



**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**  
Universidade Técnica de Lisboa

## **Aplicação de Conversores Matriciais em Sistemas Fotovoltaicos**

**Carlos José Domingos dos Santos**

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

### **Júri**

Presidente:	Prof. Doutor Gil Domingos Marques
Orientador:	Prof <sup>ª</sup> . Doutora Sónia Maria Nunes dos Santos Paulo Ferreira Pinto
Co-Orientador:	Prof. Doutor José Fernando Alves da Silva
Vogal:	Prof. Doutor João José Esteves Santana

**Setembro 2007**

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer especialmente à Orientadora deste trabalho, a Professora Sónia Pinto, pela sua enorme paciência, disponibilidade e apoio ao longo de todo este trabalho, e ao Co-orientador, o Professor Fernando Silva, pela sua enorme experiência, sabedoria e ajuda nos momentos mais críticos.

Também tenho de agradecer o carinho e apoio incondicional dos meus pais e o constante incentivo de parte de toda a minha família.

A partilha de conhecimentos, experiências de trabalho, informações, o apoio e a ajuda do meu grupo de colegas foi muito importante ao longo destes anos e foi ainda mais para este trabalho, apoiando-nos uns aos outros nos momentos mais difíceis de cada um.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus amigos, pela sua capacidade de me animarem e pela sua compreensão.

## Resumo

Este trabalho teve como objectivo a aplicação de um conversor matricial como forma de interligação de um sistema fotovoltaico à rede eléctrica.

Nesta aplicação é necessário controlar o sistema de modo a garantir que o painel forneça sempre a potência máxima disponível (MPPT – Maximum Point Power Tracking) e controlar as correntes injectadas na rede de forma a que estas sejam alternadas sinusoidais e com factor de potência quase unitário.

Esse objectivo foi alcançado recorrendo ao controlo por modo de deslizamento e à técnica de representação dos estados do conversor na forma de vectores espaciais.

Foi criado um modelo de simulação de forma a testar o conjunto painel – conversor. Estas simulações tiveram como objectivo, determinar se o modelo era adequado, comparando os resultados de simulação com os resultados teóricos e, além disso, determinar o desempenho dos vários sistemas medindo os rendimentos obtidos e a distorção harmónica das correntes injectadas na rede.

Palavras-chave: Conversor matricial; Sistema fotovoltaico; MPPT; Factor de potência unitário; Controlo por modo de deslizamento; Modelação de vectores no espaço.

## **Abstract**

The aim of this work was the application of a matrix converter to connect a photovoltaic system to the electric network.

In this application it is necessary to control the system in order to guarantee that the photovoltaic panel will always output its maximum power (MPPT – Maximum Point Power Tracking) and control the electric network input currents so that they will be sinusoidal alternated currents and the power factor is nearly unitary.

This goal was achieved by using the slide mode control and the space vector modulation technique for the matrix converter.

A simulation model was created as a way to test the pair photovoltaic panel – converter. These simulations had the objective to validate the simulation model, comparing the results with the theoretic results and to determine the performance of all systems, measuring the efficiency and harmonic distortion of the network input currents.

Keywords: Matrix converter; Photovoltaic system; MPPT; Unitary power factor; Slide mode control; Space vector modulation.

# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice.....	iv
Lista de figuras .....	vi
Lista de tabelas .....	viii
Lista de abreviações.....	ix
<b>1 – Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – Sistema Fotovoltaico.....</b>	<b>3</b>
2.1 – Modelo matemático .....	3
2.2 – Modelo de simulação.....	6
2.3 – Influência da temperatura e radiação solar .....	9
<b>2.3.1 – Influência da radiação solar.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.2 – Influência da temperatura.....</b>	<b>11</b>
<b>3 – Conversor Matricial.....</b>	<b>14</b>
3.1 – Estrutura.....	15
3.2 – Modelo do conversor matricial.....	16
3.3 – Modelo do conversor matricial a operar como conversor DC/AC.....	19
<b>4 – Controlo do sistema .....</b>	<b>22</b>
4.1 – Técnica de modelação de vectores no espaço .....	22
4.2 – Controlo da Potência Gerada – MPPT .....	24
4.3 – Controlo do factor de potência das correntes injectadas na rede.....	29
4.4 – Controlo por modo de deslizamento.....	32
<b>5 – Resultados de Simulação.....</b>	<b>35</b>
5.1 – Teste com parâmetros fixos no tempo .....	35
<b>Ensaio 1: Variação de <math>I_s</math> – variação da radiação solar .....</b>	<b>36</b>
<b>Ensaio 2: Variação de <math>m</math> .....</b>	<b>38</b>
<b>Ensaio 3: Variação de <math>I_0</math>.....</b>	<b>39</b>
<b>Ensaio 4: Variação de <math>V_T</math>.....</b>	<b>40</b>
<b>Ensaio 5: Variação de <math>V_T</math> e <math>I_0</math> – variação de temperatura.....</b>	<b>41</b>
5.2 – Testes com parâmetros variantes no tempo .....	43

<b>Ensaio 1: Variação da radiação solar – entrada em escada .....</b>	<b>44</b>
<b>Ensaio 2: Variação da radiação solar – entrada sinusoidal .....</b>	<b>46</b>
<b>Ensaio 3: Variação da temperatura .....</b>	<b>48</b>
<b>Ensaio 4: Simulação de um “período solar” .....</b>	<b>50</b>
<i>5.3 – Conclusões dos testes realizados .....</i>	<i>53</i>
<b>6 – Conclusões.....</b>	<b>55</b>
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo A – Modelo de Simulação.....</b>	<b>58</b>
<i>A.1 – Bloco Sistema Fotovoltaico.....</i>	<i>58</i>
<i>A.2 – Bloco MPPT.....</i>	<i>59</i>
<i>A.3 – Bloco zona de tensão.....</i>	<i>59</i>
<i>A.4 – Bloco Transformação e SQ.....</i>	<i>60</i>
<i>A.5 – Bloco circuito de disparo.....</i>	<i>61</i>
<i>A.6 – Bloco geral.....</i>	<i>63</i>

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	3
Figura 2.2 – Circuito eléctrico equivalente uma célula fotovoltaica. ....	4
Figura 2.3 – Esquema de um módulo fotovoltaico.....	5
Figura 2.4 – Relação I-V de uma célula de silício cristalino. ....	6
Figura 2.5 – Esquema do conjunto conversor + sistema fotovoltaico.....	9
Figura 2.6 – Variação da radiação solar ao longo de um dia. ....	10
Figura 2.7 – Variação da característica I-V com a radiação solar em módulos Shell ST10. ....	10
Figura 2.8 – Variação da potência máxima com a radiação incidente.....	11
Figura 2.9 – Variação da temperatura ao longo de 24h, Évora, 19/09/07 – 20/09/07. ....	12
Figura 2.10 – Variação da característica I-V com a temperatura em módulos Shell SP140PC.....	12
Figura 2.11 – Variação da potência máxima com a temperatura. ....	13
Figura 3.1 – Esquema de um conversor matricial, realçando a estrutura em matriz.....	15
Figura 3.2 – Montagem do interruptor bidireccional.....	15
Figura 3.3 – Esquema em pormenor de um braço do conversor. ....	16
Figura 3.4 – Conversor matricial para aplicações DC/AC. ....	19
Figura 4.1 – Esquema do controlo do conjunto conversor + sistema fotovoltaico.....	22
Figura 4.2 – Vectores no plano $\alpha\beta$ . ....	24
Figura 4.3 – Simulação da relação P-I de um painel fotovoltaico.....	26
Figura 4.4 – Divisão do período das tensões compostas da rede eléctrica em zonas.....	27
Figura 4.5 – Localização do eixo d consoante a zona de tensão. ....	30
Figura 4.6 – Localização dos eixos d e q para a zona de tensão 1.....	31
Figura 4.7 – Deslizamento em torno da referência. ....	32
Figura 5.1 – Característica I-V teórica para vários níveis de radiação, G.....	37
Figura 5.2 – Rendimento em função de $I_s$ .....	38
Figura 5.3 – Característica I-V teórica para várias temperaturas, T. ....	42
Figura 5.4 – Correntes injectadas na rede. ....	43
Figura 5.5 – Sinal de entrada do modelo de simulação. ....	44
Figura 5.6 – Resposta de $I_{DC}$ , em cima, e $V_{DC}$ , em baixo, no tempo. ....	45
Figura 5.7 – Correntes injectadas na rede. ....	45
Figura 5.8 – Sinal de entrada do modelo de simulação. ....	46
Figura 5.9 – Resposta de $I_{DC}$ , em cima, e $V_{DC}$ , em baixo, no tempo. ....	47
Figura 5.10 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede.....	47
Figura 5.11 – Sinal de entrada de $V_T$ do modelo de simulação.....	48
Figura 5.12 – Sinal de entrada de $I_0$ , calculado a partir de $V_T$ .....	49
Figura 5.13 – Resposta de $I_{DC}$ , em cima, e $V_{DC}$ , em baixo, no tempo. ....	49
Figura 5.14 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede.....	50
Figura 5.15 – Sinais de entrada do modelo de simulação, $I_s$ , em cima, e $V_T$ , em baixo. ....	51

Figura 5.16 – Sinal de entrada de $I_0$ , calculado a partir de $V_T$ .....	51
Figura 5.17 – Resposta de $I_{DC}$ , em cima, e $V_{DC}$ , em baixo, no tempo. ....	52
Figura 5.18 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede. ....	52
Figura 5.19 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede para um caso alternativo. ....	53
Figura A.1 – Diagrama do sistema simulado.....	58
Figura A.2 – Bloco do sistema fotovoltaico.....	58
Figura A.3 – Bloco do MPPT .....	59
Figura A.4 – Bloco zona de tensão .....	60
Figura A.5 – Bloco Transformação.....	60
Figura A.6 – Bloco SQ.....	61
Figura A.7 – Bloco circuito de disparo.....	61
Figura A.8 – Bloco geral .....	63



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Dados, nas condições <i>standard</i> de teste, do módulo Shell SP75.....	7
Tabela 3.1 – 27 estados possíveis do conversor matricial.....	17
Tabela 3.2 – Relação entre as tensões e correntes de entrada e de saída do conversor para cada estado do conversor matricial. ....	18
Tabela 3.3 – Conjunto de estados para a transformação AC-DC. ....	20
Tabela 3.4 – Relação entre as tensões e correntes de entrada e de saída do conversor para cada estado do conversor DC-AC. ....	20
Tabela 4.1 – Módulo e argumento dos vectores no plano $\alpha\beta$ . ....	23
Tabela 4.2 – Efeito dos vectores de comutação na corrente do painel fotovoltaico, para cada zona de tensão .....	28
Tabela 4.3 – Efeito dos vectores de comutação na componente $i_q$ , para cada zona de tensão....	31
Tabela 5.1 – Resposta à variação do valor de $I_s$ .....	36
Tabela 5.2 – Resposta à variação do valor de $m$ . ....	39
Tabela 5.3 – Resposta à variação do valor de $I_0$ . ....	40
Tabela 5.4 – Resposta à variação do valor de $V_T$ .....	41
Tabela 5.5 – Resposta à variação da temperatura.....	42
Tabela A.1 – Efeitos da conjugação dos 2 sinais de controlo. ....	62
Tabela A.2 – Saída do bloco Lookup Table (2-D).....	62
Tabela A.3 – Saída do bloco Lookup Table (2-D)1.....	63

## Lista de abreviações

$I_S$  – Corrente eléctrica gerada pela radiação solar

$I_D$  – Corrente do díodo do circuito equivalente ao sistema fotovoltaico

$I_0$  – Corrente inversa máxima de saturação do díodo

$V$  – Tensão aos terminais do sistema fotovoltaico

$m$  – Factor de idealidade do díodo

$V_T$  – Potencial térmico

$K$  – Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/°K)

$T$  – Temperatura absoluta

$q$  – Carga eléctrica do electrão ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)

$I$  – Corrente de saída do sistema fotovoltaico

$N_{PM}$  – Número de células em paralelo no módulo fotovoltaico

$N_{SM}$  – Número de células em série no módulo fotovoltaico

$I_{\text{módulo}}$  – Corrente de saída do módulo fotovoltaico

$I_{\text{célula}}$  – Corrente de saída da célula fotovoltaica

$V_{\text{módulo}}$  – Tensão aos terminais do módulo fotovoltaico

$V_{\text{célula}}$  – Tensão aos terminais da célula fotovoltaica

$P_{\text{max}}^r$  – Potência máxima do sistema fotovoltaico em condições de referência

$V_{\text{max}}^r$  – Tensão no ponto de potência máxima do sistema fotovoltaico em condições de referência

$I_{\text{max}}^r$  – Corrente no ponto de potência máxima do sistema fotovoltaico em condições de referência

$V_{\text{oc}}^r$  – Tensão de circuito aberto em condições de referência

$I_{\text{sc}}^r$  – Tensão de curto-circuito em condições de referência

$G^r$  – Radiação solar de referência ( $1000 \text{ W/m}^2$ )

$T^r$  – Temperatura absoluta de referência (298,16 K)

$V_T^r$  – Potencial térmico em condições de referência

$I_S^r$  – Corrente gerada pela radiação solar em condições de referência

$I_0^r$  – Corrente inversa máxima de saturação do díodo em condições de referência

$E$  – Hiato do silício (1,12 eV)  
 $m'$  – Factor de idealidade equivalente do módulo ou painel  
 $I_{SC}$  – Corrente de curto-circuito  
 $S_{ij}$  – Estado do interruptor  $ij$  do conversor  
 $[S]$  – Matriz de estados do conversor, conversão AC/AC  
 $v_A, v_B, v_C$  – Tensões alternadas, carga/geração AC  
 $v_a, v_b, v_c$  – Tensões alternadas do lado da rede  
 $i_A, i_B, i_C$  – Correntes alternadas, carga/geração AC  
 $i_a, i_b, i_c$  – Correntes alternadas do lado da rede  
 $[S_f]$  – Matriz de estados do conversor, conversão DC/AC  
 $V_D, V_C$  – Tensões contínuas do lado do painel  
 $I_{DC}$  – Corrente contínua do lado do painel  
 $[C]$  – Matriz de transformação de Concordia  
 $v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}$  – Tensões compostas da rede  
 $v_\alpha, v_\beta$  – Tensões no plano  $\alpha\beta$   
 $v_0$  – Componente homopolar da tensão  
 $V_0$  – Módulo das tensões no plano  $\alpha\beta$   
 $\delta_0$  – Argumento das tensões no plano  $\alpha\beta$   
 $P_{max}$  – Potência máxima do sistema fotovoltaico  
 $P$  – Potência  
 $t$  – Tempo  
 $V_{max}$  – Tensão máxima do sistema fotovoltaico  
 $[P_B]$  – Matriz de transformação de Blondel-Park  
 $i_\alpha, i_\beta$  – Correntes no plano  $\alpha\beta$   
 $i_0$  – Componente homopolar da corrente  
 $i_d, i_q$  – Componentes directa e em quadratura da corrente  
 $S_P$  – Sinal de controlo da potência do sistema fotovoltaico  
 $S_Q$  – Sinal de controlo das correntes injectadas na rede eléctrica  
 $S_V$  – Sinal que determina a zona de tensão  
 $R_{ON}$  – Resistência de condução dos interruptores

THD – *Total Harmonic Distortion*, distorção harmónica total

$i_{iH}$  –  $i$ -ésima componente harmónica da corrente

$V_{DC}$  – Tensão contínua do lado do painel

# 1 – Introdução

No panorama energético actual existem duas preocupações centrais, do ponto de vista das entidades produtoras e reguladoras das redes eléctricas. Por um lado, o elevado preço do barril de crude, que apresenta uma tendência crescente para aumentar dado ser um recurso actualmente essencial e para o qual se prevê, num futuro próximo, a extinção das reservas naturais, leva os investigadores a pensar em energias alternativas, do foro das energias renováveis e portanto sem consumos associados a matérias primas. Por outro lado, o crescente número de conversores de energia ligados à rede eléctrica, em grande parte associados às energias renováveis devido à sua inconstância na produção ou incompatibilidade de acoplagem directa na rede existente, que são fonte de distorção das grandezas eléctricas (Santos, Honrado; 2006).

A associação do conversor matricial a sistemas fotovoltaicos vem satisfazer essas duas preocupações.

Todos os anos os investigadores encontram novas formas de aproveitar a energia disponível pela natureza. Desde o aproveitamento dos rios ao aproveitamento dos ventos, da exploração da energia das marés à exploração da energia geotérmica, entre muitas outras. Todas surgem como uma resposta insuficiente à necessidade de independência energética em relação aos combustíveis fósseis.

A energia solar destaca-se das restantes energias renováveis pela sua óbvia potencialidade, uma vez que o Sol é a maior fonte de energia natural. No entanto a energia fotovoltaica é, das energias renováveis, a menos explorada e a que maior esforço de investigação tem reunido nos últimos anos, devido ao enorme potencial que se adivinha.

São sistemas dispendiosos, que requerem um forte investimento inicial, e as actuais tarifas de venda de energia fotovoltaica à rede pública em vigor em vários países, como por exemplo Portugal, tornam esse investimento pouco atractivo e muitas vezes pouco rentável. A esses factores junta-se o rendimento reduzido dos sistemas de aproveitamento solar (no máximo 15%, 24% em ambiente de laboratório e as perdas devidas aos sistemas de conversão que interligam os painéis à rede eléctrica. Em contrapartida, são sistemas com poucas despesas de operação e manutenção e praticamente autónomos (Santos, Honrado; 2006) (Castro; 2007).

Daí surge a importância de procurar de todas as formas maximizar o rendimento destes sistemas, não só procurando alternativas que minimizem gastos em equipamento adicional mas também estudando técnicas de conversão alternativas como o conversor matricial.

Apesar de ser alvo de investigação intensa desde a década de 70, a tecnologia de conversão matricial é muito pouco explorada comercialmente. Existindo algumas aplicações interessantes e muitos estudos efectuados por várias universidades, não deixa de ser uma tecnologia relativamente jovem (Menino, Antunes; 2002).

Os primeiros a introduzir o estudo do conversor matricial foram B. Pelly e L. Gjugyi. Após a comunidade científica ter reconhecido as potencialidades deste conversor, seguiram-se muitas investigações no sentido de o otimizar (Menino, Antunes; 2002). De todos os investigadores destacam-se Alesina e Venturini, que introduziram a técnica de modelação do conversor a alta-frequência (Menino, Antunes; 2002) (Holmes, Lipo; 1989).

Posteriormente surgiram novas técnicas de controlo, algumas recorrendo a técnicas tradicionais como a técnica de comutação PWM (*Phase Width Modulation*) que permitiram aumentar o ganho de tensão e eliminar os picos de tensão e corrente que se verificavam nas técnicas anteriores (Oyama, Higushi, Tsukamoto; 1993) (Menino, Antunes; 2002).

Actualmente o método mais comum é o uso da técnica de modelação de vectores no espaço, também ela alvo de várias investigações (Menino, Antunes; 2002) (Garcia-Gil, Espí-Huerta, de la Calle, Maset, Castelló; 2004).

Acredita-se que estes conversores, não só são electricamente menos poluentes, como podem apresentar rendimentos superiores. A aplicação mais comum do conversor matricial é para a transformação AC-AC, onde as suas potencialidades são óbvias, pois vem substituir o conjunto rectificador – armazenamento de energia – inversor por um único conversor (Menino, Antunes; 2002) (Holmes, Lipo; 1989) (Garcia-Gil, Espí-Huerta, de la Calle, Maset, Castelló; 2004).

As aplicações para DC-AC que se pretendem testar são, à partida, menos aliciantes embora já se tenham realizado com sucesso experiências neste âmbito (Garcia-Gil, Espí-Huerta, de la Calle, Maset, Castelló; 2004) (Hosseini, Bababei; 2002) (Oyama, Higuchi, Abe, Matsuba, Teichmann; 2002) (Ejea, Sanchis-Kilders, Carrasco, Espí, Ferreres; 2002).

