zona 2 a tensão V_{ab} pode ser positiva ou negativa, pelo que pode ter o valor lógico 1 ou 0, sendo representada na tabela D.1 por x.

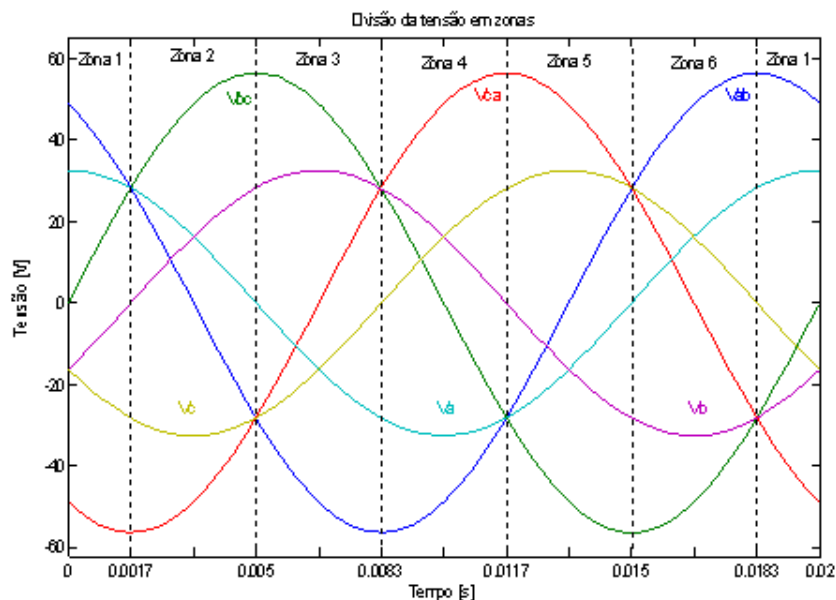


Figura D.4 – Divisão das tensões simples e compostas 6 zonas distintas

Tabela D.1 - Tensões de entrada e respectiva zona de tensão

| Tensão | Valor lógico | | | | | |
|-----------|--------------|---|---|---|---|---|
| V_{ab} | 1 | x | 0 | 0 | x | 1 |
| V_{bc} | x | 1 | 1 | x | 0 | 0 |
| V_{ac} | 0 | 0 | x | 1 | 1 | x |
| V_a | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| V_b | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| V_c | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Zona (SV) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

As tensões simples são obtidas através das tensões compostas, possibilitando deste modo usar menos sensores de aquisição de dados (tensões) aquando da sua realização em laboratório.

ii. Bloco de controlo da potência reactiva

O bloco da figura D.5 possibilita controlar as correntes, originando um sinal SQ de modo a garantir que a componente q da corrente seja nula, o que implica uma potência reactiva nula.

