



Universidade do Minho

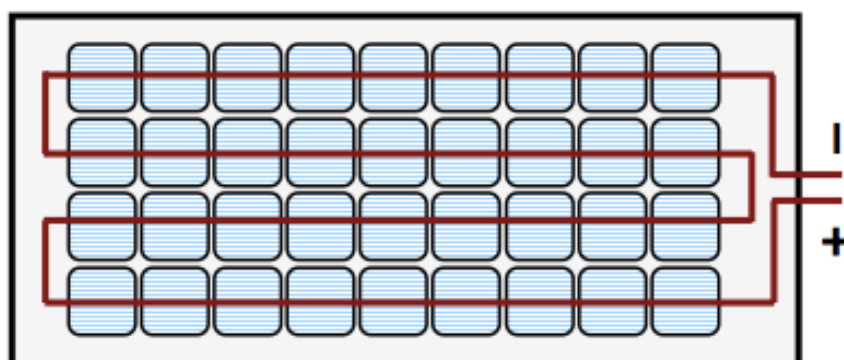
Escola de Ciências
Departamento de Física
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães

ELECTROMAGNETISMO B

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

CARACTERÍSTICAS E ASSOCIAÇÕES

2º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil
1º Semestre
(2010)



Joaquim Carneiro

Índice

1.1. Módulos fotovoltaicos: Características e associações.....	3
1.1.2. Características dos módulos fotovoltaicos.....	5
1.1.3. Associações de módulos fotovoltaicos.....	8
1.1.3.1. <i>Ligação em série de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>8</i>
1.1.3.2. <i>Ligação em paralelo de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>11</i>
1.1.3.3. <i>Ligação mista de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>12</i>
1.1.4. Diodos de desvio e diodos de fileira	14
1.1.5. Efeitos de sombreamento nos módulos FV	15
1.1.6. Efeitos da deposição de neve nos módulos FV	17
Referencias	18

1.1. Módulos fotovoltaicos: Características e associações

A potência máxima que é alcançada através da utilização de uma única célula fotovoltaica não excede, regra geral, a potência de $3W$, o que é manifestamente insuficiente para a maioria das aplicações reais. Por este motivo, as células fotovoltaicas são normalmente agrupadas (ligadas em série) de forma a formar *módulos* fotovoltaicos, conforme esquematizado na figura 5.1.

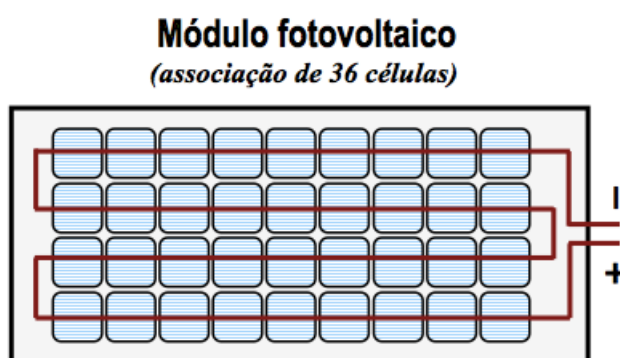


Fig. 1.1 – Representação esquemática referente à associação de várias células fotovoltaicas (de silício cristalino) visando o aumento da potência total

Por outro lado, na ligação em série, os contactos frontais de cada célula são soldados aos contactos posteriores da célula seguinte, de forma a ligar o pólo negativo (parte frontal) da célula com o pólo positivo (parte posterior) da célula seguinte, conforme esquematizado na figura 2.