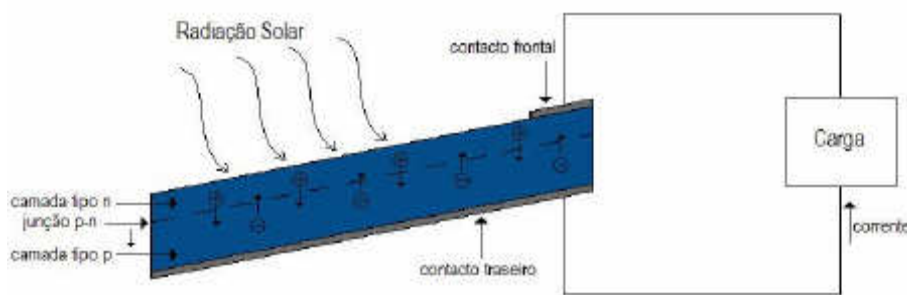
Este trabalho tem no entanto a particularidade de o sistema fotovoltaico ter as suas próprias limitações e características, que serão determinantes para os sistemas de controlo e por isso serão um factor diferenciador dos estudos já efectuados.

Neste relatório iremos primeiramente explicar o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, capítulo 2, o seu modelo matemático e a sua transposição para o modelo de simulação que se pretende obter, seguido do estudo da influência do meio ambiente no seu funcionamento. Em seguida iremos estudar o conversor matricial, capítulo 3, onde será explicada a sua topologia, indicando as particularidades do caso presente. O capítulo seguinte, capítulo 4, será sobre o sistema de controlo do conversor e do sistema fotovoltaico e as várias técnicas utilizadas para o realizar. No capítulo 5 serão realizadas várias simulações cujos resultados serão apresentados e sempre que possível comparados com resultados teóricos ou experimentais. Por fim no capítulo 6 temos as conclusões deste trabalho, nomeadamente no que diz respeito à validade do modelo de simulação e ao desempenho dos sistemas de controlo e do conjunto conversor – sistema fotovoltaico.

## 2 – Sistema Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico permite realizar a transformação de energia solar em energia eléctrica. Esta transformação resulta de processos químicos que geram uma diferença de potencial e dão origem a uma corrente eléctrica.

Os elementos mais pequenos destes sistemas são as células, constituídas por silício, material semiconductor, ao qual são adicionadas substâncias dopantes. As substâncias dopantes possuem cargas eléctricas e formam duas regiões distintas na célula: a região  $n$ , com cargas negativas e a região  $p$  com cargas positivas. Assim, o silício dopado fornece as condições adequadas para o efeito fotovoltaico, uma vez que ao ligar a célula a um circuito eléctrico, existirá uma permuta de cargas entre as regiões  $p$  e  $n$ , dando origem a uma corrente eléctrica.



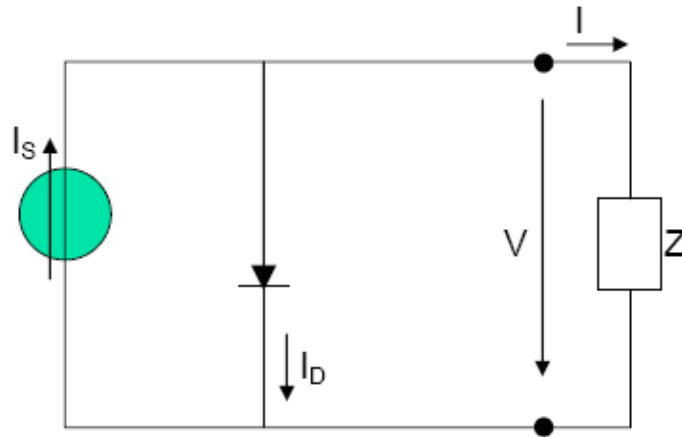
**Figura 2.1 – Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica.**

Existem três tipos de células fotovoltaicas: as de silício monocristalino, mais comuns no mercado e com rendimento superior, as de silício policristalino, mais baratas e com menores rendimentos que as anteriores, e as de silício amorfo, que apresentam os rendimentos mais baixos mas são muito utilizadas em aplicações domésticas pelo seu baixo custo.

Apresentando potências que não ultrapassam os 2 W, estas células podem ser associadas em série e em paralelo de forma a criar módulos que por sua vez podem ser associados em painéis, estes últimos apresentando potências consideravelmente superiores.

### 2.1 – Modelo matemático

A célula fotovoltaica pode ser representada por uma fonte de corrente,  $I_s$ , em anti-paralelo com um díodo.



**Figura 2.2 – Circuito eléctrico equivalente uma célula fotovoltaica.**

A corrente  $I_s$  representa a corrente eléctrica gerada pela radiação solar. O silício actua como um díodo pelo qual passa uma corrente,  $I_D$ , que depende da tensão  $V$  aos terminais da célula. A corrente  $I_D$  que se fecha através do díodo é dada por (2.1), onde  $I_0$  é a corrente inversa máxima de saturação do díodo,  $V$  é a tensão aos terminais da célula,  $m$  é o factor de idealidade do díodo e  $V_T$  é aquilo a que se designa por potencial térmico.

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

O potencial térmico,  $V_T$ , (2.2), depende de  $K$ , a constante de Boltzmann ( $K = 1,38 \times 10^{-23}$  J/°K), da temperatura absoluta da célula,  $T$  ( $0 \text{ °C} = 273,16 \text{ K}$ ), e da carga eléctrica do electrão,  $q$  ( $q = 1,6 \times 10^{-19}$  C).

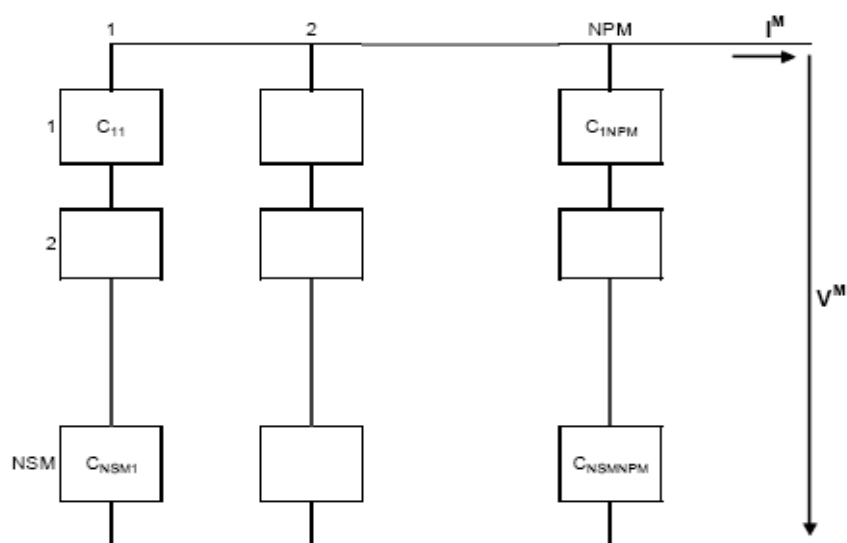
$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (2.2)$$

Assim, aplicando a lei das malhas ao circuito representado na figura 2.2, a corrente  $I$  que se fecha na carga será dada por (2.3).

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \left( e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$



Este modelo matemático da célula é análogo para os módulos (figura 2.3), bastando para tal considerar o módulo como uma célula fotovoltaica equivalente.



**Figura 2.3 – Esquema de um módulo fotovoltaico.**

Deste modo, considerando que  $N_{PM}$  e  $N_{SM}$  são, respectivamente, o número de células em paralelo e em série, a corrente de um módulo fotovoltaico passa a ser dada por (2.4).

$$I_{\text{módulo}} = I_{\text{célula}} * N_{PM} \quad (2.4)$$

Por sua vez, a tensão no módulo fotovoltaico é dada por (2.5):

$$V_{\text{módulo}} = V_{\text{célula}} * N_{SM} \quad (2.5)$$

Para um painel utiliza-se o mesmo raciocínio. Considera-se o painel um módulo equivalente que, por sua vez, pode ser representado por uma célula equivalente.

Desta forma é possível transpor o modelo matemático da célula para os módulos ou painéis que, pelas suas capacidades de fornecer maior potência, são mais interessantes de estudar.

## 2.2 – Modelo de simulação

Com base em (2.3), a relação I-V (corrente/tensão) num painel fotovoltaico pode ser representada por uma curva semelhante à apresentada na figura (2.4):

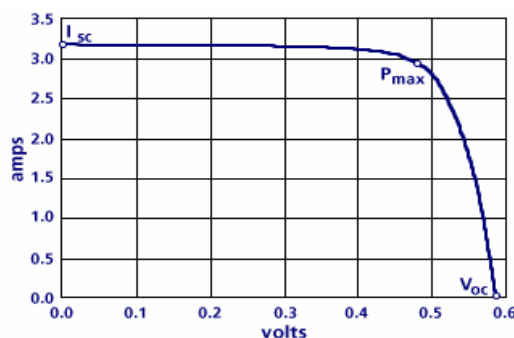


Figura 2.4 – Relação I-V de uma célula de silício cristalino.

Como se pode verificar na figura 2.4, à corrente máxima ( $I_{sc}$ ) corresponde o ponto de tensão nula e à tensão máxima ( $V_{oc}$ ) corresponde o ponto de corrente nula. Nenhum destes pontos de funcionamento é útil pois, uma vez que se pretende otimizar o rendimento do sistema, o ponto de funcionamento pretendido terá de ser o ponto de potência máxima.

Através de (2.3) é ainda possível determinar um modelo de simulação para o painel fotovoltaico. Optou-se por realizar o modelo em função da corrente de saída uma vez que o controlo do conversor será feito em corrente. Assim, utilizou-se a equação (2.6) para modelar o sistema fotovoltaico, onde  $I$  é o valor da corrente medida na carga.

$$V = mV_T \ln \left( \frac{I_s - I}{I_0} + 1 \right) \quad (2.6)$$

A tensão  $V$  e a corrente  $I$  são as grandezas eléctricas e, portanto, são as incógnitas deste sistema. O resto das variáveis ( $I_s$ ,  $m$  e  $I_0$ ) é possível conhecer através das características do painel e das condições de temperatura e radiação a que este está sujeito, que são os dados ou entradas do sistema.

Usualmente, os fabricantes de células, módulos e painéis fotovoltaicos indicam os valores de determinadas grandezas em certas condições de referência, permitindo o cálculo posterior das mesmas para quaisquer outras condições.

Na tabela 2.1 podemos ver o exemplo para o módulo da Shell, SP75, constituído por células de silício monocristalino.

**Tabela 2.1 – Dados, nas condições *standard* de teste, do módulo Shell SP75**

<b>Peak Power</b>	$P_{\max}^r$	<b>75 W</b>
<b>Peak Power Voltage</b>	$V_{\max}^r$	<b>8.5*/17 V</b>
<b>Peak Power Current</b>	$I_{\max}^r$	<b>8.8*/4.4 A</b>
<b>Open Circuit Voltage</b>	$V_{OC}^r$	<b>10.85*/21.7 V</b>
<b>Short Circuit Current</b>	$I_{SC}^r$	<b>9.6*/4.8 A</b>

\* Esta célula tem a particularidade de poder ser reconfigurada para trabalhar a 6 V

A estes valores fornecidos pelos fabricantes chamam-se valores de referência e são testados nas Condições Standard de Teste, STC – *Standard Test Conditions*.

O valor da radiação solar nas STC,  $G^r$ , é de  $1000 \text{ W/m}^2$  e o valor da temperatura,  $T^r$ , é  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , ou seja  $298,16 \text{ K}$ .

Para as condições de referência aplica-se (2.3) nas condições extremas de funcionamento, ou seja, para o ponto de circuito aberto, curto-circuito e de potência máxima. Na situação de circuito aberto a corrente  $I$ , figura 2.2, é nula. Assim, de (2.3) obtém-se (2.7), onde  $V_T^r$  é o valor de  $V_T$  nas condições de referência, ou seja para  $T = T^r$ .

$$0 = I_S^r - I_0^r \left( e^{\frac{V_{OC}^r}{mV_T^r}} - 1 \right) \quad (2.7)$$

Na condição de curto-circuito, ou seja  $V=0$ , de (2.3) obtém-se (2.8).

$$I_{SC}^r = I_S^r \quad (2.8)$$

Na situação de potência máxima, de (2.3) obtém-se (2.9).

$$I_{\max}^r = I_S^r - I_0^r \left( e^{\frac{V_{\max}^r}{mV_T^r}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

Do conjunto das três equações retira-se o factor de idealidade do díodo,  $m$  (2.10):

$$m = \frac{V_{\max}^r - V_{OC}^r}{V_T^r \ln \left( 1 - \frac{I_{\max}^r}{I_{SC}^r} \right)} \quad (2.10)$$

Verifica-se que o valor do factor de idealidade,  $m$ , depende apenas dos valores de referência, ou seja, depende apenas das características da célula, módulo ou painel, o que significa que, neste modelo, se considera  $m$  constante.

Determinando  $m$ , é possível calcular a corrente inversa de saturação nas condições de referência, (2.11):

$$I_0^r = \frac{I_{SC}^r}{e^{\frac{V_{OC}^r}{mV_T^r}} - 1} \quad (2.11)$$

Sabe-se que o valor de  $I_0$  está dependente do valor da temperatura. É possível estabelecer a relação entre o valor de  $I_0$  e o seu valor de referência,  $I_0^r$ , em função da relação de temperaturas (2.12), onde  $\epsilon$  é o hiato do silício, ou seja  $\epsilon = 1,12$  eV, e  $m'$  é o factor de idealidade equivalente,  $\left( m' = \frac{m}{N_{SM}} \right)$ .

$$I_0 = I_0^r \left( \frac{T}{T^r} \right)^3 e^{\frac{\epsilon}{m'V_T^r} \left( \frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right)} \quad (2.12)$$

A corrente de curto-circuito,  $I_{SC}$ , é função da radiação solar, e pode ser calculada a partir de (2.13).

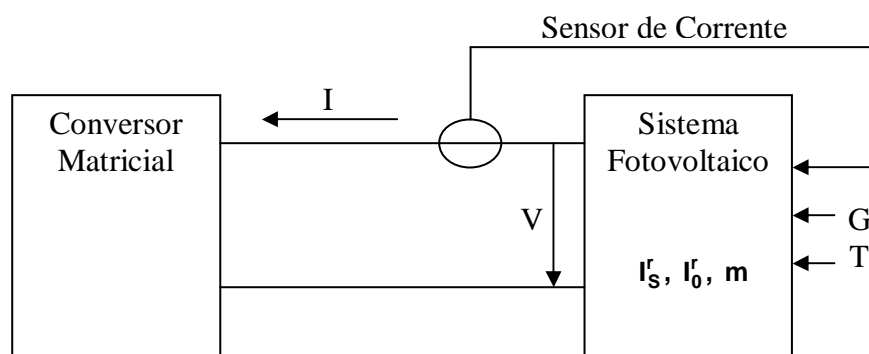
$$I_{SC} = I_{SC}^r \frac{G}{G^r} \quad (2.13)$$

O que, de acordo com (2.8) é equivalente a dizer:

$$I_S = I_S^r \frac{G}{G^r} \quad (2.14)$$

Torna-se assim possível estabelecer um modelo do sistema fotovoltaico sem ser preciso analisar a variação dos valores de temperatura e radiação solar incidente. Basta analisar as

variações dos parâmetros da célula, módulo ou painel para determinar os valores de tensão e corrente de saída.



**Figura 2.5 – Esquema do conjunto conversor + sistema fotovoltaico.**

A variação da temperatura afecta o valor de  $V_T$ , como se pode ver em (2.2), e o valor de  $I_0$ , (2.12), enquanto que a variação da radiação solar afecta o valor de  $I_s$ , (2.14).

Considera-se que  $m$  não varia com a temperatura nem com a radiação solar e está portanto condicionado apenas ao tipo de painel e ao número de células/módulos que o constituem.

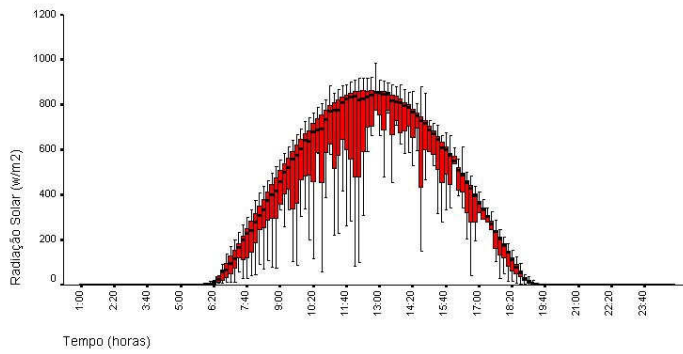
## **2.3 – Influência da temperatura e radiação solar**

Como foi visto no capítulo 2.2, os valores de temperatura e radiação solar são factores determinantes para o valor da potência máxima gerada pelo sistema fotovoltaico.

É interessante analisar a influência destes dois factores de forma a ser possível comparar os resultados de simulação com resultados já testados em painéis/módulos reais ou com as suas características teóricas.

### **2.3.1 – Influência da radiação solar**

Os níveis de radiação solar ao longo de um dia estão fortemente dependentes da estação do ano, do mês, das condições atmosféricas, da localização geográfica, etc.



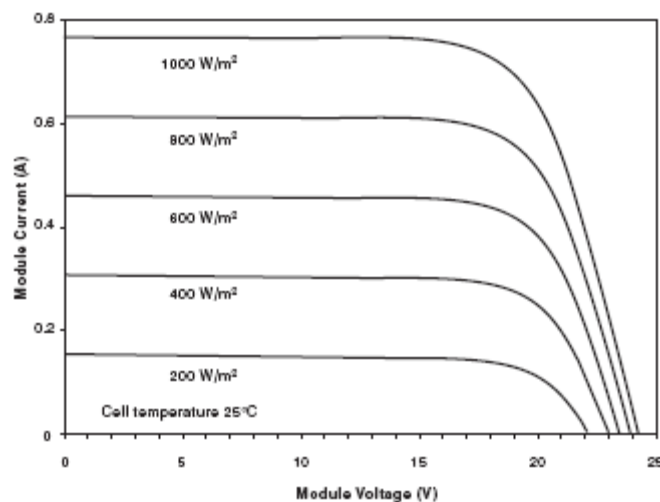
**Figura 2.6 – Variação da radiação solar ao longo de um dia.**

De noite observa-se que a radiação solar é nula mas de dia o gráfico da figura 2.6 apresenta um aspecto semelhante a uma função de 2º grau ou a uma função sinusoidal. Estes dois tipos de funções são bons exemplos para simular a variação da radiação,  $G$ .

Sabemos que a radiação solar afecta linearmente a corrente  $I_s$ , (2.14) e, substituindo em (2.6) obtém-se:

$$V = mV_T \ln \left( \frac{I_s^r \frac{G}{G^r} - I}{I_0} + 1 \right) \quad (2.15)$$

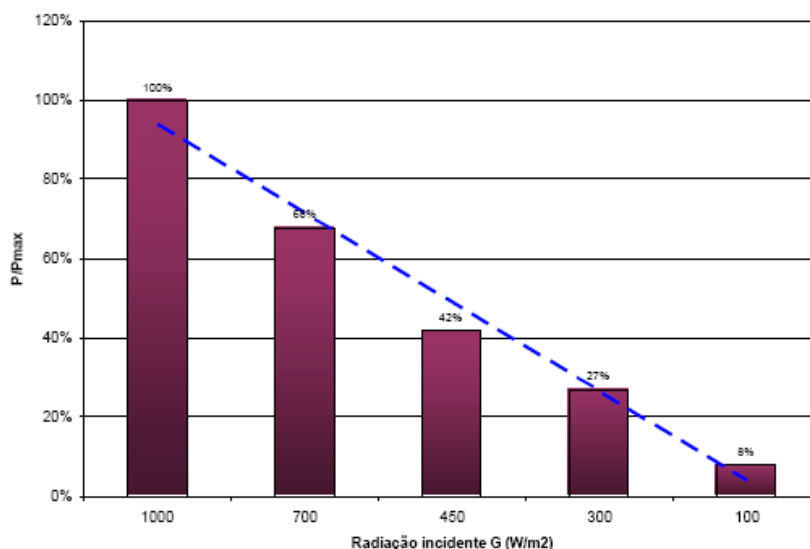
É possível traçar várias características I-V para vários valores de radiação,  $G$ , considerando que o valor da temperatura se mantém constante. Os fornecedores de módulos e painéis fotovoltaicos incluem regularmente essa informação nos catálogos dos produtos, como no exemplo da figura 2.7.



**Figura 2.7 – Variação da característica I-V com a radiação solar em módulos Shell ST10.**

Verifica-se que o valor da corrente,  $I$ , é muito afectado pela variação da radiação. O valor da tensão,  $V$ , sofre apenas uma ligeira variação.