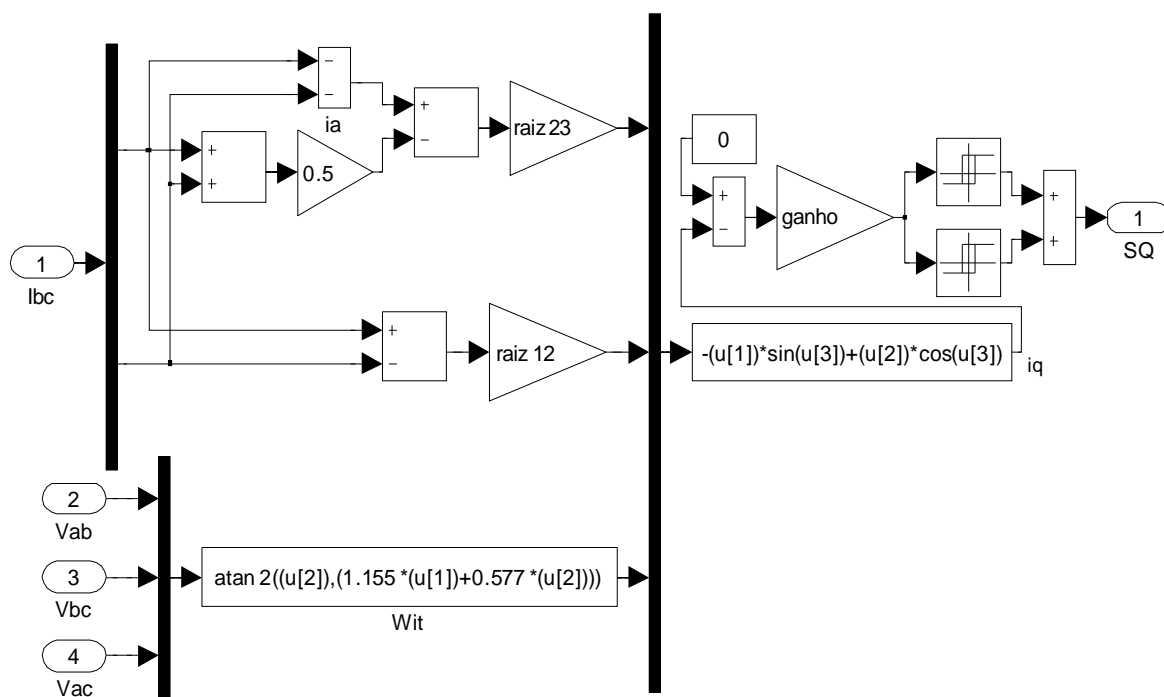


Figura D.5 – Bloco de controlo da corrente

Aplicou-se a transformada de Blondel-Park (composição da transformação de Clark Concordia e da transformação de rotação de referencial) nas correntes de entrada, permitindo assim a passagem de coordenadas abc para dq. Para garantir que as correntes estão em fase com a tensão, a componente q da corrente injectada na rede deverá ser zero. Com base no resultado do

erro da corrente de entrada o comparador de 3 níveis utilizado deverá apresentar os seguintes valores:

$$\begin{aligned} I_q < 0 &\rightarrow S_q = 0 \\ I_q \cong 0 &\rightarrow S_q = 1 \\ I_q > 0 &\rightarrow S_q = 2 \end{aligned} \quad (D.1)$$

O bloco Wit permite efectuar o sincronismo com tensão da rede de energia eléctrica, recebendo para isso as três tensões compostas.

É ainda de notar que a corrente I_a não é adquirida através de nenhum sensor de aquisição de dados, sendo calculada através das correntes I_b e I_c .

iii. Bloco MPPT

Para efectuar o MPPT é necessário recorrer à equação (4.2) rescrevendo-a de acordo com (D.2)

$$\frac{dP}{dV} = 0 \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = i(t) + v(t - \Delta t) \frac{(i(t) - i(t - \Delta t))}{(v(t) - v(t - \Delta t))} = 0 \quad (D.2)$$

A partir desta equação é possível obter-se o módulo MPPT (figura D.6) em *simulink*, recorrendo a dois blocos que permitem guardar o estado anterior da corrente e tensão do painel.

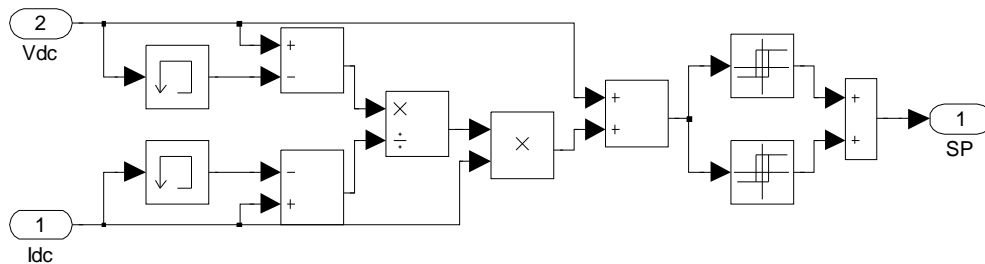


Figura D.6 - MPPT

O controlador irá actuar de acordo com o sinal da derivada da potência, S_p , que irá tomar os seguintes valores:

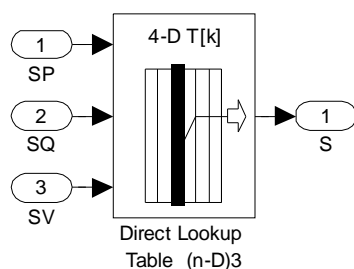
$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} < 0 &\rightarrow S_p = 0 \\ \frac{dP}{dV} \cong 0 &\rightarrow S_p = 1 \\ \frac{dP}{dV} > 0 &\rightarrow S_p = 2 \end{aligned} \quad (D.2)$$

c. Controlo do conversor

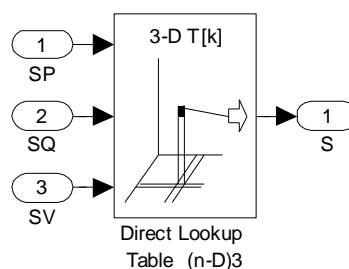
Para possibilitar um correcto controlo do conversor, tem de se ter em atenção a derivada da potência (S_p) e a componente reactiva da corrente injectada na rede (S_q), como se encontra descrito na tabela D.2.