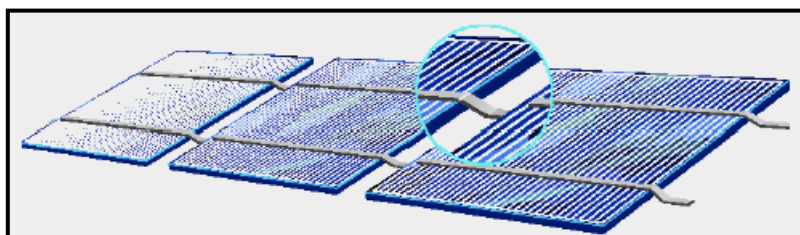


Fig. 1.2 – Representação esquemática referente ao encadeamento em série de várias células fotovoltaicas [1]

Na construção dos módulos, é necessário dotá-los de características que lhes permitam resistir às condições ambientais adversas a que vão estar submetidos. Neste sentido, a fim de garantir a protecção contra a acção de esforços mecânicos, dos agentes atmosféricos e da humidade, as células são normalmente embebidas numa película de *etileno acetato de vinilo* (EVA). Trata-se de um material flexível, translúcido e não reflector da radiação solar, que tem ainda a particularidade de assegurar o isolamento eléctrico entre as células.

Para a estabilização mecânica da estrutura, o acabamento é executado com aros de alumínio (leves e resistentes) e uma placa de vidro. A figura 1.3 representa esquematicamente os componentes e materiais normalmente utilizados na construção de módulos fotovoltaicos.

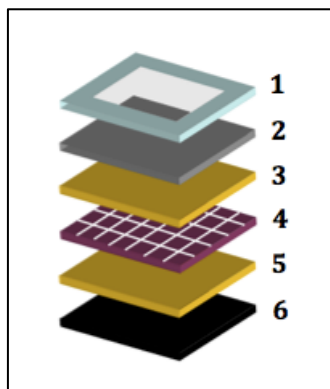


Fig. 1.3 – Representação esquemática da estrutura de um módulo fotovoltaico de silício cristalino

A tabela 1.1 descreve sumariamente as funções referentes a cada componente que integra um módulo fotovoltaico.

Tabela 1.1 – Descrição das diferentes funções dos componentes que constituem um módulo fotovoltaico

Componentes		Descrição
1	Caixilho	Alumínio anodizado. Confere rigidez mecânica
2	Vidro	Vidro temperado. Permite a entrada de luz solar e protege as células contra impactos mecânicos (granizo, contacto manual, etc.)
3 e 5	Material de encapsulamento	Película translúcida e não reflectora da radiação solar. O EVA garante também o isolamento eléctrico entre as células
4	Células fotovoltaicas (c.Si)	Representam o elemento que converte a luz solar em corrente eléctrica
6	Isolante eléctrico	Protege a parte posterior do módulo e evita também a entrada de água e gases

Por outro lado, o agrupamento de vários módulos fotovoltaicos é denominado por *painel fotovoltaico* (do Inglês, *array*). A figura 1.4 mostra esquematicamente a sequência do agrupamento conducente à obtenção de um painel fotovoltaico.

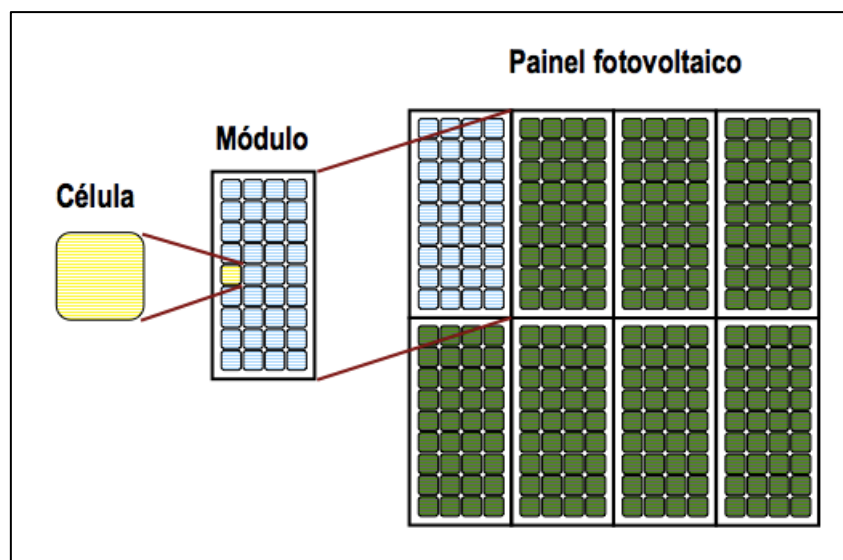


Fig. 1.4 – Processo hierarquizado de agrupamento: célula → módulo → painel fotovoltaico