A diminuição da corrente, não compensada por um aumento igual de tensão significa que a potência máxima também diminui, como se pode ver na figura 2.8:

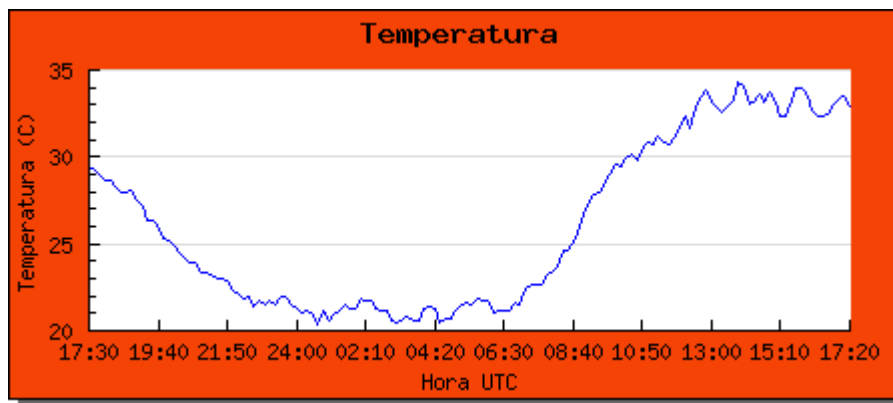


**Figura 2.8 – Variação da potência máxima com a radiação incidente.**

### 2.3.2 – Influência da temperatura

A temperatura ao longo de um dia também é fortemente influenciada pela estação do ano, pelo mês, localização geográfica, etc.

Ao contrário da radiação solar, cuja variação ao longo do dia está mais dependente do movimento do sol que dos restantes factores e, por isso, apresenta uma forma quase sempre semelhante, a variação da temperatura ao longo do dia pode apresentar formas muito variadas, dependendo muito dos factores já enunciados.

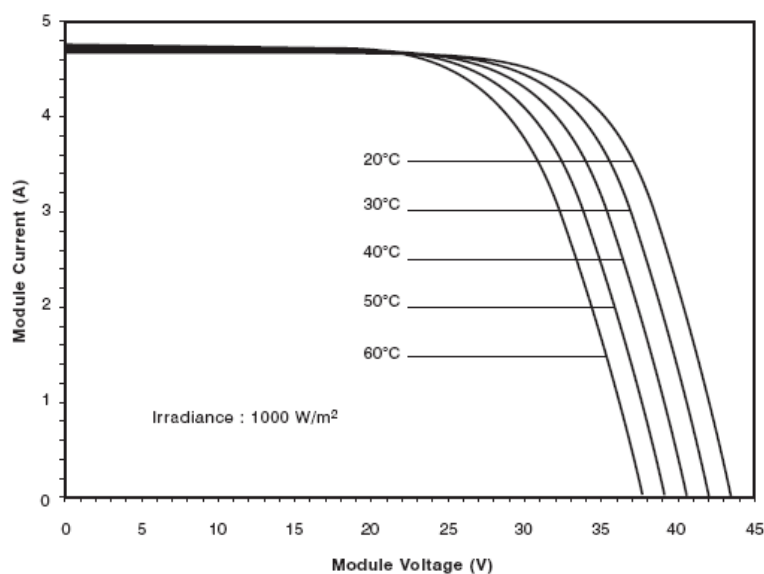


**Figura 2.9 – Variação da temperatura ao longo de 24h, Évora, 19/09/07 – 20/09/07.**

No exemplo concreto da figura 2.9, a onda apresenta uma forma semelhante a uma sinusóide distorcida. Portanto, a utilização de uma função sinusoidal será uma das formas possíveis de simular o efeito da variação da temperatura.

A temperatura afecta dois parâmetros do sistema fotovoltaico,  $V_T$  e  $I_0$ , como se pode ver, respectivamente, em (2.2) e (2.12).

É possível escrever várias características de I-V para vários valores de temperatura,  $T$ , considerando a radiação solar constante. Mais uma vez, os fabricantes de sistemas fotovoltaicos têm por costume fornecer essa informação, exemplo da figura 2.10.

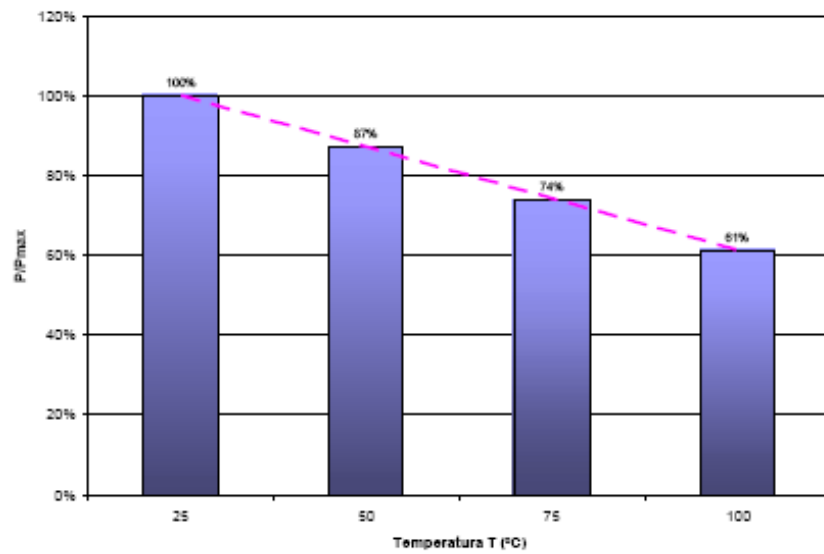


**Figura 2.10 – Variação da característica I-V com a temperatura em módulos Shell SP140PC.**

Verifica-se o inverso do ocorrido para a variação da radiação solar, isto é, a corrente  $I$ , varia apenas ligeiramente e a tensão  $V$  é muito afectada por este efeito.



Uma vez que o aumento de temperatura reduz a tensão e mantém o valor de corrente aproximadamente constante, a potência irá diminuir com o aumento de temperatura (figura 2.11).



**Figura 2.11 – Variação da potência máxima com a temperatura.**

### 3 – Conversor Matricial

O conversor matricial é um conversor directo de frequência com a capacidade de transformar, simultaneamente, tensões e frequências numa só etapa, permitindo, por isso, realizar as transformações, AC-AC, AC-DC, DC-AC e DC-DC, bastando, para tal, mudar os sistemas de controlo do conversor. Esta versatilidade é uma das vantagens que poderá permitir, a sua comercialização para fins bastante diferentes em aplicações de electrónica de potência.

Além da versatilidade, outra vantagem destes conversores é o facto de serem compostos quase exclusivamente por semicondutores, não apresentando o armazenamento intermédio de energia comum à grande maioria dos conversores. Esse tipo de armazenamento é geralmente composto por elementos reactivos, quer capacitivos quer indutivos. Esta característica permite que o conversor matricial apresente dimensões muito mais reduzidas que os outros, uma vez que são esses componentes ou sistemas de armazenamento de energia que maior dimensão ocupam no conversor. A ausência de armazenamento de energia também se traduz num aumento de rendimento, uma vez que não se verificam perdas nos sistemas ou componentes de armazenamento.

A desvantagem reside no facto de a falta de elementos reactivos tornar os semicondutores mais sujeitos às perturbações que possam ocorrer nos sistemas a que o conversor está ligado, sejam eles a rede eléctrica ou mesmo geradores e motores, o que diminui o tempo de vida dos semicondutores.

Outro factor negativo é o facto de ser necessário um controlo mais complexo e, muitas vezes, ainda sujeito a estudo e pesquisa, ao contrário dos sistemas já existentes que apresentam soluções de controlo relativamente simples e já bem implementadas no mercado.

Este factor tem consequências económicas pois ainda existe um custo adicional em pesquisa, investigação e engenharia de forma a tornar possível a comercialização a preços competitivos destes conversores. No entanto, tendo em conta a tendência decrescente dos preços dos semicondutores, prevê-se que as topologias matriciais venham a formar um mercado competitivo num futuro próximo.

No geral acredita-se que as vantagens dos conversores matriciais podem compensar as desvantagens, existindo boas perspectivas de se tornarem uma opção mais rentável e virem a ocupar um lugar importante no mercado de conversores de potência.

### 3.1 – Estrutura

A estrutura de um conversor matricial consiste em três braços, um para cada fase de saída. Cada braço é composto por três interruptores, um para cada fase de entrada, o que perfaz um total de 9 interruptores.

O nome de conversor matricial surge exactamente porque os interruptores formam um género de matriz entre as tensões de entrada e as de saída, como se pode ver na figura 3.1.

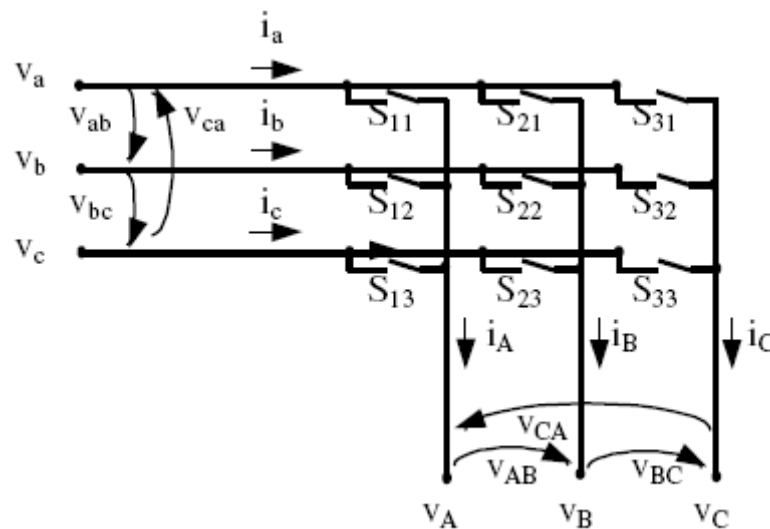


Figura 3.1 – Esquema de um conversor matricial, realçando a estrutura em matriz.

Cada interruptor bidireccional possui um par de semicondutores em anti-paralelo, para garantir a possibilidade do trânsito de corrente nos dois sentidos, que, por sua vez, está em anti-série com outro par. Desta forma, os interruptores operam nos quatro quadrantes, suportando tensões positivas e negativas e garantem o trânsito e controlo da corrente em ambos os sentidos.

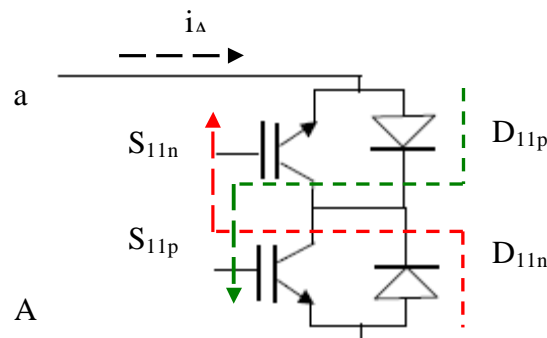
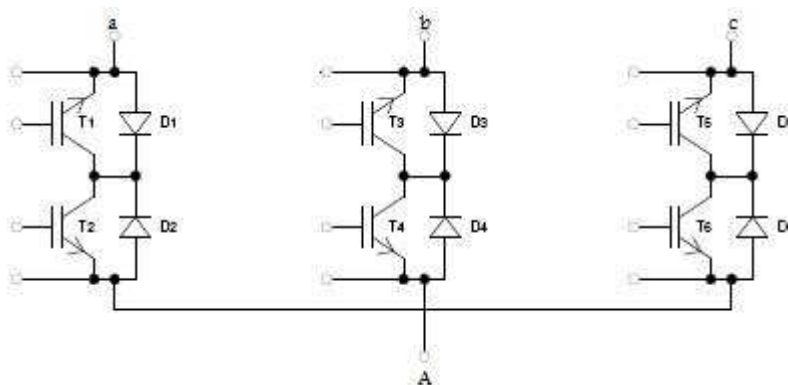


Figura 3.2 – Montagem do interruptor bidireccional.

De acordo com a figura 3.2, o conjunto  $S_{1p}$ ,  $D_{1p}$  conduz quando a corrente  $i_A$  é positiva, a verde, enquanto que o conjunto  $S_{1n}$ ,  $D_{1n}$  conduz quando a corrente  $i_A$  é negativa, a vermelho.

No total um conversor matricial tem, habitualmente, 36 semicondutores, 18 semicondutores de corte comandado, designados na figura 3.3 pela letra T, e 18 díodos, designados nessa mesma figura pela letra D.



**Figura 3.3 – Esquema em pormenor de um braço do conversor.**

Os semicondutores comandados podem ser transístores IGBT's, MOSFET's ou tiristores GTO's, sendo os transístores bipolares de porta isolada, IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) os mais usuais.

### **3.2 – Modelo do conversor matricial**

Para que o conversor funcione correctamente, é necessário garantir a continuidade da corrente e, como tal, deve existir sempre um interruptor ligado em cada um dos braços de saída. No entanto, não pode existir mais do que um interruptor ligado por braço, pois isso causaria um curto-circuito aos terminais da rede. Consequentemente, dos três interruptores ligados a cada um dos braços de saída deverá estar um, e apenas um, ligado.

Para representar os interruptores do conversor na forma matricial designa-se cada interruptor por  $S_{ij}$ , onde  $i$  e  $j$  definem as fases de saída/entrada a que o interruptor está ligado. No caso do interruptor estar no estado de corte, *off*,  $S_{ij}$  deverá ser igual a "0". No caso do interruptor estar no estado de condução, *on*,  $S_{ij}$  deverá ser igual a "1", (3.1).

$$\begin{aligned} S_{ij} = 0 &\rightarrow S_{ij} \text{ OFF} \\ S_{ij} = 1 &\rightarrow S_{ij} \text{ ON} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Com base no estado dos interruptores, é possível definir a matriz  $\mathbf{S}$ , (3.2).

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} & \mathbf{S}_{13} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} & \mathbf{S}_{23} \\ \mathbf{S}_{31} & \mathbf{S}_{32} & \mathbf{S}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Os estados possíveis num conversor matricial estão representados na tabela 3.1:

**Tabela 3.1 – 27 estados possíveis do conversor matricial.**

nº	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>31</sub>	S <sub>32</sub>	S <sub>33</sub>
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

Com base na matriz S (3.2), é possível relacionar as tensões de entrada do conversor com as tensões de saída (3.3).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_A \\ \mathbf{v}_B \\ \mathbf{v}_C \end{bmatrix} = [\mathbf{S}] \begin{bmatrix} \mathbf{v}_a \\ \mathbf{v}_b \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Utilizando o mesmo raciocínio para as correntes obtém-se:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [S]^T \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Com base em (3.3) e (3.4) e considerando as restrições topológicas do conversor matricial, obtém-se a tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Relação entre as tensões e correntes de entrada e de saída do conversor para cada estado do conversor matricial.**

nº	VA	VB	VC	VAB	VBC	VCA	Ia	Ib	Ic
1	va	vb	vc	vab	vbc	vca	IA	IB	IC
2	va	vc	vb	-vca	-vbc	-vab	IA	IC	IB
3	vb	va	vc	-vab	-vca	-vbc	IB	IA	IC
4	vb	vc	va	vbc	vca	vab	IC	IA	IB
5	vc	va	vb	vca	vab	vbc	IB	IC	IA
6	vc	vb	va	-vbc	-vab	-vca	IC	IB	IA
7	va	vb	vb	vab	0	-vab	IA	-IA	0
8	vb	va	va	-vab	0	vab	-IA	IA	0
9	vb	vc	vc	vbc	0	-vbc	0	IA	-IA
10	vc	vb	vb	-vbc	0	vbc	0	-IA	IA
11	vc	va	va	vca	0	-vca	-IA	0	IA
12	va	vc	vc	-vca	0	vca	IA	0	-IA
13	vb	va	vb	-vab	vab	0	IB	-IB	0
14	va	vb	va	vab	-vab	0	-IB	IB	0
15	vc	vb	vc	-vbc	vbc	0	0	IB	-IB
16	vb	vc	vb	vbc	-vbc	0	0	-IB	IB
17	va	vc	va	-vca	vca	0	-IB	0	IB
18	vc	va	vc	vca	-vca	0	IB	0	-IB
19	vb	vb	va	0	-vab	vab	IC	-IC	0
20	va	va	vb	0	vab	-vab	-IC	IC	0
21	vc	vc	vb	0	-vbc	vbc	0	IC	-IC
22	vb	vb	vc	0	vbc	-vbc	0	-IC	IC
23	va	va	vc	0	-vca	vca	-IC	0	IC
24	vc	vc	va	0	vca	-vca	IC	0	-IC
25	va	va	va	0	0	0	0	0	0
26	vb	vb	vb	0	0	0	0	0	0
27	vc	vc	vc	0	0	0	0	0	0

Uma vez que neste trabalho o objectivo será ligar o conversor matricial a um sistema fotovoltaico, em que se pretende efectuar a conversão DC-AC, o conversor não fará uso de um dos braços.

### 3.3 – Modelo do conversor matricial a operar como conversor DC/AC

O esquema do conversor matricial para uma aplicação DC-AC, ou vice-versa, é o apresentado na Figura 3.5.

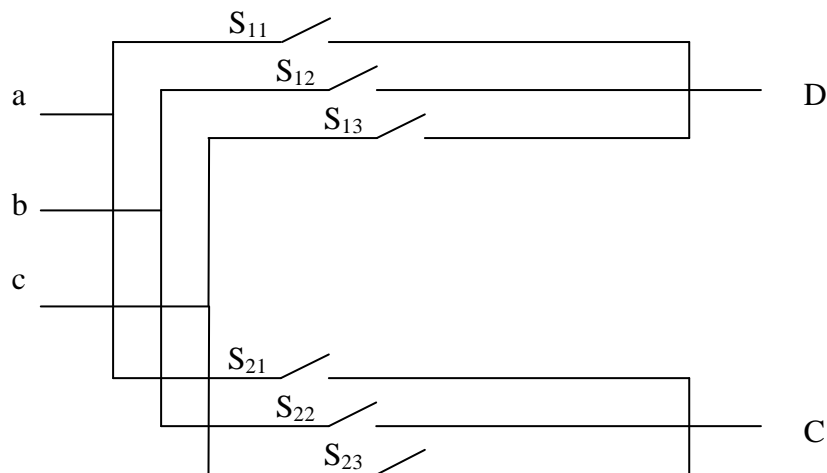


Figura 3.4 – Conversor matricial para aplicações DC/AC.

A matriz  $\mathbf{S}_f$ , (3.5) será diferente de  $\mathbf{S}$  e é obtida de (3.3) eliminando uma das linhas da matriz, ou seja, um dos braços do conversor.

$$[\mathbf{S}_f] = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} & \mathbf{S}_{13} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} & \mathbf{S}_{23} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Os estados possíveis num conversor AC-DC obtêm-se eliminando a última linha da tabela 3.1. Como consequência, muitos dos estados representados na tabela 3.2 tornam-se iguais, o que reduz substancialmente o seu número, como podemos ver na tabela 3.3. Desta forma, passa-se de 27 estados para 9, ou seja um terço dos anteriores.

**Tabela 3.3 – Conjunto de estados para a transformação AC-DC.**

nº	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>
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

Uma vez que temos um sistema monofásico na saída, a relação das tensões da rede com as tensões do painel será dada por (3.6):

$$\begin{bmatrix} V_D \\ V_C \end{bmatrix} = [S_f] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

E para as correntes obtém-se (3.7):

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [S_f]^T [I_{DC}] \quad (3.7)$$

Com auxílio da tabela 3.3 e das equações (3.5) e (3.6), construiu-se a tabela 3.4. Esta tabela permite saber quais as tensões e correntes que resultam de um determinado estado de condução dos interruptores do conversor DC-AC.