Tabela D.2 – Conjugação dos sinais S_p e S_q

| $S_q \backslash S_p$ | 0 | 1 | 2 |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0 | $\frac{dP}{dV} > 0$ $I_q < 0$ | $\frac{dP}{dV} = 0$ $I_q < 0$ | $\frac{dP}{dV} < 0$ $I_q < 0$ |
| 1 | $\frac{dP}{dV} > 0$ $I_q = 0$ | $\frac{dP}{dV} = 0$ $I_q = 0$ | $\frac{dP}{dV} < 0$ $I_q = 0$ |
| 2 | $\frac{dP}{dV} > 0$ $I_q > 0$ | $\frac{dP}{dV} = 0$ $I_q > 0$ | $\frac{dP}{dV} < 0$ $I_q > 0$ |



a) Controlo para simulink



b) Controlo para laboratório

Figura D.7 – Bloco de junção dos sinais de controlo

Estes blocos apresentam a compilação dos três sinais de entrada segundo a tabela D.2, dando origem à saída S que controlará os semicondutores. Uma vez que a parte laboratorial foi efectuada de um modo diferente (conversão do estado em hexadecimal e só depois a activação dos semicondutores) existe uma tabela para o laboratório e uma para a simulação computacional, onde o resultado final é igual.

A figura de laboratório (figura D.7 b) recebe os sinais de controlo e coloca na sua saída uma combinação numerada entre 1 e 27 (é de notar que são 27 combinações e não 9 como referido anteriormente pois o conversor já implementado em laboratório é um AC-AC, pelo que se terá necessidade de controlar o terceiro braço colocando-o sempre a 1 0 0 [S31 S32 S33]. A figura de controlo para *simulink* (figura D.7 a)) tal como a anterior também tem na sua entrada os mesmos

sinais de controlo, no entanto a sua saída é um vector **S** onde **S**=[S11 S12 S13 S21 S22 S23 S31 S32 S33]

Para uma mais fácil representação serão efectuadas 3 tabelas onde SQ será mantido constante em cada uma delas.

Tabela D.3 – Sinais de controlo

| SQ = 0 | | SP | | |
|--------|---|----|----|----|
| | | 0 | 1 | 2 |
| SV | 1 | 14 | 6 | 11 |
| | 2 | 17 | 14 | 6 |
| | 3 | 2 | 17 | 14 |
| | 4 | 8 | 2 | 17 |
| | 5 | 11 | 8 | 2 |
| | 6 | 6 | 11 | 8 |

| SQ = 1 | | SP | | |
|--------|---|----|----|----|
| | | 0 | 1 | 2 |
| SV | 1 | 17 | 25 | 11 |
| | 2 | 2 | 25 | 6 |
| | 3 | 8 | 25 | 14 |
| | 4 | 11 | 25 | 17 |
| | 5 | 6 | 25 | 2 |
| | 6 | 14 | 25 | 8 |

| SQ = 2 | | SP | | |
|--------|---|----|----|----|
| | | 0 | 1 | 2 |
| SV | 1 | 17 | 2 | 8 |
| | 2 | 2 | 8 | 11 |
| | 3 | 8 | 11 | 6 |
| | 4 | 11 | 6 | 14 |
| | 5 | 6 | 14 | 17 |
| | 6 | 14 | 17 | 2 |

No programa de simulação, não sendo necessária a codificação para hexadecimal é logo gerado o vector correspondente ao estado da tabela 3.1, por exemplo para o estado 14 gera S=[1 0 0 0 1 0 1 0 0].

ANEXO E

Para permitir uma análise dos resultados obtidos, efectuaram-se medições de valores de tensão e corrente para uma série de 22 e 36 díodos, tendo-se posteriormente calculado os valores da potência. Dessa forma foi possível obter os valores de tensão e de corrente para os quais a potência é máxima.