O agrupamento de módulos fotovoltaicos do mesmo tipo pode ser efectuado através do estabelecimento de ligações em série, paralelo ou mista, obtendo-se assim diferentes valores de tensão ou corrente. Este procedimento, permite efectuar o controlo da energia produzida pelo painel.

1.1.2. Características dos módulos fotovoltaicos

As características (parâmetros eléctricos, térmicos ou mecânicos) dos módulos fotovoltaicos são medidas (nas condições de referência, *STC*) pelos fabricantes e disponibilizadas na forma de fichas técnicas específicas. No entanto, em contexto de utilização real, as condições de referência muito raramente ocorrem. Na verdade, mesmo que um módulo fotovoltaico opere num cenário que eventualmente se caracterize por uma temperatura do ar igual a 25°C , a temperatura do módulo será superior. Por este motivo, muitas vezes é especificada a *temperatura nominal de funcionamento* (do Inglês, *nominal operating cell temperature*, *NOCT*) do módulo fotovoltaico. A *temperatura nominal de funcionamento* é definida como sendo a temperatura atingida pelas células de um módulo quando sujeitas às seguintes condições:

- ❑ Intensidade da radiação solar incidente na superfície = 800 W/m^2 ;
- ❑ Temperatura do ar = 20°C ;
- ❑ Velocidade do vento = 1 m/s .

A temperatura das células (que integram um módulo) pode ser calculada através da seguinte equação [2 – 3]:

$$T = T_A + \frac{(NOCT - 20)}{800} \cdot G \quad (1.1)$$

onde T (em °C) é a temperatura da célula, T_A (em °C) é a temperatura do ar e G (em W/m^2) corresponde à intensidade da radiação incidente. Na eventualidade de a velocidade do vento ser superior a $1m/s$ (conduz a maiores perdas por convecção), a temperatura do módulo será inferior ao valor calculado pela equação 1.1.

Exercício 1.1

A temperatura média do ar durante o mês de Janeiro para a cidade de Lisboa é de $6,7^\circ C$, enquanto a intensidade média da radiação incidente é de $77W/m^2$. Nestas condições, pretende-se calcular a temperatura média atingida por um módulo de silício policristalino, sabendo que a temperatura nominal de funcionamento é de $45^\circ C$.

Resolução

A utilização da equação 1.1 permite calcular a temperatura média atingida pelo módulo em Lisboa, durante o mês de Janeiro:

$$T = T_A + \frac{(NOCT - 20)}{800} \cdot G \Leftrightarrow T = 6,7 + \frac{(45 - 20)}{800} \cdot 77 = 9,1^\circ C$$

Uma das características mais importantes dos módulos fotovoltaicos refere-se ao seu comportamento face à temperatura a que operam. A tabela 1.2 apresenta, para diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, os coeficientes térmicos típicos referentes a dois parâmetros eléctricos importantes: a *tensão de circuito aberto* e a *corrente de curto-circuito*.

Tabela 1.2 – Coeficientes térmicos referentes a diferentes tipos de módulos fotovoltaicos

Coeficiente térmico	Módulos (c-Si)	Módulos (CIGS)	Módulos (cdTe)
Para a Tensão, V_{ca}	- 0,36 %/°C	-0,26 %/°C	-0,22 %/°C
Para a corrente, I_{CC}	0,043%/°C	0,045 %/°C	0,02 %/°C

Os fabricantes fornecem também um conjunto de características muito importantes para o estudo dos sistemas de produção fotovoltaicos. Em seguida, apresentam-se algumas das características que são consideradas as mais relevantes.