**Tabela 3.4 – Relação entre as tensões e correntes de entrada e de saída do conversor para cada estado do conversor DC-AC.**

nº	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	V <sub>D</sub>	V <sub>C</sub>	V <sub>DC</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>
1	1	0	0	0	1	0	v <sub>a</sub>	v <sub>b</sub>	v <sub>ab</sub>	IDC	-IDC	0
2	0	1	0	1	0	0	v <sub>b</sub>	v <sub>a</sub>	-v <sub>ab</sub>	-IDC	IDC	0
3	0	1	0	0	0	1	v <sub>b</sub>	v <sub>c</sub>	v <sub>bc</sub>	0	IDC	-IDC
4	0	0	1	0	1	0	v <sub>c</sub>	v <sub>b</sub>	-v <sub>bc</sub>	0	-IDC	IDC
5	1	0	0	0	0	1	v <sub>a</sub>	v <sub>c</sub>	-v <sub>ca</sub>	-IDC	0	IDC
6	0	0	1	1	0	0	v <sub>c</sub>	v <sub>a</sub>	v <sub>ca</sub>	IDC	0	-IDC
7	1	0	0	1	0	0	v <sub>a</sub>	v <sub>a</sub>	0	0	0	0
8	0	1	0	0	1	0	v <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	1	v <sub>c</sub>	v <sub>c</sub>	0	0	0	0



Da tabela anterior verifica-se que existem 3 vectores zero, ou seja, três vectores que colocam uma tensão nula aos terminais  $V_{DC}$  mas que resultam de combinações de interruptores diferentes.

Com base nesta tabela, no próximo capítulo ir-se-ão seleccionar os estados que, de acordo com o sistema de controlo, melhor garantem que o sistema tem o comportamento desejado, seguindo as referências impostas.

## 4 – Controlo do sistema

Para que o conjunto constituído pelo conversor matricial e pelo sistema fotovoltaico funcione correctamente é necessário garantir duas condições:

1) É necessário controlar a potência do sistema fotovoltaico de modo a que se obtenha sempre a máxima potência disponível.

2) É necessário controlar as correntes injectadas na rede eléctrica de forma a que estas sejam alternadas sinusoidais e se encontrem em fase com a tensão, garantindo um factor de potência quase unitário.

Para satisfazer ambas as condições são necessários dois controladores distintos que, conjugados, podem gerar um único sinal de controlo.

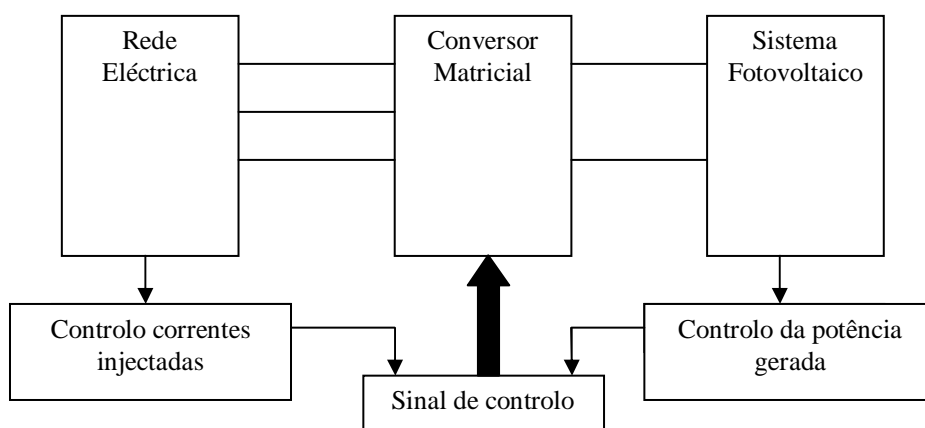


Figura 4.1 – Esquema do controlo do conjunto conversor + sistema fotovoltaico.

### 4.1 – Técnica de modelação de vectores no espaço

O controlo do conversor matricial é usualmente realizado através da técnica de modelação de vectores no espaço. Utilizando a tabela 3.1 foi possível a utilização desta técnica, atribuindo a cada estado possível um vector equivalente.

Do lado AC do conversor temos um sistema equilibrado de tensões, uma vez que se assume o sistema ligado à rede trifásica de baixa tensão e esta assume-se equilibrada.

Aplicando a transformação de Concordia ao vector de tensões compostas da rede é possível obter outro sistema equilibrado de tensões. A matriz **C** (4.1) é a matriz de transformação de Concordia.

$$[\mathbf{C}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

De seguida obtemos o sistema equilibrado de tensões definido em (4.2).

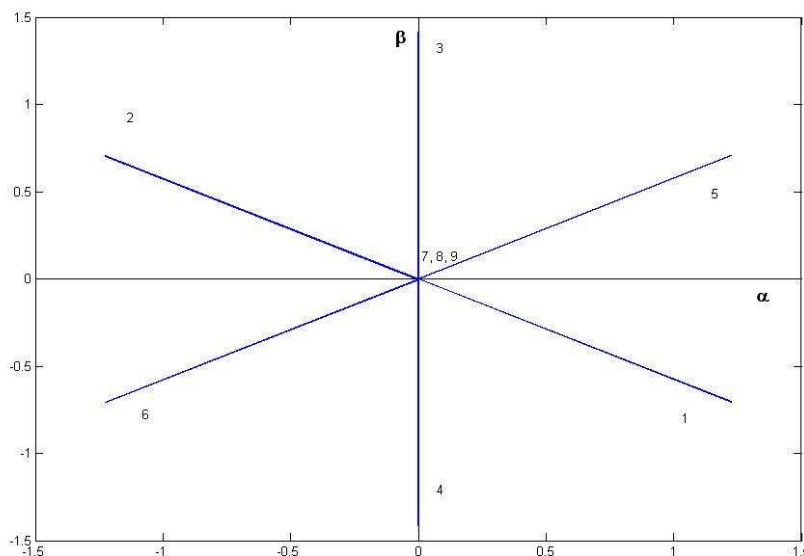
$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_\alpha \\ \mathbf{v}_\beta \\ \mathbf{v}_0 \end{bmatrix} = [\mathbf{C}]^T \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ab} \\ \mathbf{v}_{bc} \\ \mathbf{v}_{ca} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Verifica-se em (4.2) que a componente homopolar,  $v_0$ , é nula. As restantes componentes,  $\alpha$  e  $\beta$ , podem ver visualizadas num plano, chamado plano  $\alpha\beta$ . A tabela 4.1 mostra o módulo e argumento das tensões calculadas em (4.2).

**Tabela 4.1 – Módulo e argumento dos vectores no plano  $\alpha\beta$ .**

Estado	$V_0$	$\delta_0$
1	$v_{ab}$	$-30^\circ$
2	$-v_{ab}$	$-30^\circ$
3	$v_{bc}$	$90^\circ$
4	$-v_{bc}$	$90^\circ$
5	$-v_{ca}$	$30^\circ$
6	$v_{ca}$	$30^\circ$
7	0	-
8	0	-
9	0	-

Na tabela 4.1  $V_0$  representa o módulo do vector enquanto que  $\delta_0$  representa o argumento. Na figura 4.2 podemos visualizar os vectores no plano  $\alpha\beta$ .



**Figura 4.2 – Vectores no plano  $\alpha\beta$ .**

Verifica-se que para este caso existem algumas características interessantes no conjunto de vectores no plano  $\alpha\beta$ .

Ao contrário do que seria observado na transformação AC-AC, existe apenas um vector em cada direcção. Também não existe nenhum vector com componente  $\beta = 0$ , excepto os vectores nulos.

## **4.2 – Controlo da Potência Gerada – MPPT**

Para determinar o ponto de potência máxima do sistema fotovoltaico é necessário usar um sistema designado por MPPT (maximum power point tracker – seguidor de potência máxima).

Como explicado no capítulo 2, a potência máxima que um painel pode fornecer varia com as condições ambientais a que este está sujeito, ou seja, temperatura e radiação solar, causando variações nas correntes e tensões de saída do sistema fotovoltaico.

Este tipo de sistemas não são seguidores mecânicos, ou seja, não movem o painel ou módulo de forma a estarem mais alinhados com a posição do sol. O MPPT é um sistema electrónico que varia o ponto de funcionamento dos módulos para que estes forneçam a potência máxima disponível.

Os MPPT tradicionais são usualmente compostos por microprocessadores ou computadores e outros sistemas electrónicos que, analisando as várias grandezas do painel determinam o ponto de funcionamento para o qual se consegue extrair a potência máxima para a temperatura e radiação a que o painel está sujeito. Estes sistemas tipicamente apresentam

perdas de rendimento devido à grande massa de cálculos computacionais e aos atrasos e aproximações que isso pode implicar. Além disso existe um gasto maior devido ao preço associado aos microprocessadores ou computadores auxiliares.

Por todas essas razões, neste trabalho optou-se por realizar um seguidor de potência diferente baseado no cálculo da derivada da potência.

A premissa deste sistema é derivar a potência em função de valores que podem ser facilmente determinados, com um rigor elevado.

Para determinar o máximo de potência,  $P_{\max}$ , deriva-se a potência,  $P$ , em função da tensão,  $V$ , ou da corrente,  $I$ , e iguala-se a zero. Partindo da definição de potência, (4.3).

$$P = VI \quad (4.3)$$

Derivando em ordem à tensão,  $V$ , obtemos (4.4).

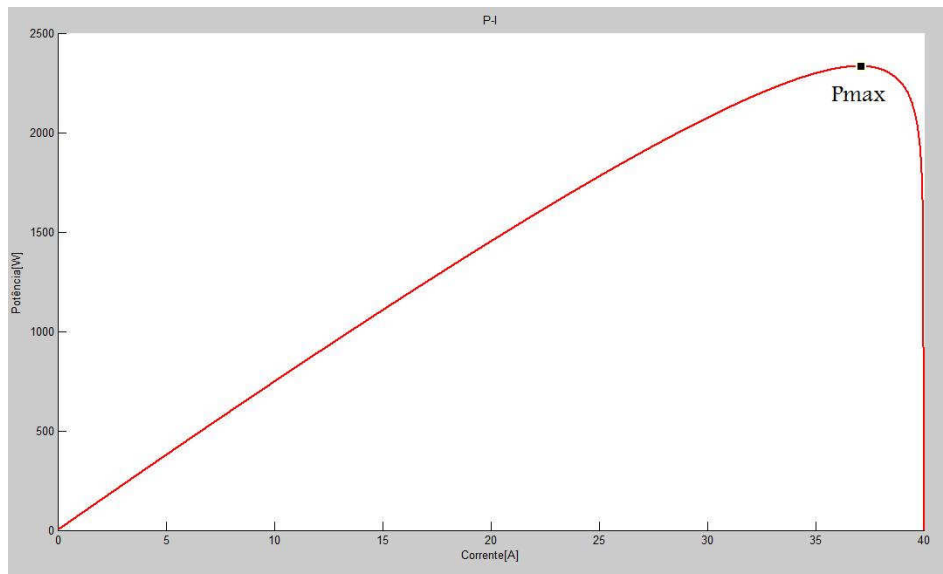
$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Leftrightarrow I = -V \frac{dI}{dV} \quad (4.4)$$

E derivando em ordem à corrente,  $I$ , obtemos (4.5).

$$\frac{dP}{dI} = 0 \Leftrightarrow V + I \frac{dV}{dI} = 0 \Leftrightarrow V = -I \frac{dV}{dI} \quad (4.5)$$

Uma vez que se sabe a relação  $I$ - $V$ , equação (2.3), figura 2.4, é possível determinar ambas as derivadas. O resultado desta operação pode-se traduzir na relação  $P$ - $I$  ou  $P$ - $V$  do painel.

A relação  $P$ - $I$  típica de um painel fotovoltaico será uma curva como a da figura 4.3, sendo que a relação  $P$ - $V$  seria uma curva semelhante.



**Figura 4.3 – Simulação da relação P-I de um painel fotovoltaico.**

Optou-se por derivar segundo I, o que não significa que não seja possível realizar este controlador derivando segundo V.

Considerando que as alterações de tensão e corrente são pequenas, o que é razoável tendo em conta que tanto a radiação solar como a temperatura são grandezas que variam lentamente, é possível fazer a seguinte aproximação, (4.6):

$$\frac{dP}{dI} = 0 \Leftrightarrow V + I \frac{dV}{dI} \approx V + I \frac{\Delta V}{\Delta I} = v(t) + i(t) \frac{v(t) - v(t - \Delta t)}{i(t) - i(t - \Delta t)} = 0 \quad (4.6)$$

Como se pode ver por (4.6) este tipo de MPPT implica cálculos relativamente simples, e é apenas necessário um sensor de corrente e um sensor de tensão, bem como dispositivos para armazenar o valor anteriormente medido.

Ao derivar a potência é possível determinar um sinal,  $S_P$ , que permitirá controlar o painel de modo a que este se mantenha em funcionamento num ponto sempre em torno do ponto de potência máxima.

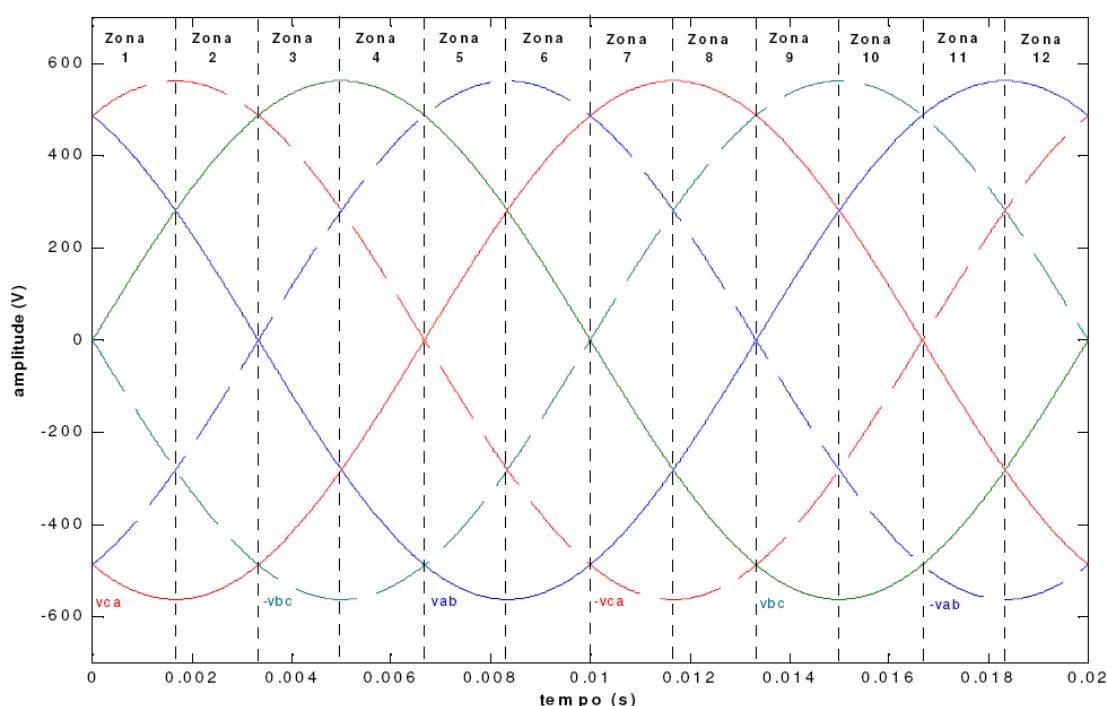
As alterações que se desejam fazer no valor da derivada não se podem fazer directamente, é necessário actuar nos valores da tensão ou corrente do sistema.

Por exemplo, para  $\frac{dP}{dI} < 0$  é necessário aumentar o valor da derivada o que, como se pode ver na figura 4.3, corresponde a diminuir a corrente. Já para  $\frac{dP}{dI} > 0$  é necessário diminuir este valor e, por isso, aumentar a corrente.

Torna-se então necessário saber qual o conjunto de vectores que satisfaz as alterações de corrente necessárias.

Uma vez que temos tensões alternadas sinusoidais o valor das tensões compostas aos terminais do conversor vai depender do instante de tempo que se queira analisar. Por isso é preciso dividir o período das tensões em várias zonas.

A divisão das zonas das tensões compostas é feita de forma a que nenhuma zona seja igual a outra e que, dentro da mesma zona, as tensões mantenham a sua ordem de grandeza. Por exemplo, na zona 1 teremos  $-v_{ca} > v_{ab} > v_{bc}$ , mais nenhuma zona apresenta esta ordem de grandeza de valores e esta ordem mantém-se para toda a zona 1.



**Figura 4.4 – Divisão do período das tensões compostas da rede eléctrica em zonas.**

É então gerado um outro sinal,  $S_V$ , que servirá como indicador da zona de tensão. O sinal tomará os valores de 1 a 12, que correspondem à zona de tensão com o mesmo número.

Depois de divididas as zonas de tensão é possível saber, para cada zona, quais os vectores que satisfazem as condições do MPPT. Para tal, é necessário comparar as tensões instantâneas do lado alternado e do lado contínuo. Se  $V_{DC} > V_{AC}$  então a corrente  $I$  irá aumentar, no entanto se  $V_{DC} < V_{AC}$ , a corrente  $I$  irá diminuir.

Considerando um sistema ligado à rede eléctrica de baixa tensão de 230 V ligado a um painel fotovoltaico com tensão máxima,  $V_{max}$ , muito menor que 300 V. Concluiu-se que, escolhendo o vector que coloca aos terminais do conversor a tensão composta positiva com o

valor mais alto ou intermédio então,  $\frac{di}{dt} < 0$ . E que, escolhendo o vector que coloca a tensão

composta negativa com o valor, em módulo, mais elevado ou intermédio, então  $\frac{di}{dt} > 0$ .

Por exemplo, na zona 1 se fosse escolhida a tensão  $v_{ab}$  a corrente iria diminuir e se fosse escolhida a tensão  $-v_{ca}$  a corrente iria aumentar. De reparar que o vector  $v_{bc}$  é uma incógnita pois ocupa valores entre os 0 V e os 300 V, aproximadamente, o que significa que, na zona 1,  $v_{bc}$  tanto pode aumentar a corrente como diminuí-la.

Estes vectores, que colocam aos terminais do conversor as tensões compostas com os valores mais baixos, quer negativos quer positivos, são indefinidos e não são úteis quando se pretende alcançar o valor máximo de potência.

**Tabela 4.2 – Efeito dos vectores de comutação na corrente do painel fotovoltaico, para cada zona de tensão**

Vector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{DC}$	$V_{ab}$	$-V_{ab}$	$V_{bc}$	$-V_{bc}$	$-V_{ca}$	$V_{ca}$	0	0	0	
Zona de tensão	1	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	2	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	3	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	4	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	5	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	6	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	7	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	8	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	9	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	10	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	11	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$
	12	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	X	X	$\frac{di_{bc}}{dt} < 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$	$\frac{di_{bc}}{dt} > 0$

A tabela 4.2 relaciona o efeito dos vários vectores de comutação, em cada zona, na corrente do painel fotovoltaico. Pode-se verificar que mais que um vector apresentam o mesmo resultado, para o mesmo instante de tensão.

Além disso pode-se agrupar as zonas de tensão em pares que apresentam o mesmo comportamento. A zona 2 é igual à zona 3, a 4 igual à 5, e por aí adiante, sendo a zona 12 igual à zona 1. Os vectores zero (vector 6, 7 e 8) fazem sempre a corrente aumentar.



Poder-se-ia pensar que, uma vez que existem sempre duas opções, a escolha entre as duas é indiferente. No entanto o sistema ainda tem que garantir mais uma condição, o que limitará a escolha de vectores.

### **4.3 – Controlo do factor de potência das correntes injectadas na rede**

A segunda condição a garantir para o correcto funcionamento do conversor é assegurar que as correntes injectadas na rede sejam alternadas sinusoidais e que estejam em fase com as tensões.

Para tal recorre-se à transformação de Blondel-Park (4.7), com  $\theta = \omega t$ .

$$[\mathbf{P}_B] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Esta transformação é aplicada às correntes nas coordenadas de Concordia, ou seja, primeiro aplica-se a transformação de Concordia, (4.8).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [\mathbf{C}]^T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

E depois aplica-se a transformação de Blondel-Park às correntes resultantes da transformação anterior, (4.9), onde mais uma vez a componente homopolar,  $i_0$ , é nula.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [\mathbf{P}_B] \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

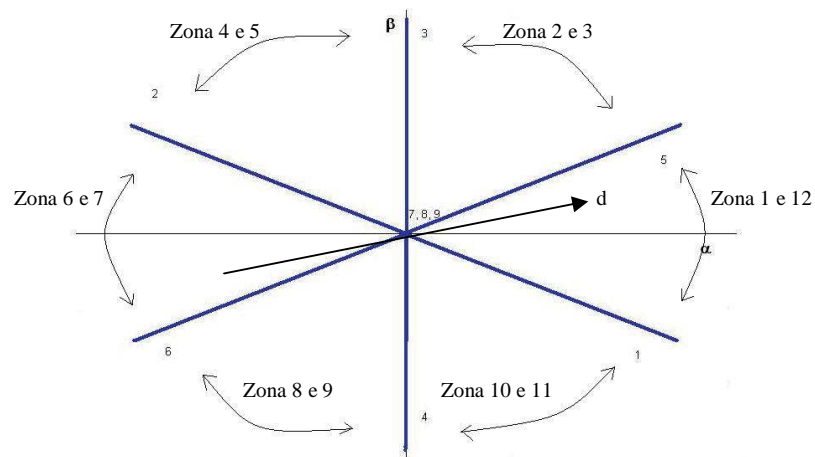
Definindo-se as tensões simples do lado da rede por (4.10), as correntes de entrada estarão em fase com as tensões de entrada desde que  $i_q = 0$ .