Tabela E.1 – Tabela com valores experimentais do simulador laboratorial do painel fotovoltaico realizado com ligação em série de díodos de potência.

| Simulador com 22 díodos | | | Simulador com 36 díodos | | |
|-------------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Tensão [V] | Corrente [A] | Potência [W] | Tensão [V] | Corrente [A] | Potência [W] |
| 0 | 7,65 | 0 | 0 | 7,65 | 0 |
| 6,80 | 7,63 | 51,88 | 5,0 | 7,64 | 38.20 |
| 13,00 | 7,62 | 99,06 | 13,4 | 7,63 | 102.22 |
| 14,00 | 7,59 | 106,26 | 22,6 | 7,61 | 171.99 |
| 14,60 | 7,58 | 110,67 | 26,4 | 7,30 | 192.72 |
| 16,32 | 7,35 | 119,95 | 27,9 | 7,00 | 195.30 |
| 17,60 | 6,87 | 120,91 | 28,4 | 6,80 | 193.12 |
| 18,60 | 6,4 | 119,04 | 29,2 | 6,57 | 191.84 |
| 19,20 | 6,0 | 115,20 | 30,0 | 6,20 | 186.00 |
| 20,00 | 5,5 | 109,60 | 31,0 | 5,90 | 182.90 |
| 21,00 | 4,7 | 99,33 | 32,0 | 5,36 | 171.52 |
| 21,90 | 4,1 | 89,79 | 32,9 | 4,74 | 155.95 |
| 22,60 | 3,5 | 79,78 | 33,8 | 4,20 | 141.96 |
| 23,00 | 3,1 | 72,22 | 34,0 | 3,94 | 133.96 |
| 24,00 | 2,3 | 54,00 | 34,8 | 3,65 | 127.02 |
| 24,60 | 1,7 | 42,07 | 35,8 | 3,00 | 107.40 |
| 25,26 | 1,1 | 28,29 | 36,3 | 2,48 | 90.02 |
| 25,37 | 1,0 | 25,37 | 37,0 | 2,19 | 81.03 |
| 26,8 | 0 | 0 | 37,4 | 1,89 | 70.69 |
| | | | 37,5 | 1,62 | 60,75 |
| | | | 37,9 | 1,50 | 56,85 |
| | | | 40,7 | 0 | 0 |

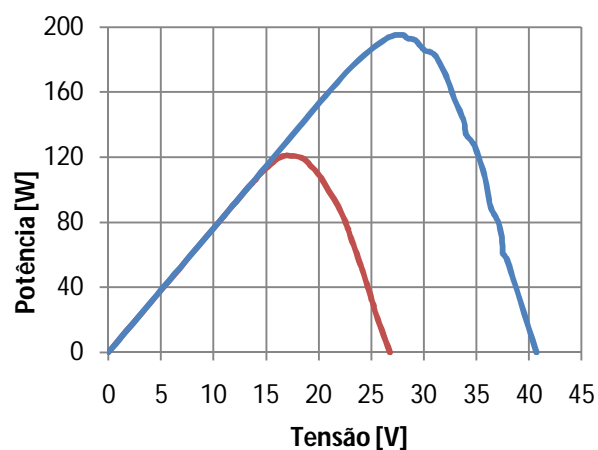
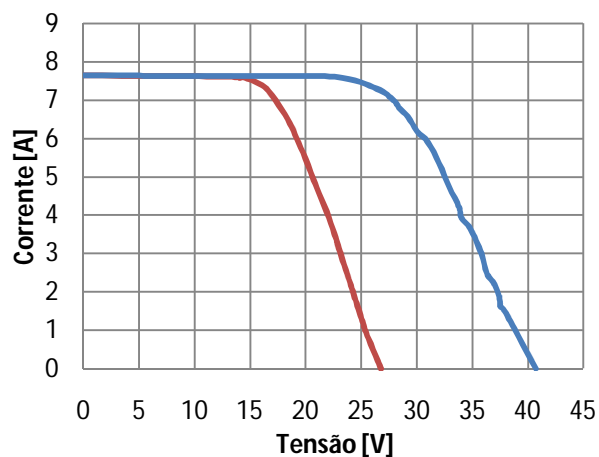
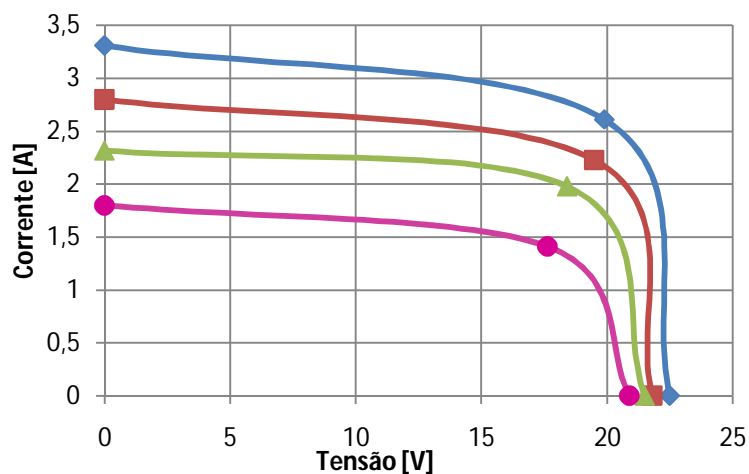