A tabela 1.3 apresenta a ficha técnica típica referente a diferentes módulos fotovoltaicos (de silício monocristalino), onde se indicam as suas características eléctricas mais importantes para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.

Tabela 1.3 – Ficha técnica correspondente aos parâmetros eléctricos de diferentes módulos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos m-Si (modelos que existem no mercado)				
Parâmetros eléctricos	Símbolos	Unidade	Modelo 1 / Modelo 2	Modelo 3 / Modelo 4
Potência máxima	P_{max}	W	110	110
Potência mínima	P_{min}	W	100	90
Corrente máxima	I_{max}	A	6,3/ 3,15	5,9/ 2,95
Tensão máxima	V_{max}	V	17,3/ 35,0	17,0/ 34,0
Corrente de curto-circuito	I_{CC}	A	6,9/ 3,35	6,5/ 3,25
Tensão de circuito aberto	V_{ca}	V	21,7/ 43,5	21,0/ 42,0
Tensão máx. admissível	V_{adm}	V	1000	1000
Eficiência	η	$\%$	12,7	11,5

A tabela 1.4 apresenta a ficha técnica relativa aos parâmetros térmicos:

Tabela 1.4 – Características térmicas dos módulos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos m-Si (modelos que existem no mercado)		
Parâmetros térmicos	Unidade	Modelo 1 /2 Modelo 3/4
NOCT (Temp. nominal de funcionamento)	$^{\circ}C$	45 ± 2
Coefficiente térmico para I_{CC}	$^{\circ}C / ^{\circ}K$	+0,04
Coefficiente térmico para V_{ca}	$^{\circ}C / ^{\circ}K$	-0,34
Temperatura máxima admissível	$^{\circ}C$	-40 a +85
Módulo exposto à radiação solar	$^{\circ}C$	-40 a +50

Os fabricantes apresentam ainda outros dados referentes a algumas características físicas e mecânicas. Na tabela 1.5 são apresentadas as características mais relevantes.

Tabela 1.5 – Outros parâmetros característicos dos módulos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos (modelos que existem no mercado)		
Outros parâmetros	Unidade	Indicadores
Pressão na superfície	N/m^2	2,4
Torção mecânica máxima		1,2
Humidade a 85°C	%	85% relativo
Impacto de granizo	m/s	$V = 23$
Pedras de granizo	mm	$\phi 25$
Dimensões: Comp. × Larg. × Prof.	mm	1316 × 660 × 40
Peso	kg	11,5
Garantia de resultados	Anos	25
Classe de protecção		II
Certificação		CEC 503; IEC 61215; UL 1703

Importa ainda referir que no âmbito do dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, pode ser importante dispor-se de informação expedita relativamente às áreas necessárias por cada tipo de módulo fotovoltaico. Empiricamente, e de modo aproximado, as áreas (referentes a diferentes tipos de módulos) que são requeridas para a instalação de sistemas com potência de $1kW$ são apresentadas na tabela 1.6.

Tabela 1.6 – Áreas requeridas para diferentes tipos de módulos fotovoltaicos

Tipos de células	Área necessária (m^2/kW)
Silício monocristalino	7 – 9 m^2
Silício policristalino	8 – 11 m^2
Disseleneto de cobre-índio-gálio-selénio (CIGS)	11 – 13 m^2
Telureto de Cádmio (CdTe)	14 – 18 m^2
Silício amorfo	16 – 20 m^2

1.1.3. Associações de módulos fotovoltaicos

1.1.3.1. Ligação em série de módulos fotovoltaicos

Conforme foi previamente referido, os módulos fotovoltaicos devem ser interligados a fim de se conseguir aumentar a potência máxima, P_{max} de um painel fotovoltaico.