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{2} \times 230 \cos(\omega t) \\ v_b = \sqrt{2} \times 230 \cos(\omega t - 120^\circ) \\ v_c = \sqrt{2} \times 230 \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (4.10)$$

Torna-se necessário calcular a corrente  $i_q$ , através da transformação de Concordia (4.8), seguida da transformação de Blondel-Park (4.9) e comparar o valor com zero.

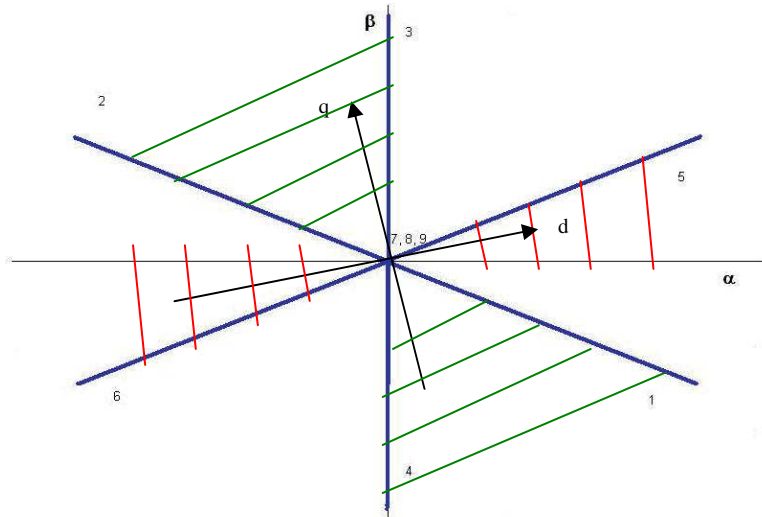
É então gerado um sinal,  $S_Q$ , que permitirá controlar o valor de  $i_q$  mantendo-o sempre em torno de zero.

O plano dq é um plano girante no referencial do plano  $\alpha\beta$ , por isso os vectores a utilizar dependem do instante de tempo a considerar. Ou seja, para actuar nos interruptores do conversor de forma a compensar o erro, é necessário ter em conta a zona de tensão.



**Figura 4.5 – Localização do eixo d consoante a zona de tensão.**

Na figura 4.5 é possível ver a localização do eixo d consoante a zona de tensão. A localização do eixo q será perpendicular à do eixo d.



**Figura 4.6 – Localização dos eixos d e q para a zona de tensão 1.**

Na figura 4.6 temos um exemplo da localização dos eixos para a zona 1. A verde temos a localização esperada do eixo q e a vermelho a localização esperada do eixo d.

Neste caso verifica-se que existem dois vectores que fazem a componente q subir, vectores 2 e 3, e dois que fazem esta componente descer, vectores 1 e 4. De facto existirão sempre 2 vectores tanto para aumentar a componente q como para a diminuir.

**Tabela 4.3 – Efeito dos vectores de comutação na componente  $i_q$ , para cada zona de tensão**

	Vector	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$V_{DC}$	$V_{ab}$	$-V_{ab}$	$V_{bc}$	$-V_{bc}$	$-V_{ca}$	$V_{ca}$	0	0	0
Zona de tensão	1	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	2	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	3	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	4	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	5	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	6	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	7	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	8	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	9	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	10	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	11	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$
	12	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} > 0$	$\frac{di_q}{dt} < 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$	$\frac{di_q}{dt} = 0$

Foi possível criar a tabela 4.3 que relaciona o efeito dos vários vectores, em cada zona, na corrente  $i_q$ .

Em cada zona de tensão existem sempre 3 vectores para cada operação na componente q da corrente, aumentar, diminuir ou manter.

Mais uma vez, as zonas podem ser agrupadas aos pares, os mesmos pares anteriormente descritos em 4.2.

#### 4.4 – Controlo por modo de deslizamento

Existem 2 sinais de controlo distintos,  $S_P$  e  $S_Q$ , e um sinal auxiliar,  $S_V$ , para indicar a zona de tensão. Para calcular  $S_P$  e  $S_Q$  recorreu-se ao método de controlo por modo de deslizamento.

Em modo de deslizamento as grandezas a controlar são “forçadas” a manter-se entre duas superfícies, chamadas superfícies de descontinuidade, de forma a permanecer em torno da referência. O sistema é dinâmico e insensível às perturbações o que o torna um sistema robusto.

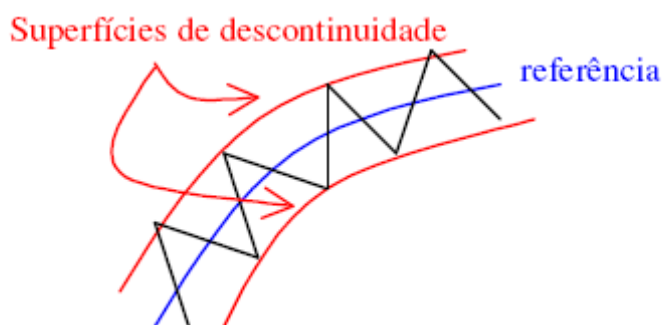


Figura 4.7 – Deslizamento em torno da referência.

Considerando a grandeza  $x$ , o erro define-se por (4.11), ou seja, o erro é a diferença entre o valor de referência e o valor medido.

$$\mathbf{e}_x = \mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x} \quad (4.11)$$

Este erro é um valor dinâmico, que deve tender para zero apesar de nunca o poder ser uma vez que isso implicaria frequências de comutação infinitas. Comutando entre os vários vectores existentes é possível diminuir o erro sempre que este tem tendência a aumentar. É assim possível definir  $S_x$  (4.12), que é a Lei de Controlo do modo de deslizamento, onde  $k$  é o ganho que se multiplica ao valor do erro visto que para valor muito pequenos de  $e_x$  pode ser difícil determinar se o valor é maior ou menor que zero.

$$\mathbf{S}_x(\mathbf{e}_x, t) = k \mathbf{e}_x \rightarrow 0 \quad (4.12)$$

A Lei de Controlo é fácil de aplicar utilizando comparadores de histerese. Neste trabalho optou-se pelo uso de comparadores de 3 níveis. Para valores abaixo da banda de histerese maior temos  $S_x < 0$ , para valores dentro da banda de histerese menor temos  $S_x = 0$  e para valores acima da banda de histerese maior temos  $S_x > 0$ , tal como se pode ver em (4.13) onde  $H$  e  $h$  são os valores das bandas de histerese e  $H > h$  (geralmente  $H = 2h$ ).

$$\begin{cases} \mathbf{e}_x < -H \Rightarrow \mathbf{S}_x < 0 \\ -h < \mathbf{e}_x < h \Rightarrow \mathbf{S}_x = 0 \\ \mathbf{e}_x > H \Rightarrow \mathbf{S}_x > 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Aplicando (4.12) às duas grandezas a controlar, obtemos (4.14) e (4.15).

Como  $\frac{dP}{dl_{ref}} = 0$  então  $S_P$  será (4.14)

$$S_P = -\frac{dP}{dl} \quad (4.14)$$

E como  $i_{qref} = 0$ ,  $S_Q$  será (4.15)

$$S_Q = k(-i_q) \quad (4.15)$$

Aplicando (4.13) a  $S_P$  e  $S_Q$  obteve-se 3 níveis lógicos: 0, 1 e 2. Os efeitos dos 3 níveis lógicos em  $S_P$  serão os seguintes (4.16):

$$\begin{cases} S_P = 0 \Rightarrow \frac{dP}{dl} < 0 \\ S_P = 1 \Rightarrow \frac{dP}{dl} = 0 \\ S_P = 2 \Rightarrow \frac{dP}{dl} > 0 \end{cases} \quad (4.16)$$

E em  $S_Q$  serão os seguintes, (4.17)

$$\begin{cases} \mathbf{S}_q = 0 \Rightarrow I_q < 0 \\ \mathbf{S}_q = 1 \Rightarrow I_q = 0 \\ \mathbf{S}_q = 2 \Rightarrow I_q > 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

Deste modo é possível determinar se o valor se encontra acima ou abaixo de zero ou mesmo próximo de zero o suficiente para que se possa considerar igual, e actuar fazendo baixar, subir ou manter, respectivamente, este valor e assim manter o valor das grandezas em torno do valor de referência.

As vantagens do controlo por modo de deslizamento são a melhoria de desempenhos, o aumento da robustez face a perturbações. As vantagens face aos controladores PWM convencionais são redução de complexidade, peso e volume e tempo de resposta mais rápido.

## 5 – Resultados de Simulação

Após a criação de um modelo de simulação adequado para este conversor, anexo A, foi possível realizar várias simulações em ambiente Simulink.

Para estes testes são relevantes os parâmetros do painel fotovoltaico, a radiação e a temperatura a que este está sujeito e os filtros, quer do lado do painel quer do lado da rede.

Foram realizados testes de duas naturezas distintas:

- Testes com parâmetros fixos no tempo, ou seja, variando pontualmente os parâmetros mas mantendo estes valores constantes para cada ensaio.
- Testes com parâmetros variantes no tempo; onde se varia a radiação e/ou a temperatura ao longo do ensaio.

De notar que não se testou a variação dos valores dos filtros e que a variação dos parâmetros do painel fotovoltaico pode ser interpretada tanto como uma variação da temperatura e/ou radiação, bem como uma alteração das características do próprio painel.

Todas as simulações foram realizadas considerando a resistência de condução dos interruptores,  $R_{ON}$ , igual a  $20m\Omega$ .

### 5.1 – Teste com parâmetros fixos no tempo

Estes ensaios foram realizados com 3 objectivos:

- Análise do rendimento de conversão;
- Análise da distorção harmónica;
- Comparação dos resultados de simulação e dos resultados teóricos.

A análise do rendimento de conversão baseia-se apenas na comparação da potência gerada pelo sistema fotovoltaico e a potência enviada para a rede eléctrica. Portanto não se trata do rendimento da conversão de energia solar em energia eléctrica do painel, que se situa, no máximo, por volta dos 24% em laboratório e 15% em utilizações práticas. Trata-se sim do rendimento do conjunto conversor matricial e filtros de entrada e saída.

A distorção harmónica (THD - *Total Harmonic Distortion*), é um factor de grande importância em sistemas ligados à rede eléctrica pública. Sistemas com grande distorção harmónica não são permitidos pois injectam harmónicas e causam instabilidade na rede. As harmónicas mais perturbadoras para a rede eléctrica são a 3ª, a 5ª e a 7ª, havendo limites para cada uma delas.

Considerando as correntes alternadas como a soma das suas componentes harmónicas, (5.1), onde  $i_{iH}$  é a componente da  $i$ -ésima harmónica da corrente.

$$i = \sum i_{iH} = i_{1H} + i_{3H} + i_{5H} + i_{7H} + \dots \quad (5.1)$$

O valor de THD calcula-se por (5.2).

$$THD = \frac{\sqrt{i^2 - i_{1H}^2}}{i} \times 100\% \quad (5.2)$$

Como o THD é o valor total da distorção harmónica, não é possível determinar, apenas com base neste valor, a possibilidade ou não de ligar o conversor à rede eléctrica. No entanto o THD é em grande medida constituído pelo conjunto das 3 primeiras harmónicas, pois são as de maior amplitude, e por esse motivo considera-se que é uma boa indicação.

Para valores de THD muito elevados a ligação à rede pode ser possível através de filtros adicionais.

A comparação dos resultados de simulação e teóricos é uma forma de verificar a validade do modelo e aferir o seu desempenho. Pequenas diferenças são naturais pois podem resultar de pequenos erros, como por exemplo erros de medição. Mas grandes diferenças podem ser indicadoras de desvios no comportamento do modelo de simulação.

## Ensaio 1: Variação de $I_s$ – variação da radiação solar

Tabela 5.1 – Resposta à variação do valor de  $I_s$ .

$I_s$	100	80	60	40	20	10
$I_o$	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
$m$	200	200	200	200	200	200
$V_t$	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02
$V_{teo}$	67,24	66,19	64,85	62,96	59,74	56,53
$I_{teo}$	93,08	74,38	55,71	37,06	18,45	9,19
$P_{teo}$	6259	4923	3612	2333	1102	520
$V$	67,23	66,19	64,84	62,95	59,71	56,45
$I$	93,09	74,39	55,71	37,07	18,47	9,20
$P$	6258	4924	3612	2334	1102	519
$I_{ef}$	7,83	6,32	4,76	3,14	1,50	0,69
$P_{rede}$	5400	4363	3282	2168	1036	479
$\eta_{teo}$	86,28	88,62	90,86	92,91	94,03	92,16
$\eta_{exp}$	86,28	88,61	90,87	92,90	94,01	92,24
THD	3,00	2,95	2,90	2,90	3,00	3,20

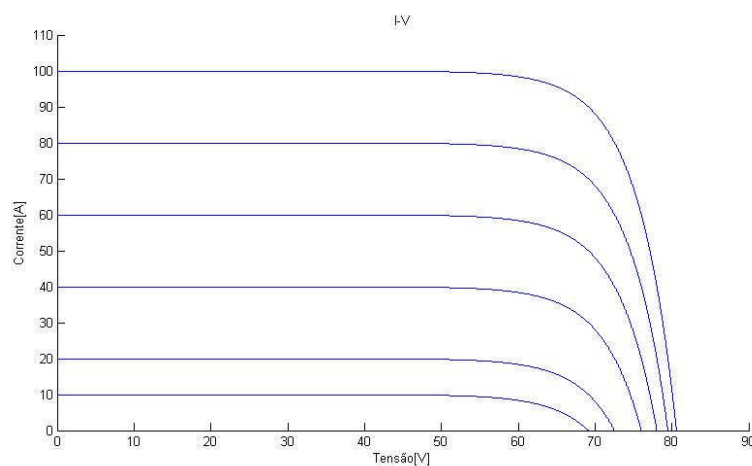


A variação de  $I_s$  pode ser entendida como uma variação da radiação ou uma variação do valor  $I_s^r$ , de acordo com (2.6).

Verifica-se que ao diminuir  $I_s$  a potência gerada pelo painel também diminui. Este facto traduz-se na diminuição da tensão e corrente do painel, sendo que a última é muito acentuada.

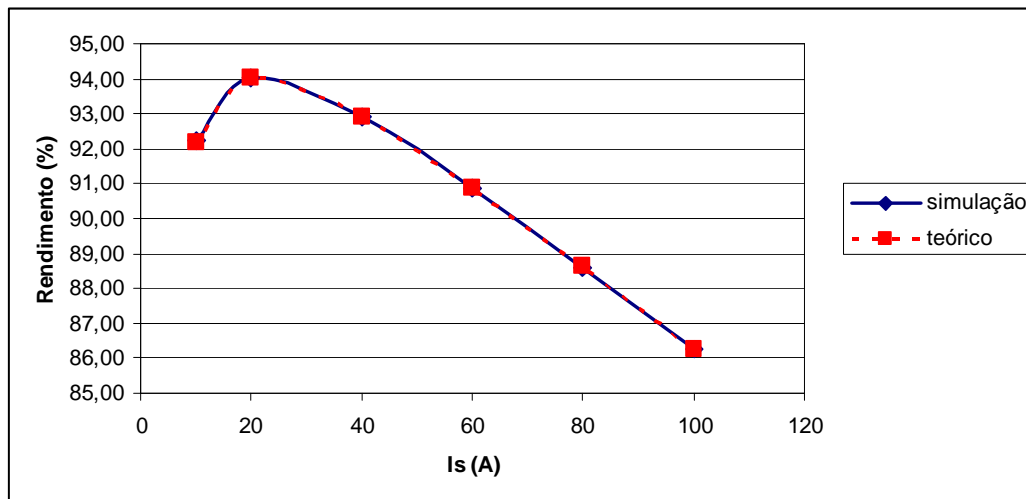
A comparação dos valores teóricos e de simulação leva-nos a crer que o modelo de simulação é aceitável não havendo variações dignas de registo.

Verifica-se que um aumento de radiação solar, ou seja, um aumento de  $I_s$ , aumenta a potência fornecida, tal como era previsto no capítulo 2. A comparação da figura 2.7 e da figura 5.1 mostra semelhanças notáveis, a escalas diferentes, no comportamento do módulo experimentado e do sistema fotovoltaico simulado.



**Figura 5.1 – Característica I-V teórica para vários níveis de radiação, G.**

O rendimento decresce com o aumento de  $I_s$ , figura 5.2, excepto para valores muito pequenos. A diminuição do rendimento é esperada uma vez que o aumento de  $I_s$  significa um aumento da corrente fornecida pelo painel. Esse aumento da corrente vai intensificar as perdas por efeito de Joule nos filtros e nos semicondutores. Já a diminuição de rendimento para valores de  $I_s$  muito pequenos pode ser sinónimo de pouca corrente do lado contínuo do conversor, dificultando o controlo do conversor e aumentando as perdas nos filtros.



**Figura 5.2 – Rendimento em função de  $I_s$ .**

O mesmo fenómeno verifica-se no THD. Geralmente, correntes maiores significam contribuições harmónicas maiores, uma vez que o aumento da amplitude da 1ª harmónica tende a ser acompanhado pelo aumento da amplitude das outras harmónicas. Mas para correntes relativamente pequenas existe maior distorção por haver maior dificuldade do sistema em controlar as correntes injectadas na rede.

## **Ensaio 2: Variação de $m$**

Geralmente considera-se que o parâmetro  $m$ , factor de idealidade do diódo, não se altera com as condições a que se expõe o painel, ou seja, não varia nem com a radiação solar nem com a temperatura. No entanto pode haver duas razões para a variação deste parâmetro. A primeira é que o parâmetro apresenta uma grande dependência do tipo de painel utilizado. A segunda é que o valor de  $m$  é afectado pelo número de módulos/células utilizados na construção do painel.

**Tabela 5.2 – Resposta à variação do valor de m.**

Is	40	40	40
Io	0,00001	0,00001	0,00001
m	200	100	50
Vt	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02
V teo	62,96	31,48	15,74
I teo	37,06	37,06	37,06
P teo	2333	1167	583
V	62,95	31,48	15,74
I	37,07	37,06	37,06
P	2334	1167	583
I ef	3,14	1,46	0,62
P rede	2168	1008	429
$\eta$ teo	92,91	86,41	73,52
$\eta$ exp	92,89	86,41	73,52
THD	2,90	6,20	14,75

Tal como se esperava, o valor da corrente contínua, I, é completamente indiferente ao valor de m. Já o valor da tensão, V, é fortemente afectado pela variação de m, como se podia prever por (2.5).

Uma vez que para um valor de m menor se tem uma tensão contínua menor é óbvio que a potência também será bastante menor, o que se irá traduzir em correntes por fase muito reduzidas.

O facto de, por um lado se ter tensões contínuas reduzidas e por outro correntes alternadas também reduzidas, implica que o controlador terá maior dificuldade em controlar as correntes de saída, verificando-se portanto uma maior distorção harmónica.

A distorção atinge valores relativamente elevados, cerca de 14,75%, que podem pôr em causa a possibilidade de ligar este sistema à rede eléctrica de baixa tensão, sem filtros adicionais. Este aumento de distorção afecta o rendimento do conversor, diminuindo-o drasticamente.

### **Ensaio 3: Variação de $I_0$**

A variação de  $I_0$  pode ser entendida como uma variação de  $I_0^T$ . Também poderia ser vista como uma variação de temperatura, mas nesse caso essa alteração teria que ser acompanhada pela variação de  $V_T$ , o que não se considerou.