Figura E.1 – Característica V-I e curva de potência dos diodos

Vermelho – 22 diodos
Azul – 36 diodos

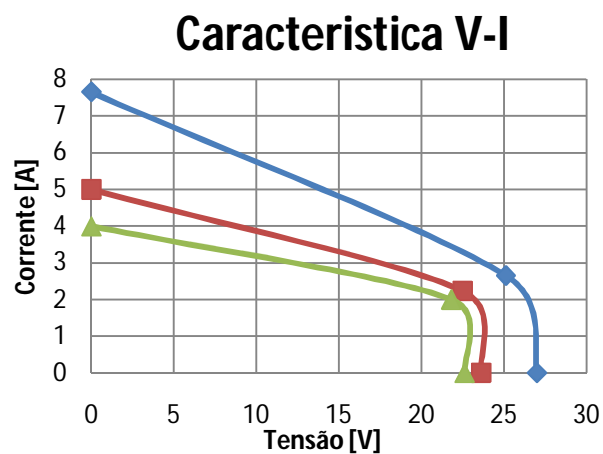
Vermelho – 22 diodos
Azul – 36 diodos

Para uma melhor compreensão do comportamento do protótipo, quando este se encontra ligado ao sistema (conversor+rede) em laboratório, foi obtida a sua característica (figura E.2), tendo por base 3 pontos notáveis de funcionamento: a corrente em curto-circuito, a tensão em vazio e o ponto de potência máximo.



Azul – $I_{sc}=3.31A$; Vermelho – $I_{sc}=2.8A$; Verde – $I_{sc}=2.3A$; Roxo – $I_{sc}=1.8A$

Figura E.2 - Característica V-I estimada do protótipo quando ligado ao conversor

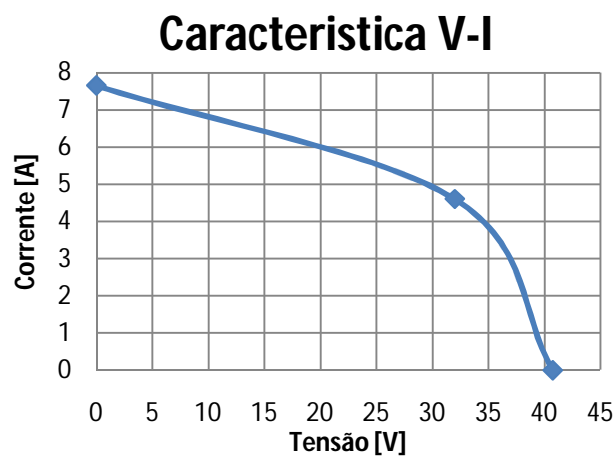


a) 22 diodos

Azul - Curva V-I para $I_{sc}=7.65A$

Vermelho - Curva V-I para $I_{sc}=6A$

Verde - Curva V-I para $I_{sc}=4A$



b) 36 diodos

Azul - Curva V-I para $I_{sc}=7.65A$

Figura E.3 – Característica V-I estimada dos diodos quando ligados ao conversor

ANEXO F

Foi construída uma placa de aquisição das tensões e correntes a enviar para o DSP. Esta placa encontra-se habilitada para três leituras de corrente através dos sensores LA25-NP e três leituras de tensão através dos sensores LV-25P.



Figura 0.1 – Placa de aquisição de dados