Nesse sentido, existem duas possibilidades de se realizar a associação de módulos fotovoltaicos: a interligação de módulos em *série* ou em *paralelo*.

No estudo que se segue, o símbolo representado na figura 1.5 é normalmente utilizado para representar um módulo fotovoltaico.

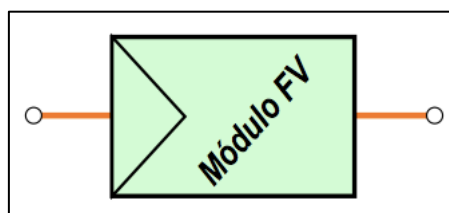


Fig. 1.5 – Representação esquemática do símbolo utilizado para um módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos ligados em série constituem aquilo que normalmente se designa por *fileiras*. É importante realçar que na associação de módulos fotovoltaicos devem ser utilizados módulos do mesmo tipo, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema. A figura 1.6 representa esquematicamente a associação em série de n módulos fotovoltaicos.

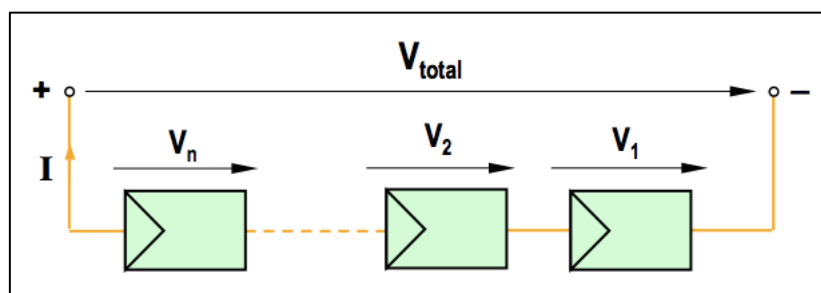


Fig. 1.6 – Representação esquemática da associação em série de n módulos fotovoltaicos

De acordo com a figura 5.6, podem-se escrever as seguintes relações:

$$V_1 = V_2 = \dots V_n = V \Rightarrow V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n \cdot V \quad (1.2)$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I \quad (1.3)$$

Com efeito, a *associação em série* de módulos fotovoltaicos permite obter **tensões mais elevadas, mantendo a corrente estipulada do módulo**.

A título exemplificativo, a tabela 1.7 apresenta algumas das características de um módulo *Shell SM 100-12*.

Tabela 1.7 – Ficha técnica de algumas características do módulo *Shell SM 100-12*

Tipo de módulo: silício monocristalino	Símbolos	Unidade	Indicadores
Potência máxima	P_{max}	W	100,3
Corrente máxima	I_{max}	A	5,9
Tensão máxima	V_{max}	V	17,0
Corrente de curto-circuito	I_{CC}	A	6,5
Tensão de circuito aberto	V_{ca}	V	21,0
Temperatura nominal de funcionamento	$NOCT$	$^{\circ}C$	45
Coefficiente térmico para a corrente I_{CC}	ΔI	$A/^{\circ}K$	$+2,8 \times 10^{-3}$
Coefficiente térmico para a tensão V_{ca}	ΔV	$V/^{\circ}K$	$-7,6 \times 10^{-2}$
Número de células em série	N_{CS}		36
Comprimento	C	mm	1316
Largura	L	mm	660

A figura 1.7 corresponde à representação gráfica da curva característica de *corrente – tensão* (de acordo com a equação 1.5) referente à associação em série de por exemplo, três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