**Tabela 5.3 – Resposta à variação do valor de  $I_0$ .**

$I_s$	40	40	40
$I_0$	0,00001	0,000005	0,000001
m	200	200	200
$V_t$	2,50E-02	2,50E-02	2,50E-02
$V_{teo}$	62,96	66,19	73,74
$I_{teo}$	37,06	37,19	37,46
$P_{teo}$	2333	2462	2762
V	62,95	66,18	73,72
I	37,07	37,20	37,47
P	2334	2462	2762
$I_{ef}$	3,14	3,33	3,76
P rede	2168	2295	2592
$\eta_{teo}$	92,91	93,23	93,82
$\eta_{exp}$	92,89	93,23	93,83
THD	2,90	2,80	2,50

Verifica-se que alterações significativas em  $I_0$  (uma diferença de 10 vezes o valor original) produzem uma alteração na tensão contínua, V, cerca de 20% o valor original, e uma quase insignificante alteração do valor da corrente, I, menos de 1 A.

As alterações no valor da tensão, V, estão de certo modo descritas em (2.5), tendo em conta que  $V_T$  permanece constante. Já as ligeiras alterações de corrente, I, são confirmadas por (2.3). Note-se que  $I_s$  e  $V_T$  permanecem constantes neste ensaio e  $I_0$  e V são alterados da forma descrita na tabela 5.3.

O rendimento e o THD melhoram ligeiramente para situações com  $I_0$  menor. Tal pode dever-se ao facto de, como a tensão continua é maior e a corrente se mantém relativamente constante, o controlo torna-se mais suave sem que haja maiores perdas nos filtros.

#### **Ensaio 4: Variação de $V_T$**

A variação de  $V_T$  está dependente apenas da temperatura a que o painel está sujeito. No entanto é necessário ter em conta que, tal como foi dito no ensaio 3, variando  $V_T$ , e portanto a temperatura, o valor de  $I_0$  também deveria ser alvo de modificação.

Admite-se que esse valor se mantém constante, de forma a estudar apenas o efeito da variação de  $V_T$ .

**Tabela 5.4 – Resposta à variação do valor de  $V_T$ .**

$I_s$	40	40	40	40
$I_0$	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
$m$	200	200	200	200
$V_t$	2,50E-02	3,50E-02	4,50E-02	5,50E-02
$V_{teo}$	62,96	88,12	113,33	138,52
$I_{teo}$	37,06	37,07	37,06	37,06
$P_{teo}$	2333	3266	4200	5133
$V$	62,95	88,15	113,30	138,45
$I$	37,07	37,06	37,07	37,08
$P$	2334	3267	4200	5133
$I_{ef}$	3,14	4,49	5,82	7,16
$P_{rede}$	2168	3095	4018	4939
$\eta_{teo}$	92,91	94,74	95,67	96,22
$\eta_{exp}$	92,90	94,73	95,66	96,22
THD	2,90	2,00	1,50	1,30

Os resultados obtidos neste ensaio são bastante semelhantes aos resultados obtidos no ensaio 3, ou seja, o efeito do aumento de  $V_T$  é semelhante ao efeito de diminuição de  $I_0$ .

A diferença mais relevante encontra-se no facto da corrente contínua,  $I$ , permanecer inalterada, ao contrário do ensaio 3 onde existia uma ligeira alteração. Tal deve-se ao facto do valor de  $I_0$  se manter constante e de o aumento de  $V_T$  ser acompanhado pelo respectivo aumento da tensão contínua,  $V$ .

### **Ensaio 5: Variação de $V_T$ e $I_0$ – variação de temperatura**

Realizou-se um teste onde se variou  $V_T$  e  $I_0$  de forma a simular a variação de temperatura.

Para tal é necessário realizar alguns cálculos adicionais de modo a achar, para a gama de valores testados, os valores de  $I_0'$  e  $m'$ .

Considerando  $m' = 2$  e sabendo que, para  $V_T = 0,025$ ,  $I_0 = 10^{-5}$  e  $T = 289,86$  K, então, com recurso a (2.12), concluiu-se que  $I_0' = 2,003 \times 10^{-5}$ .

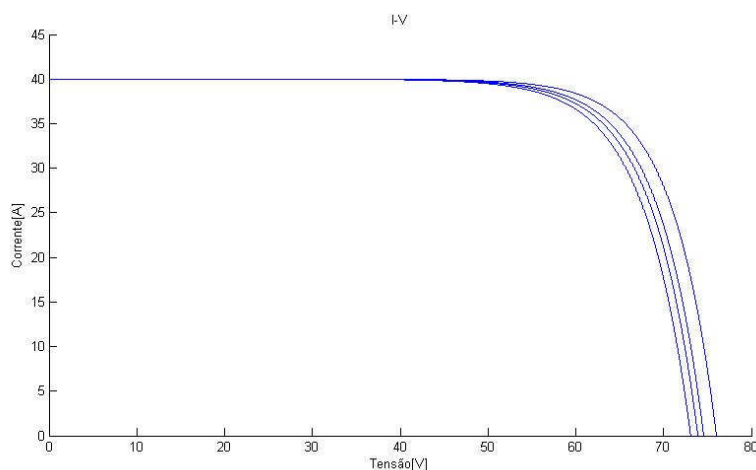
Conhecendo estes valores foi possível realizar a simulação.

**Tabela 5.5 – Resposta à variação da temperatura.**

Is	40	40	40	40
Io	1,000E-5	2,003E-5	2,844E-5	4,327E-5
m	200	200	200	200
Vt	2,50E-02	2,57E-02	2,61E-02	2,66E-02
V teo	62,96	61,4	60,66	59,76
I teo	37,06	36,91	36,83	36,73
P teo	2333	2266	2234	2195
V	62,95	61,39	60,65	59,74
I	37,07	36,92	36,84	36,74
P	2334	2267	2234	2195
I ef	3,14	3,05	3,00	2,95
P rede	2168	2103	2071	2033
$\eta$ teo	92,91	92,80	92,72	92,64
$\eta$ exp	92,9	92,79	92,71	92,65
THD	2,90	2,97	3,00	3,05

Os resultados de simulação mostram que a corrente, I, varia apenas ligeiramente enquanto que a tensão, V, é bastante afectada.

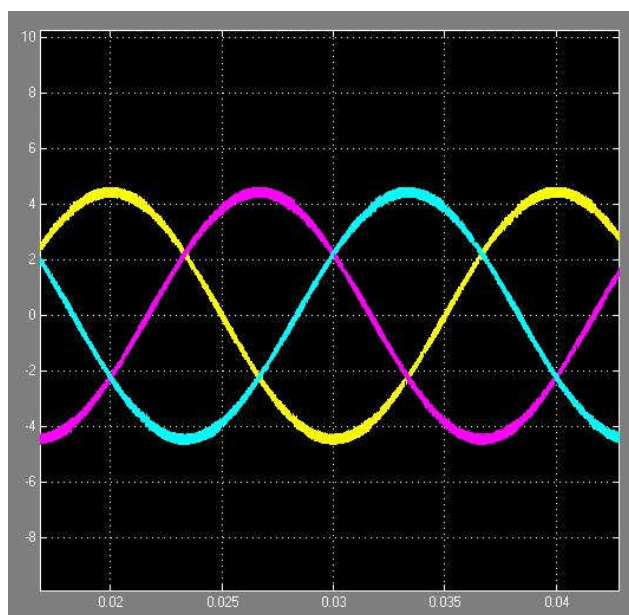
Verifica-se que um aumento de temperatura, ou seja, um aumento de  $V_T$ , diminui a potência fornecida, tal como era previsto no capítulo 2. A comparação da figura 2.10 e da figura 5.3 mostra semelhanças notáveis, a escalas diferentes, no comportamento do módulo experimentado e do sistema fotovoltaico simulado.



**Figura 5.3 – Característica I-V teórica para várias temperaturas, T.**

Os rendimentos decrescem ligeiramente, provavelmente fruto do aumento da distorção, também ele ligeiro. Por sua vez a distorção harmónica aumenta ligeiramente devido à queda da tensão, V, com o aumento de temperatura.

Na figura 5.4 visualiza-se as correntes injectadas na rede para o caso modelo ( $I_s=40$ ,  $m=200$ ,  $I_0 = 10^{-5}$ ,  $V_T=2,5 \times 10^{-2}$ ).



**Figura 5.4 – Correntes injectadas na rede.**

## **5.2 – Testes com parâmetros variantes no tempo**

Os ensaios com parâmetros variantes no tempo têm como objectivo:

- Análise da resposta no tempo do sistema;
- Simulação de um hipotético “período solar”;
- Análise fiável do sistema em situações práticas;
- Comparação de resultados de simulação e teóricos.

Espera-se que os testes de parâmetros variantes no tempo sejam mais fiáveis no que respeita ao comportamento do sistema numa situação prática, ou seja, em condições que simulam uma situação possível de ocorrer na prática.

Tal deve-se ao facto de, tal como nestes testes, os valores de temperatura e radiação solar sejam variantes ao longo do dia e portanto o conversor deve ser capaz de acompanhar essas mudanças sem grandes atrasos.

Por outro lado é importante verificar se a mudança das condições a que o sistema está sujeito, e por conseguinte a constante mudança dos valores de referência do controlador, introduz distorção ou perturbações adicionais.

Por fim, é importante comparar os resultados da simulação com os resultados calculados teoricamente a fim de concluir se o modelo de simulação é fiável e robusto.

Como as variações da radiação solar e da temperatura ao longo do dia são fenómenos contínuos, ou seja não se admite variações bruscas em intervalos de tempo nulos ou mesmo muito reduzidos, privilegiam-se as sinusóides como sinais de teste deste tipo de fenómenos.

Realizar-se-á um estudo isolado para a variação de  $I_s$  e  $V_T$ , seguido de um ensaio onde se irá fazer variar ambas as variáveis.

Nestes ensaios considerou-se  $m=200$  e  $I_s=40$ ,  $I_0=10^{-5}$  e  $V_T=2,5 \times 10^{-2}$ , excepto para os casos em que se afirmou o contrário.

## Ensaio 1: Variação da radiação solar – entrada em escada

Este ensaio procura determinar o comportamento do sistema quando existe variação da radiação solar, admitindo que a radiação solar varia em escada ao longo de um período do dia.

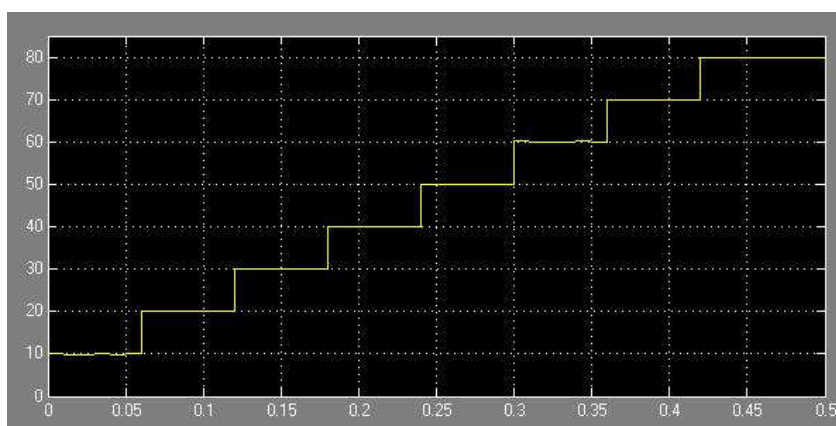
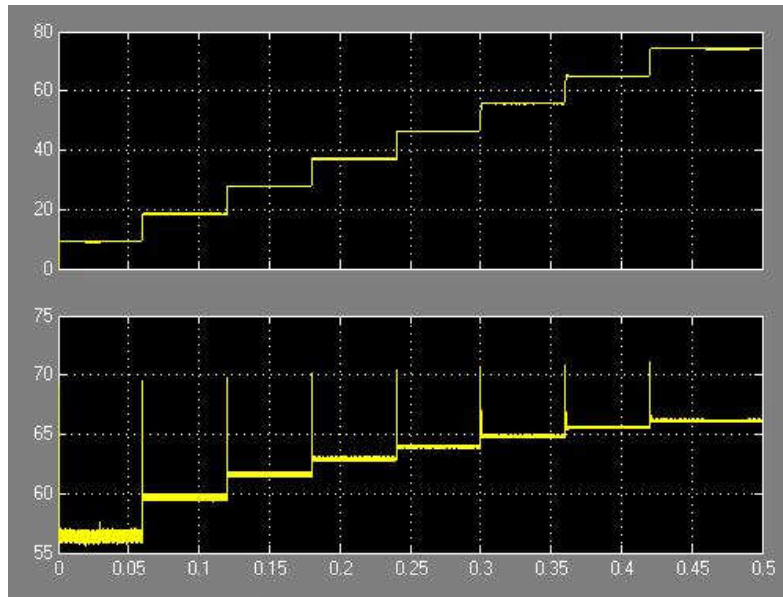


Figura 5.5 – Sinal de entrada do modelo de simulação.

As grandezas que o painel forneceu para este tipo de entrada foram as que se pode observar na figura 5.6.



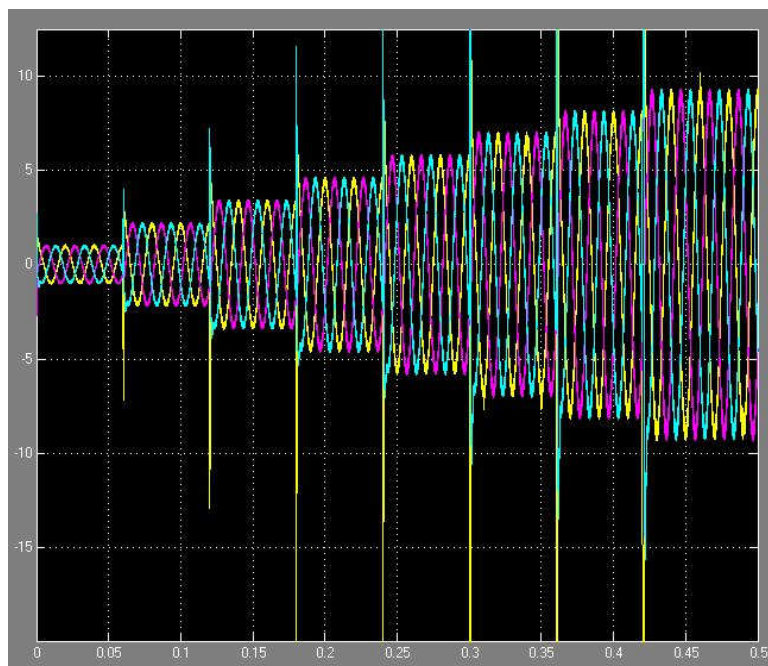


**Figura 5.6 – Resposta de  $I_{DC}$ , em cima, e  $V_{DC}$ , em baixo, no tempo.**

Observa-se que, nos instantes em que o sinal de entrada aumenta em escalão, a tensão,  $V_{DC}$ , apresenta picos.

As entradas em escalão podem causar alguns problemas no sistema pois os picos de tensão, se muito elevados, podem danificar os semicondutores.

Na figura 5.7 observamos as correntes injectadas na rede.



**Figura 5.7 – Correntes injectadas na rede.**

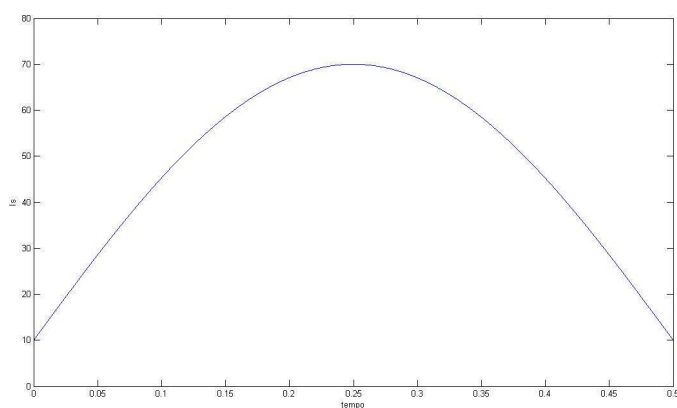
Observa-se que as correntes são equilibradas e que seguem o valor da radiação solar. Também é possível verificar picos, ou transitórios, de corrente nos instantes em que a radiação varia em escalão.

Este tipo de entrada no sistema, em escada, pode causar alguns problemas ao conversor, potencia o dano do conversor e injecta picos de corrente na rede.

No entanto este tipo de variação da radiação solar não é, de todo, comum. A radiação solar varia de forma contínua e caracteriza-se por variações pequenas em pequenos intervalos de tempo.

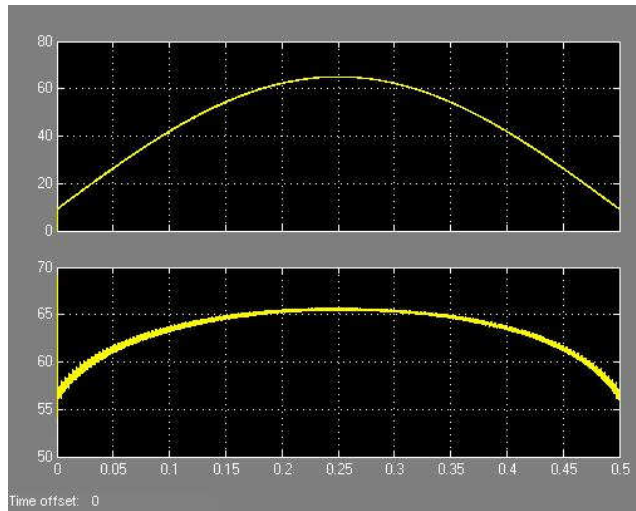
## Ensaio 2: Variação da radiação solar – entrada sinusoidal

Para evitar os problemas do ensaio anterior, considerou-se que a radiação solar varia de forma semelhante a uma onda sinusoidal.



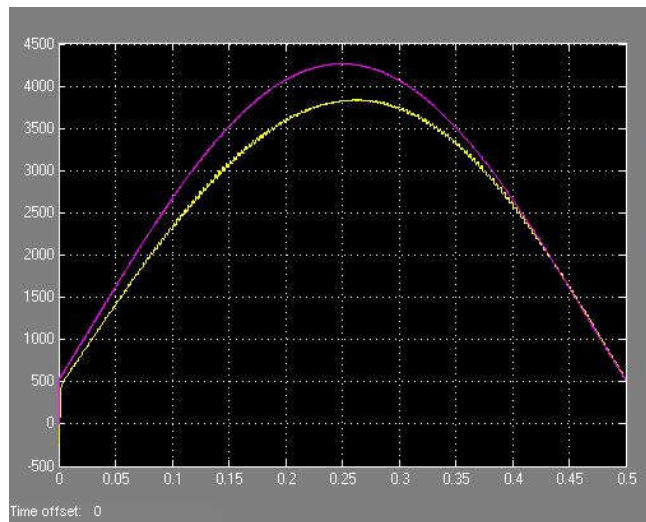
**Figura 5.8 – Sinal de entrada do modelo de simulação.**

O período do sinal de entrada foi escolhido apenas de modo a não sobrecarregar a simulação. Ou seja, o período de simulação, 0,5 segundos, representa o “período solar”, cerca de 12-16 horas consoante a estação do ano. O sinal também apresenta um *offset* de 10 A pois admite-se que o painel não produzirá energia para valores menores que esse.



**Figura 5.9 – Resposta de  $I_{DC}$ , em cima, e  $V_{DC}$ , em baixo, no tempo.**

A resposta da corrente e tensão contínua estão de acordo com o normal funcionamento de um painel fotovoltaico. O aumento de  $I_s$  faz aumentar  $I_{DC}$  e  $V_{DC}$ , embora este último aumente de forma mais ligeira.



**Figura 5.10 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede.**

Na figura 5.10 podemos ver a roxo a potência produzida pelo painel e a amarelo a potência injectada na rede.

A potência injectada na rede foi calculada com recurso a um bloco do *Matlab Simulink* chamado *3-Phase Instantaneous Active & Reactive Power*. Este bloco, como diz o nome, calcula a potência activa e reactiva trifásica. No entanto, como se pode ver na figura 5.3, parece haver um certo atraso entre o valor real instantâneo e o valor que é calculado. Deste modo não é possível determinar a variação do rendimento ao longo do tempo mas é possível estimar que o rendimento mínimo que se obtém neste caso é cerca de 90%. Além disso verifica-se que o

rendimento diminui com o aumento da potência, tal como verificado nos testes com parâmetros fixos no tempo. O comportamento do sistema está de acordo com o previsto na figura 2.8.

### Ensaio 3: Variação da temperatura

Este ensaio procura determinar o comportamento do sistema quando existe variação da temperatura.