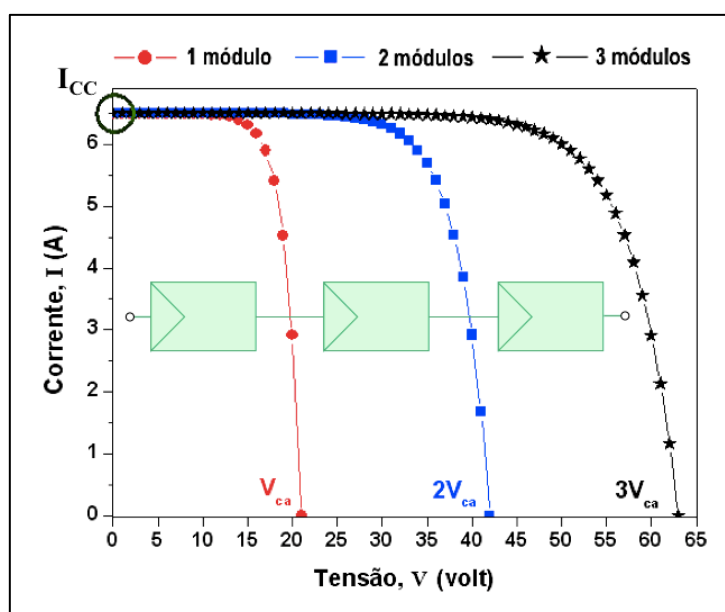


Fig. 1.7 – Representação das curvas *IV* relativas à associação em série de três módulos fotovoltaicos

Nesta condição, a corrente de *curto-circuito* da associação de três módulos ligados em série mantém-se inalterada. No entanto, a tensão de *circuito aberto* é três vezes superior ($V_{ca} = 63V$).

1.1.3.2. Ligação em paralelo de módulos fotovoltaicos

A ligação em paralelo entre módulos individuais (utilizada tipicamente nos *sistemas autónomos*) é efectuada quando se pretende obter correntes mais elevadas e manter o nível de tensão estipulada do módulo. A figura 1.8 representa esquematicamente a associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos.

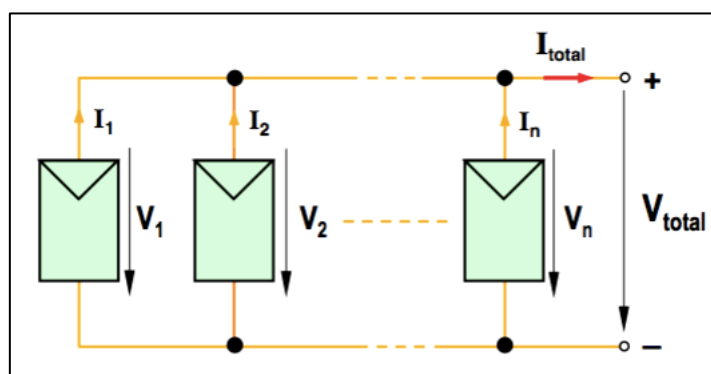


Fig. 1.8 – Representação esquemática da associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos

Nesta situação, obtêm-se intensidades de corrente mais elevadas, mantendo-se a tensão estipulada do módulo. Neste caso, é possível escreverem-se as seguintes relações:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \Rightarrow I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n \cdot I \quad (1.4)$$

$$V_{total} = V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (1.5)$$

A figura 1.9 corresponde à representação gráfica da curva característica de *corrente – tensão* (de acordo com a equação 1.5) referente à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

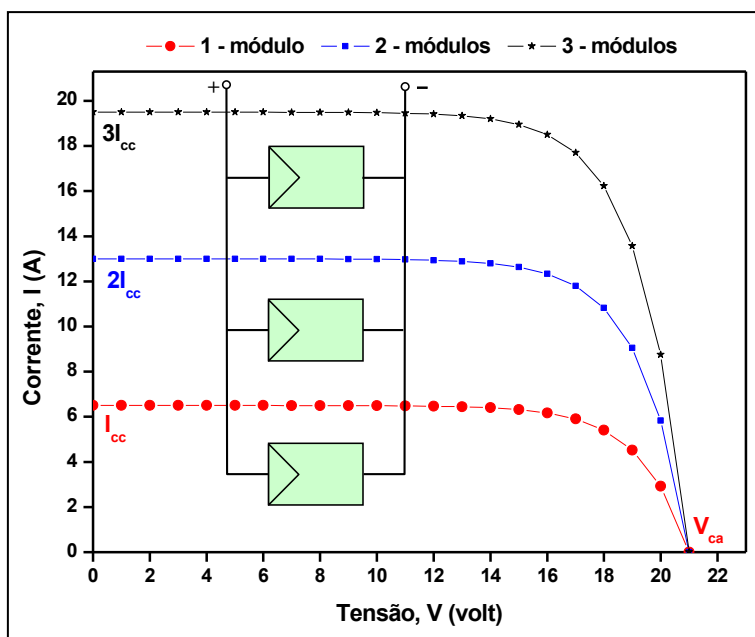


Fig. 1.9 – Representação das curvas *IV* referentes à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos

Nesta situação, a tensão de circuito aberto da associação de três módulos ligados em paralelo mantém-se inalterada. Contudo, a corrente de *curto-circuito* é três vezes superior ($I_{CC} = 19,5A$).

1.1.3.3. Ligação mista de módulos fotovoltaicos

Nos sistemas fotovoltaicos com ligação à rede, é muito comum efectuar-se a associação de várias *fileiras* de módulos ligadas em paralelo. A figura 1.10 representa esquematicamente a associação *mista* de $n \times m$ módulos fotovoltaicos.

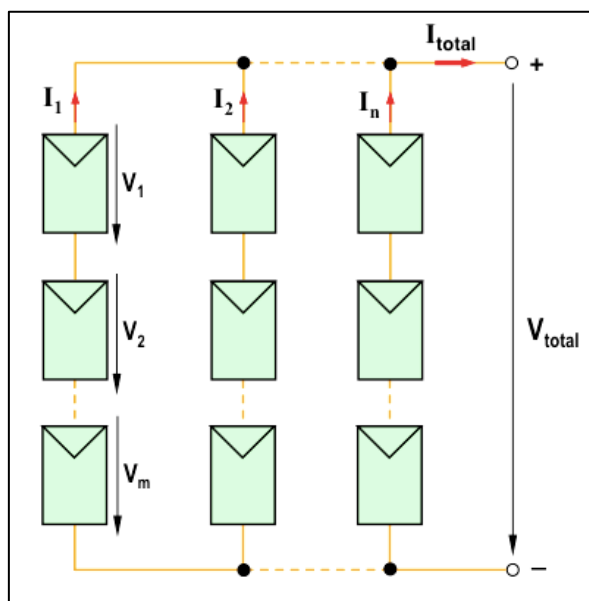


Fig. 1.10 – Representação esquemática da associação mista de n módulos fotovoltaicos

onde n representa o número de fileiras de módulos associados em paralelo e m representa o número de módulos associados em série.

Na associação mista de módulos fotovoltaicos, obtêm-se as características das associações em série e em paralelo. No entanto, conseguem-se obter valores mais elevados de corrente e de tensão. Com efeito, no pressuposto de que o sistema é constituído por módulos do mesmo tipo, então a corrente I que atravessa cada fileira é igual. Neste contexto, a análise da figura 1.8 permite estabelecer a seguinte relação:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \tag{1.6}$$

Por isso, a corrente total é calculada da seguinte maneira:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \Rightarrow I_{total} = n \cdot I \tag{1.7}$$

Por outro lado, a queda de tensão V que ocorre em cada módulo que integra uma determinada fileira também é igual. Deste modo pode-se escrever a relação seguinte:

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_m \tag{1.8}$$

Deste modo, a tensão total é obtida da seguinte forma:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \Rightarrow V_{total} = m \cdot V$$

A figura 1.11 corresponde à representação gráfica da curva característica de corrente – tensão referente à associação mista de três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