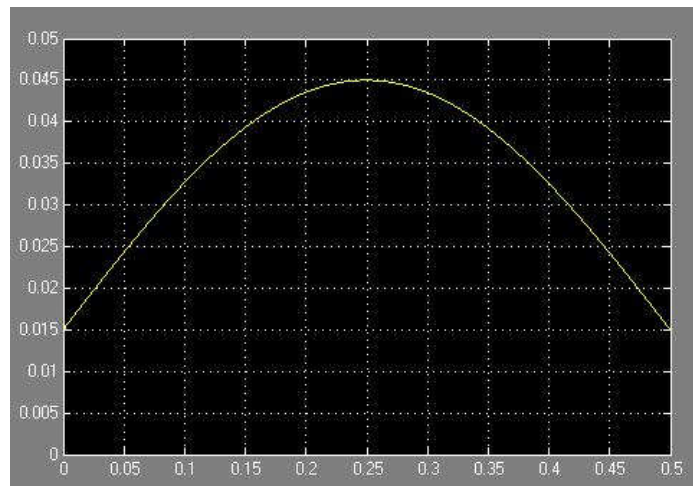
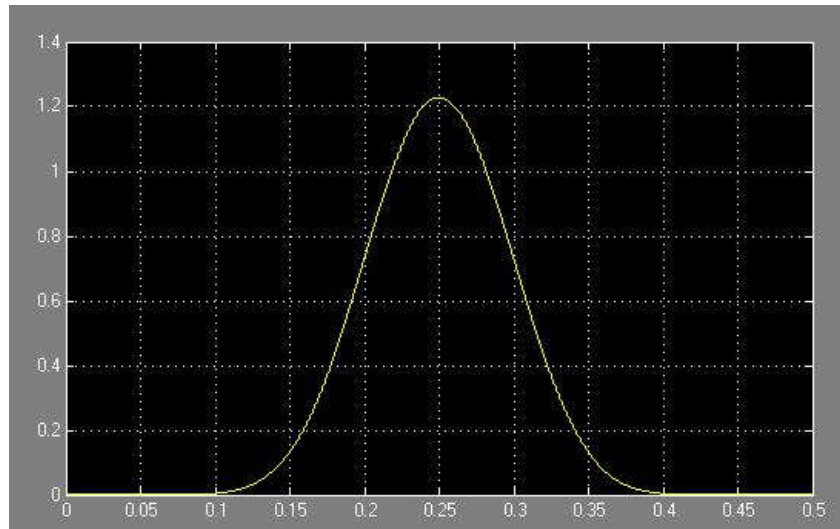


Figura 5.11 – Sinal de entrada de  $V_T$  do modelo de simulação.

Mais uma vez o período do sinal de entrada foi escolhido apenas de modo a não sobrecarregar a simulação. O sinal também apresenta um *offset* mas por motivos diferentes, neste caso assumiu-se que a temperatura nunca atinge o valor de 0 K, o que é razoável.

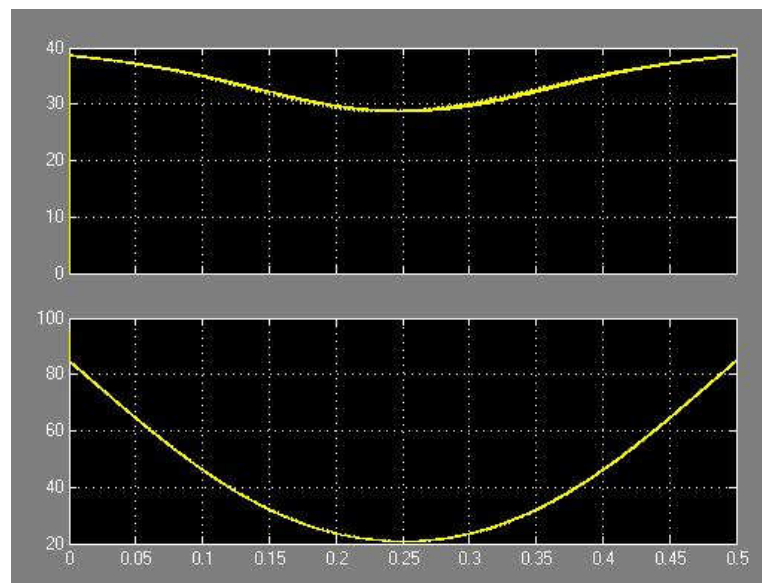
Mais uma vez consideraram-se os dados do ensaio 5 do ponto 5.1 deste capítulo ( $m'=2$ ,  $I_0^r = 2,003 \times 10^{-5}$ ).

O sinal de  $I_0$  resultante é o apresentado na figura 5.12.



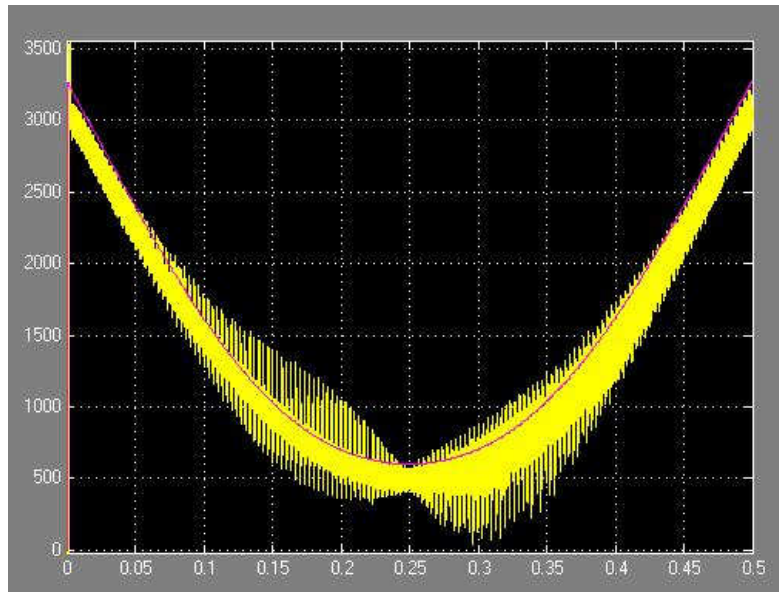
**Figura 5.12 – Sinal de entrada de  $I_0$ , calculado a partir de  $V_T$ .**

A tensão e corrente fornecidas pelo painel podem-se visualizar na figura 5.13.



**Figura 5.13 – Resposta de  $I_{DC}$ , em cima, e  $V_{DC}$ , em baixo, no tempo.**

Mais uma vez o comportamento de  $I_{DC}$  e  $V_{DC}$  é o esperado. A variação de temperatura afecta ligeiramente o valor da corrente,  $I_{DC}$ , e uma variação abrupta da tensão,  $V_{DC}$ .



**Figura 5.14 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede.**

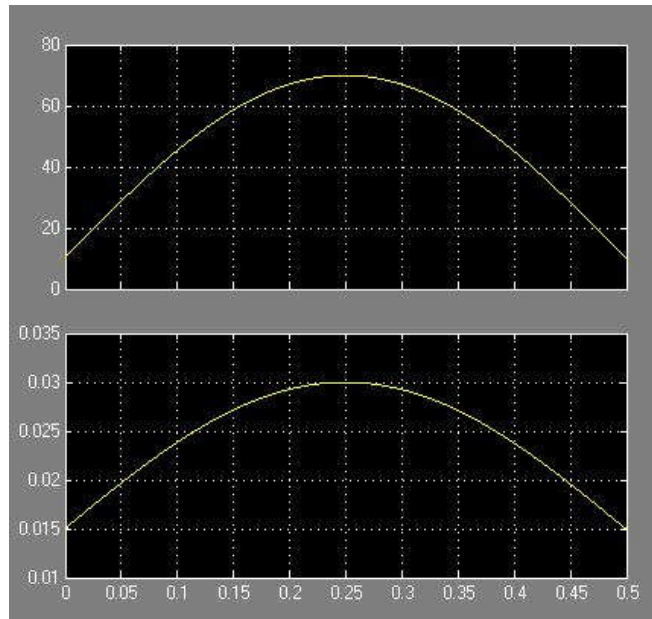
Na figura 5.14 podemos ver a laranja a potência produzida pelo painel e a verde a potência injectada na rede.

Existe muito tremor no sinal de potência injectada na rede mas é possível ver claramente que o comportamento do sistema corresponde ao esperado, figura 2.11.

O rendimento parece ser menor com o aumento da temperatura, o que está de acordo com os ensaios anteriores.

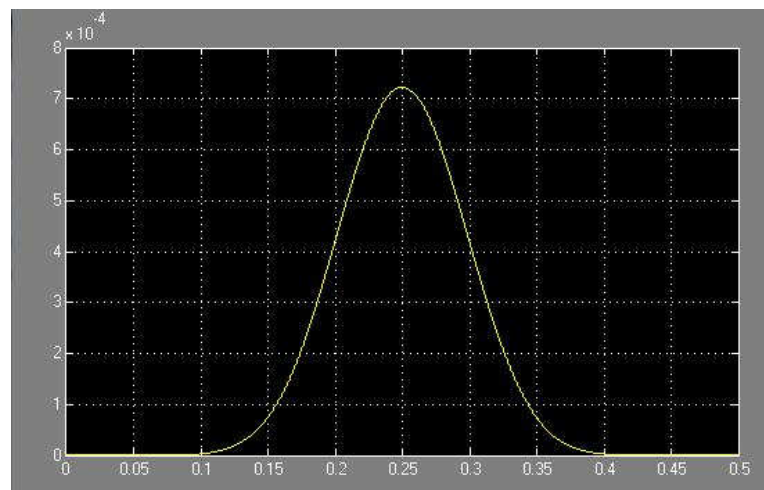
#### **Ensaio 4: Simulação de um “período solar”**

Este ensaio tem como objectivo testar o comportamento do conversor para uma situação onde tanto a radiação como a temperatura variam, ou seja, uma situação semelhante a um dia comum. Mais uma vez admite-se que  $I_0$  permanece constante.

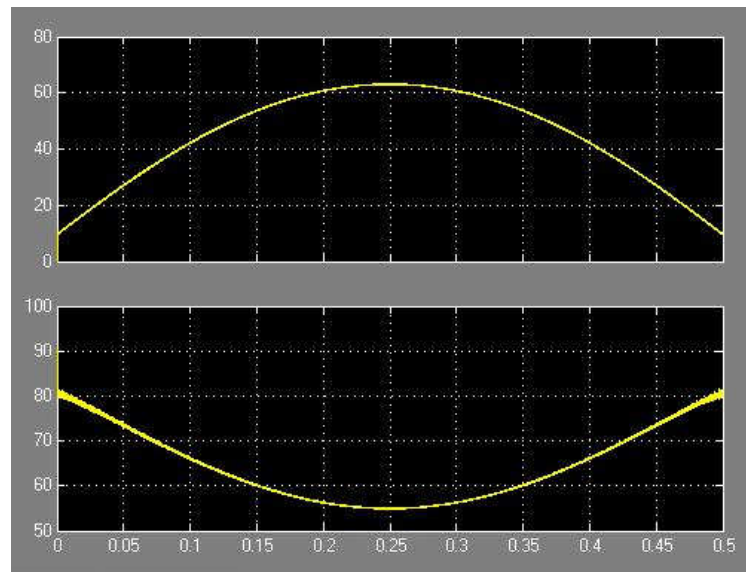


**Figura 5.15 – Sinais de entrada do modelo de simulação,  $I_s$ , em cima, e  $V_T$ , em baixo.**

Os sinais de  $I_s$  e  $V_T$  são ambos sinusoidais e representam aproximadamente o comportamento da temperatura e radiação solar ao longo de um dia. Mais uma vez o período das ondas, 0,5 segundos, foi escolhido de forma a não tornar pesada a simulação e representa o período do dia onde a radiação solar tem um valor mínimo aceitável para que o conversor funcione. Os *offsets* dos sinais devem-se às mesmas razões apresentadas nos dois últimos ensaios.

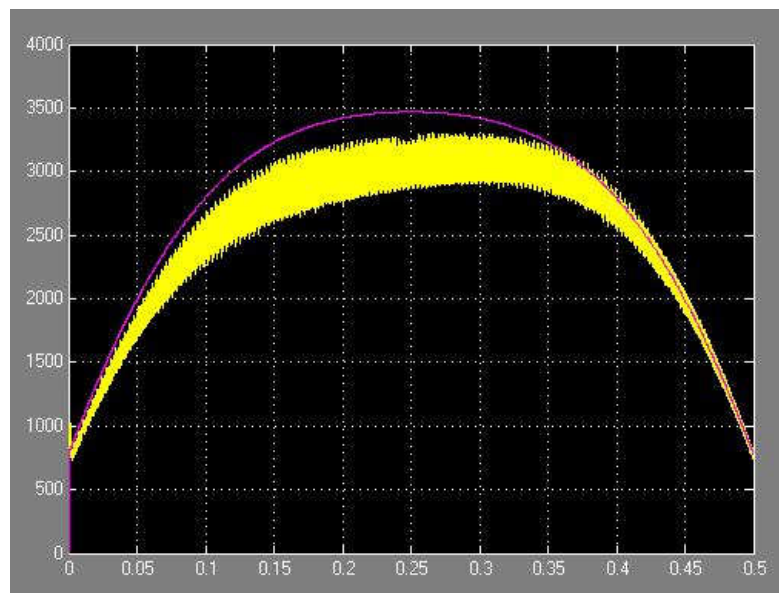


**Figura 5.16 – Sinal de entrada de  $I_0$ , calculado a partir de  $V_T$ .**



**Figura 5.17 – Resposta de  $I_{DC}$ , em cima, e  $V_{DC}$ , em baixo, no tempo.**

O painel funciona de acordo com o previsto actuando tanto na corrente como na tensão contínua. É possível dizer que os resultados deste ensaio são o conjunto dos resultados do ensaio 1 e 2. Repare-se que a grande diferença entre o que se pode visualizar no ensaio 1 e neste ensaio é o facto de a tensão variar fortemente e não de forma ligeira e a diferença entre o que se observa no ensaio 2 e este ensaio é o facto de a corrente aumentar.



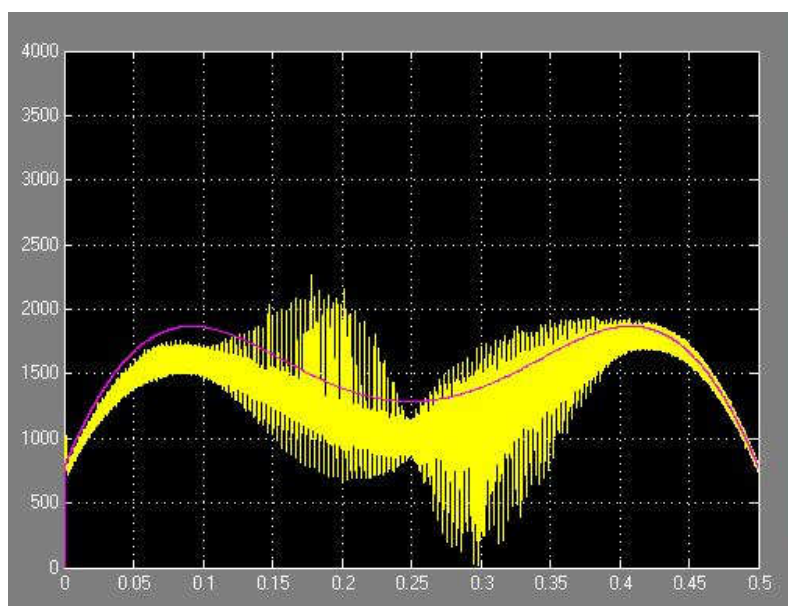
**Figura 5.18 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede.**

Na figura 5.18 podemos ver a roxo a potência produzida pelo painel e a amarelo a potência injectada na rede.



Mais uma vez verifica-se que existe muito tremor no sinal da potência injectada, devido certamente ao bloco de *Simulink* utilizado para o seu cálculo. No entanto parece que os rendimentos do conversor se situam na média dos dois casos estudados anteriormente, ensaio 1 e 2. Também parece existir algum atraso no sinal, tal como se verificou no ensaio 1.

É importante notar que a forma da figura 5.16 dependerá muito das entradas no sistema. Realizou-se outro ensaio, com amplitudes no sinal  $V_T$  diferentes para ilustrar este facto, figura 5.19.



**Figura 5.19 – Potência produzida pelo painel e potência injectada na rede para um caso alternativo.**

### **5.3 – Conclusões dos testes realizados**

Pode-se concluir, pelos vários testes realizados, que o modelo de simulação é fiel ao sistema fotovoltaico, como se pôde ver por comparação dos resultados de simulação e teóricos.

A comparação dos resultados obtidos com os gráficos das figuras 2.7, 2.8, 2.10 e 2.11, mostra que os valores são razoáveis, embora se encontrem a escalas diferentes.

Além disso o conversor apresenta rendimentos geralmente acima dos 90%, o que é bastante positivo. Os rendimentos não decrescem necessariamente com o aumento da potência mas sim com o aumento da corrente  $I_S$  que, naturalmente, aumenta o valor da corrente contínua e por isso a potência de perdas, devido aos filtros.

Outro factor que diminui o rendimento do conversor é o facto de o painel produzir tensões ou correntes contínuas muito baixas, que dificultam o controlo do conversor, produzindo maior ruído e distorção harmónica, o que se traduz em perdas.

Por fim conclui-se que, em situações normais, em que as temperaturas e níveis de radiação solar assumem valores razoáveis e não variam de forma brusca, o conversor matricial apresenta ótimos resultados quando associado a um painel fotovoltaico.

## 6 – Conclusões

Este trabalho tinha como objectivo o estudo da aplicação de um conversor matricial a um sistema fotovoltaico. Para tal foram estudadas as 3 componentes necessárias para a sua realização, o sistema fotovoltaico, o conversor matricial e o modelo de controlo.

O estudo do sistema fotovoltaico permitiu compreender o seu funcionamento e, desse modo, criar um modelo adequado de simulação. O teste do modelo de simulação do sistema fotovoltaico revelou a adequação do modelo em função das expressões matemáticas que regem o funcionamento do painel. Além disso, comparando os resultados de simulação com valores reais de módulos verificou-se a equivalência de resultados, a escalas diferentes.

O estudo do conversor permitiu compreender a sua estrutura que foi posteriormente adequada ao tipo de conversão que se pretendia, AC-DC. O teste do modelo de simulação do conversor revelou rendimentos elevados para a resistência de condução dos semicondutores considerada, excepto para condições de funcionamento do sistema fotovoltaico pouco razoáveis.

O estudo do modelo de controlo obrigou à realização de vários controladores de forma a regular as duas componentes do sistema que se pretendia controlar. O teste do modelo de controlo mostra que a solução adoptada realiza com sucesso as operações pretendidas. Além disso o sistema apresenta uma boa resposta no tempo, seguindo com facilidade pequenas variações nas entradas em pequenos intervalos de tempo. A excepção é quando se simula o sistema com sinais de entrada pouco razoáveis, tais como sinais em escada, onde as entradas variam em escalão. Verificou-se que geralmente a distorção da tensão e corrente do lado AC é relativamente pequena e raramente deve ser necessário o uso de filtros adicionais.

Pode-se concluir que o modelo de simulação é adequado à aplicação que se pretende, apresentando resultados satisfatórios a todos os níveis e os objectivos do trabalho foram alcançados.

Conclui-se que a utilização de topologias de conversão matricial em sistemas fotovoltaicos é viável, no sentido em que, não só é possível, mas também apresenta bons resultados.

De futuro, poderia ser interessante a aplicação laboratorial deste modelo, de forma a confirmar os resultados obtidos e verificar as diferenças de rendimento entre o modelo de simulação e o modelo experimental.

## Referências bibliográficas

António Menino, José Antunes; “*Processamento Electricamente Não Poluente de Energia Eléctrica*”; Instituto Superior Técnico; Julho 2002.

Axel Schuster; “*A Matrix Converter without Reactive Clamp Elements for an Induction Motor Drive System*”; Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; 1998.

D.G. Holmes, T.A. Lipo; “*Implementation of a Controlled Rectifier Using AC-AC Matrix Converter Theory*”; IEEE; 1989; pp 353-359.

J. Fernando A. da Silva, V. Fernão Pires, Sónia Ferreira Pinto, J. Dionísio Barros; “*Advanced Control Methods for Power Electronics Systems*”; Mathematics and Computers in Simulation 63; 2003; pp 281-295.

J.B. Ejea, E. Sanchis-Kilders, J.A. Carrasco, J.M. Espi, A. Ferreres; “*Implementation of Bi-Directional AC-DC Matrix Converter*”; Electronic Letters Vol. 38 No. 16; 1st August 2002; pp 933-934.

Jun Oyama, Tsuyoshi Higuchi, Ryuta Tsukamoto; “*Power Factor Improvement of PWM Matrix Converter Using Intermediate Voltage*”; IEEE, PCC-Yokohama; 1993.

Jun Oyama, Tsuyoshi Higuchi, Takashi Abe, Shouji Matsuba, Ralph Teichmann; “*Application of ARCP Matrix Converter to AC/DC Conversion*”; IEEE, PCC-Osaka; 2002; pp 1061-1066.

R. García-Gil, J.M. Espí-Huerta, R. de la Calle, E. Maset, J. Castelló; “*Four-Quadrant AC-DC Matrix Converter With High-Frequency Isolation*”; IEE; 2004; pp 515-520.

Ricardo Santos, Dinis Honrado; “*Conversor Elevador Quadrático para Aproveitamento de Energia Renovável*”; Instituto Superior Técnico; Outubro de 2006.

Rui M.G. Casto; “*Introdução à Energia Fotovoltaica*”; Instituto Superior Técnico; Maio 2007, ed. 2.

Seyed Hossein Hosseini, Ebrahim Babaei; “*A Novel Modulation Method for DC-AC Matrix Converters Under Distorted DC Supply Voltage*”; Proceedings of IEEE TENCON'02; 2002; pp 1970-1973.

T.F. Podlesak, A.G. Stewart; “*Power Conditioning Research at ARL Adelphi*”; Presented at the DARPA/EPRI Megawatt Review; 12-13 January 1999.

**Brochuras e fichas técnicas utilizadas:**

Product Brochure, Shell Solar Photovoltaic Product; August 2002; Revised 2nd Edition.

Product Information Sheet, Shell Solar, SP10.

Product Information Sheet, Shell Solar, SP140-PC.

Product Information Sheet, Shell Solar, SP75.

## Anexo A – Modelo de Simulação

Neste anexo será analisado cada um dos blocos que constituem o modelo de simulação.

Na figura A.1 podemos ver um diagrama de blocos do sistema completo.

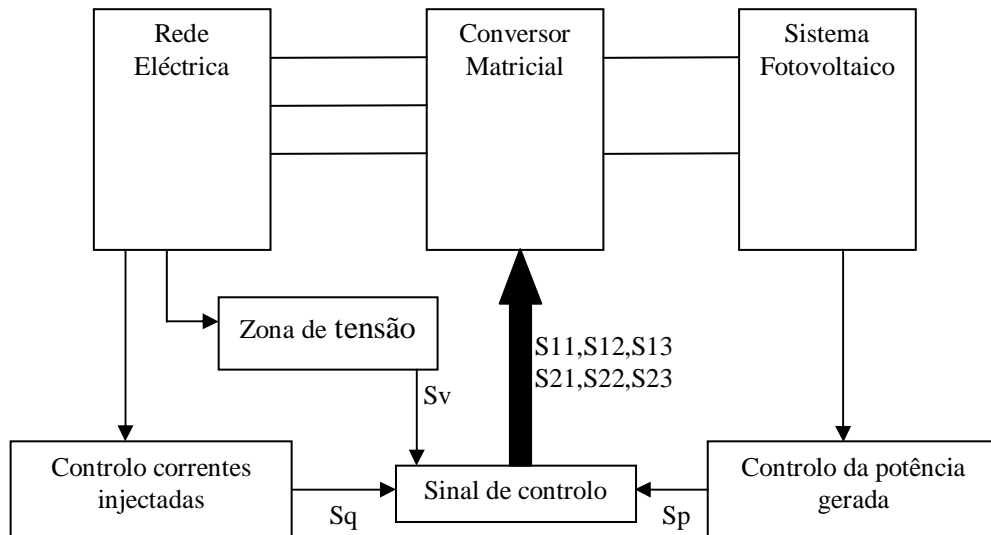


Figura A.1 – Diagrama do sistema simulado.

### A.1 – Bloco Sistema Fotovoltaico

Este bloco tem como função simular o comportamento de um módulo/painel fotovoltaico.

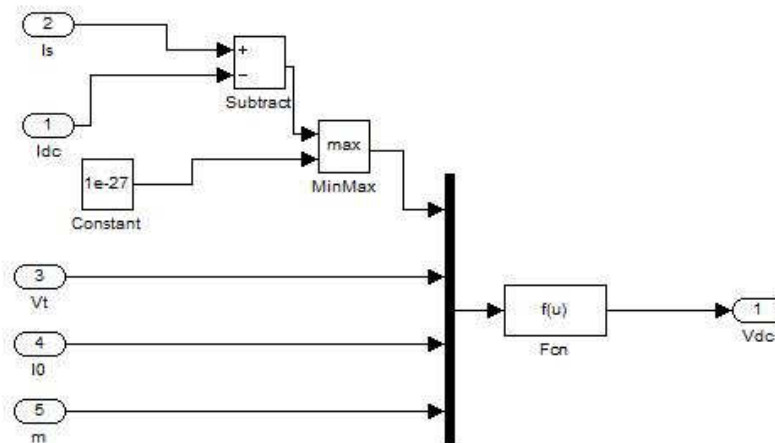


Figura A.2 – Bloco do sistema fotovoltaico.

O bloco recebe os dados do painel e a corrente  $I_{dc}$  medida na saída do painel. À saída o bloco coloca o valor de  $V_{dc}$ , calculado com recurso à função do bloco  $F_{cn}$ , que é igual a (2.6).

Uma vez que a diferença de  $I_s - I_{dc}$  não pode ser menor que zero, o que pode ocorrer nos instantes iniciais de funcionamento devido a um transitório de corrente, colocou-se o bloco  $MinMax$  que realiza o cálculo do valor máximo comparando a diferença com uma constante de valor muito pequeno.

## A.2 – Bloco MPPT

Este bloco tem como função controlar a potência gerada para que se produza sempre o máximo de potência disponível.

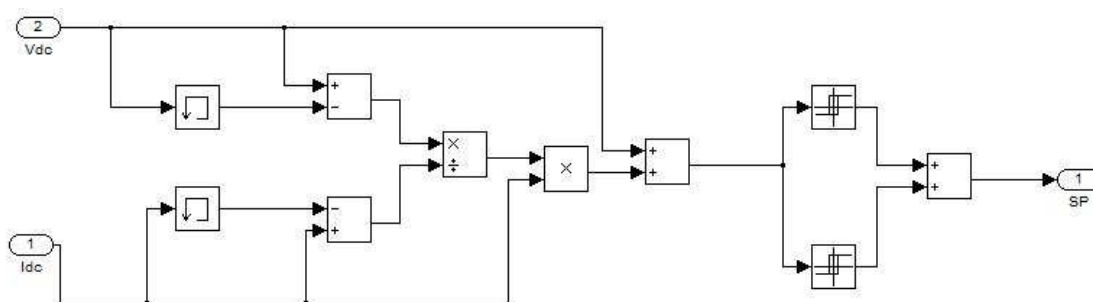


Figura A.3 – Bloco do MPPT

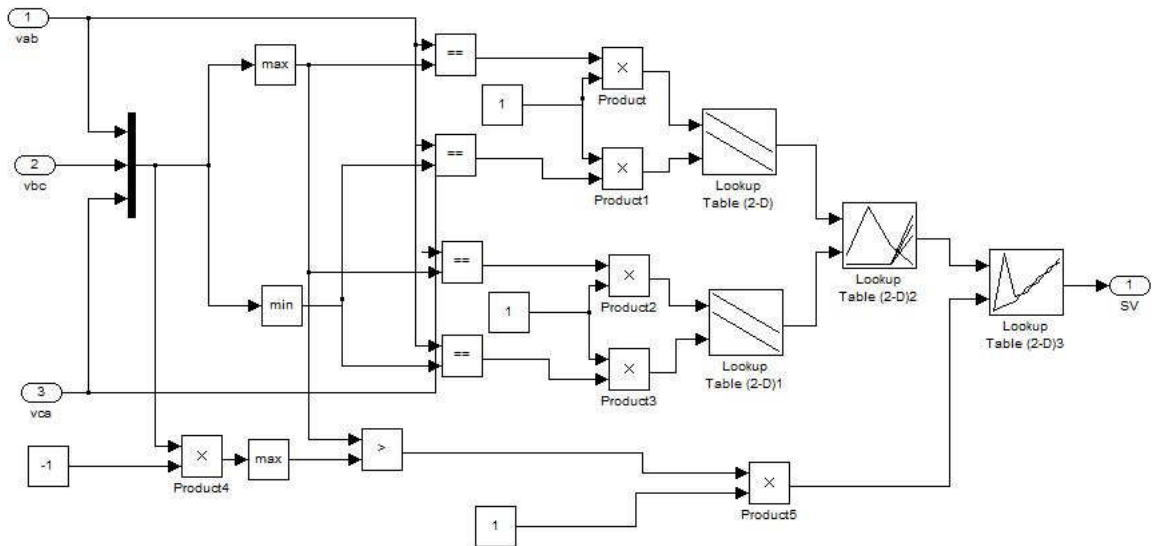
O bloco tem como entrada a corrente,  $I_{dc}$ , e a tensão,  $V_{dc}$ , geradas pelo painel fotovoltaico e como saída o sinal de controlo  $SP$ .

Recorre-se a blocos de memória para armazenar o último valor medido de  $V_{dc}$  e  $I_{dc}$  e realiza-se o cálculo de (4.6).

O sinal  $SP$  é calculado com recurso a um comparador de 3 níveis.

## A.3 – Bloco zona de tensão

Este bloco tem como função efectuar a divisão das tensões de entrada por zonas, que se pode ver na figura 4.4.



**Figura A.4 – Bloco zona de tensão**

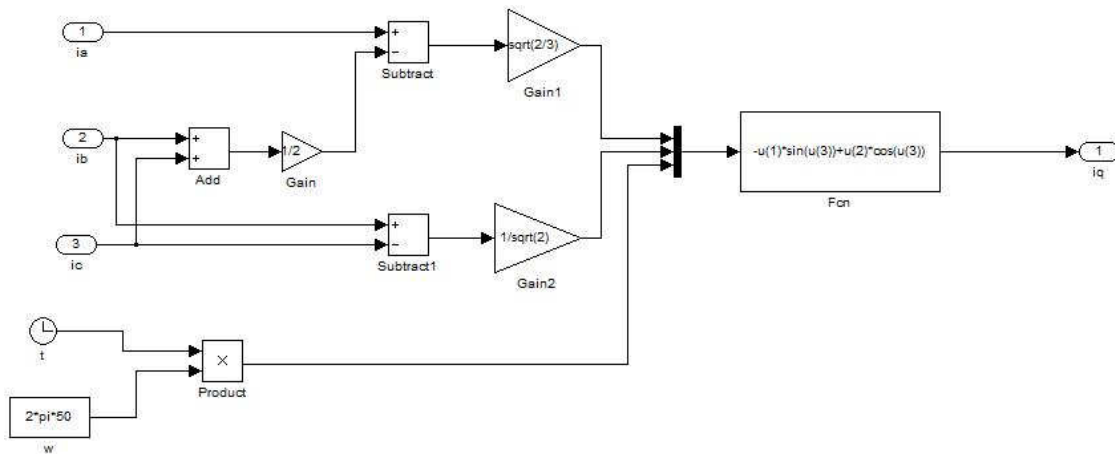
O bloco tem como entradas as tensões compostas e como saída o sinal auxiliar de controlo SV que indica a zona de tensão de 1 a 12.

O bloco realiza várias comparações dos valores das tensões compostas e das tensões compostas inversas (-vab, -vbc e -vca).

Os produtos com o valor 1, realizados entre as várias comparações, servem para assegurar que não existem conflitos de valores, devido às saídas dos comparadores lógicos.

## **A.4 – Bloco Transformação e SQ**

O cálculo do sinal de controlo SQ, é realizado com recurso a dois blocos (que poderiam ser juntos num único mas ficaria mais confuso).



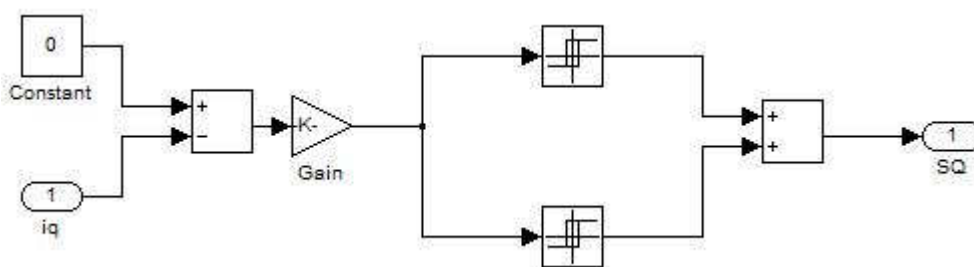
**Figura A.5 – Bloco Transformação.**



O bloco da figura A.5 calcula o valor de  $i_q$ . Para tal tem como entradas as correntes injectadas na rede.

O cálculo da componente q da corrente é realizado em dois passos: transformação de Concordia (4.8), seguida de transformação de Blondel-Park (4.9), esta última no bloco Fcn.

Em seguida calcula-se o sinal SQ, figura A.6.

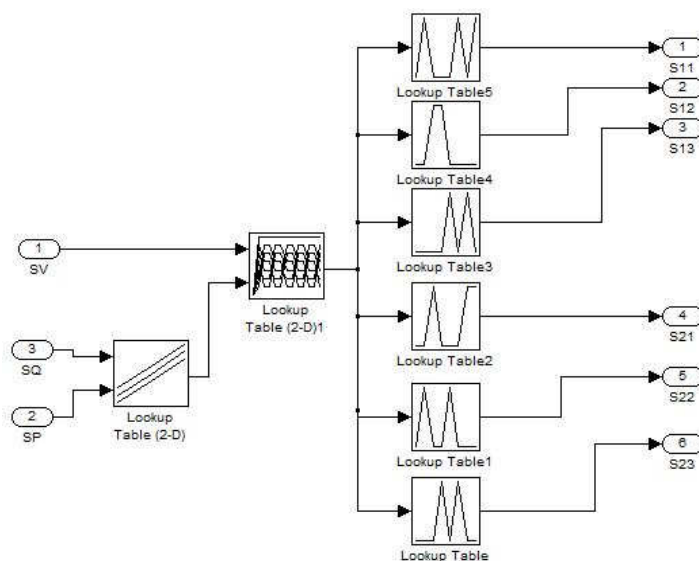


**Figura A.6 – Bloco SQ.**

Este bloco compara o valor anterior,  $i_q$ , com zero. O erro é amplificado, por o seu valor ser, à partida, muito pequeno. SQ é calculado com recurso a um comparador de 3 níveis semelhante ao da figura A.3.

## **A.5 – Bloco circuito de disparo**

Este bloco tem como função determinar quais os semicondutores que passam à condução e accioná-los.



**Figura A.7 – Bloco circuito de disparo**

Este bloco tem como entradas os dois sinais de controlo, SQ e SP, e o sinal auxiliar, SV. Como saídas temos 6 sinais, um para cada semiconductor para os colocar ao corte ou em condução.

Para efectuar essa operação são usadas várias *look-up tables*. A primeira conjuga os dois sinais de controlo num único sinal, tabelas A.1 e A.2.

**Tabela A.1 – Efeitos da conjugação dos 2 sinais de controlo.**

		SP		
		0	1	2
SQ	0	$i_q < 0$ $\frac{dP}{dt} < 0$	$i_q < 0$ $\frac{dP}{dt} = 0$	$i_q < 0$ $\frac{dP}{dt} > 0$
	1	$i_q = 0$ $\frac{dP}{dt} < 0$	$i_q = 0$ $\frac{dP}{dt} = 0$	$i_q = 0$ $\frac{dP}{dt} > 0$
	2	$i_q > 0$ $\frac{dP}{dt} < 0$	$i_q > 0$ $\frac{dP}{dt} = 0$	$i_q > 0$ $\frac{dP}{dt} > 0$

**Tabela A.2 – Saída do bloco Lookup Table (2-D).**

		SP		
		0	1	2
SQ	0	0	1	2
	1	3	4	5
	2	6	7	8

A segunda tabela, Lookup Table (2-D), irá determinar o vector a usar, consoante a zona de tensão, tabela A.3.

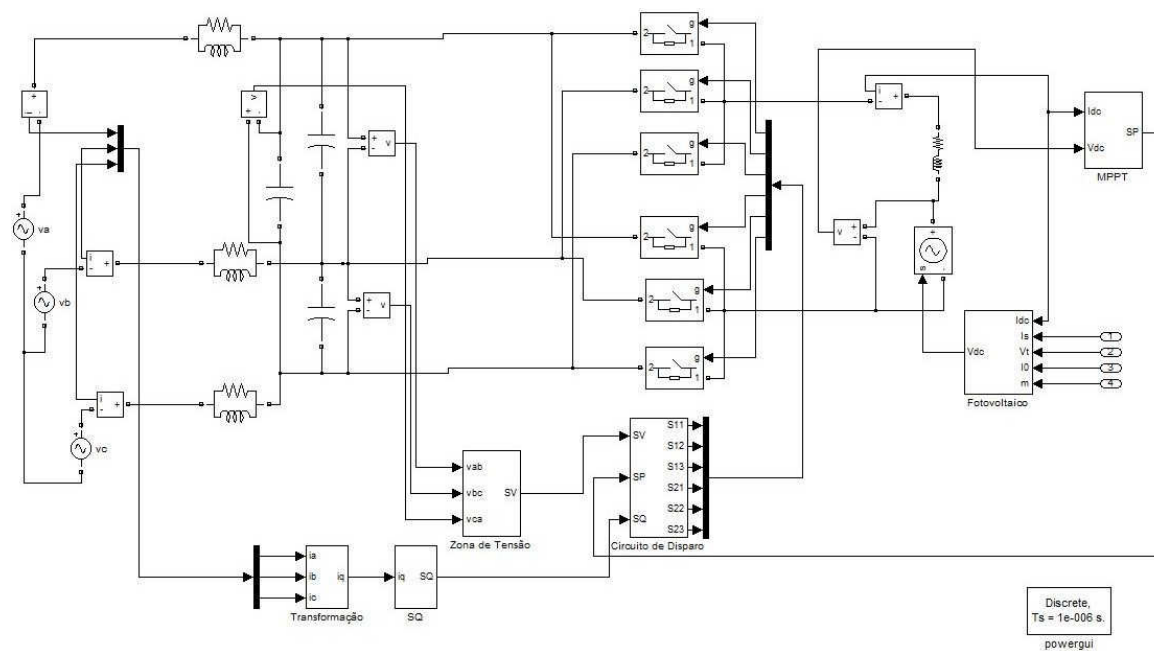
**Tabela A.3 – Saída do bloco Lookup Table (2-D)1.**

		Lookup Table (2-D)								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
SV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	4	6	7	7	7	5	3	2
	2	5	1	4	7	7	7	3	2	6
	3	5	1	4	7	7	7	3	2	6
	4	3	5	1	7	7	7	2	6	4
	5	3	5	1	7	7	7	2	6	4
	6	2	3	5	7	7	7	6	4	1
	7	2	3	5	7	7	7	6	4	1
	8	6	2	3	7	7	7	4	1	5
	9	6	2	3	7	7	7	4	1	5
	10	4	6	2	7	7	7	1	5	3
	11	4	6	2	7	7	7	1	5	3
	12	1	4	6	7	7	7	5	3	2

Por fim, as 6 tabelas finais têm como objectivo verificar se, para o vector escolhido, os respectivos semicondutores entram em condução ou ao corte.

## A.6 – Bloco geral

Este é o bloco que contém o conjunto dos outros blocos já referenciados bem como o conversor matricial, filtros e rede eléctrica.



**Figura A.8 – Bloco geral**

Da esquerda para a direita é possível ver a rede eléctrica, constituída pelas fontes  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  definidas em (4.10), os filtros RLC do lado AC, o conversor matricial, na forma de 6 interruptores, o filtro LC do lado DC, e o sistema fotovoltaico. É ainda possível ver os vários sistemas de controlo já descritos.

O filtro da rede AC caracteriza-se pelos seguintes valores:

$$R=10\Omega;$$

$$C=10\mu\text{F};$$

$$L=5\text{mH}.$$

O filtro do lado DC caracteriza-se pelos seguintes valores:

$$R=0,05\Omega;$$

$$L=10\text{mH}.$$