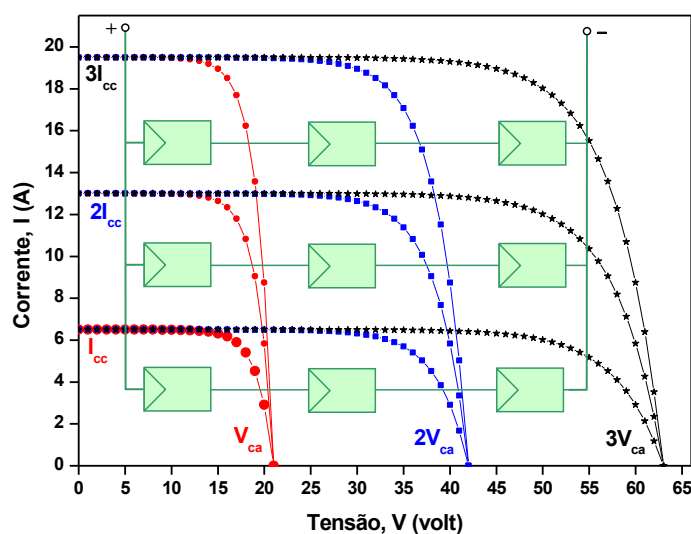


Fig. 1.11 – Representação das curvas *IV* relativas à associação mista de três módulos fotovoltaicos

1.1.4. Diodos de desvio e diodos de fileira

Os diodos de desvio (*by-pass*) são normalmente utilizados para evitar eventuais avarias que possam ocorrer em módulos fotovoltaicos associados em série. Neste sentido, os diodos de *by-pass* são ligados em paralelo (com cada módulo que integra uma determinada fileira) com o intuito de efectuarem o desvio da corrente produzida pelos outros módulos. Neste sentido, apenas o módulo defeituoso é colocado fora de serviço. Por outro lado, nas associações em paralelo, são por vezes utilizados diodos de fileira. Os diodos de fileira, têm a função de evitarem curto-circuitos e correntes inversas entre fileiras, em situações onde possam surgir avarias ou o aparecimento de tensões diferentes nas fileiras. A figura 1.12 representa de modo esquemático a utilização destes diodos.

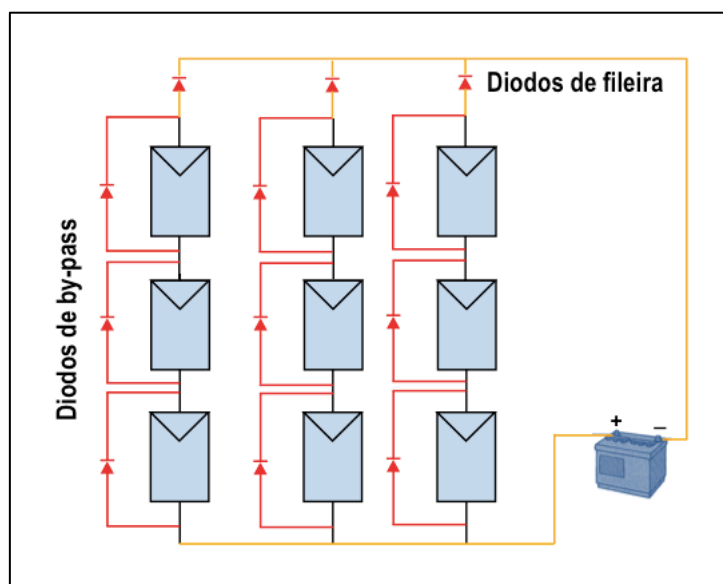


Fig. 1.12 – Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com diodos de *by-pass* e de fileira

De acordo com a norma CEI 60364-7-712, secção 712.512.1.1, é indicado que a tensão inversa dos diodos de fileira deve corresponder ao dobro da tensão de circuito aberto em condições *STS* ($V_{D,inv} \geq 2 \times V_{ca}$), na fileira. Os diodos mais utilizados são tipo Shotky.

No entanto, se forem utilizados módulos fotovoltaicos do mesmo tipo, é habitual não se utilizarem diodos de fileira. Nesta situação, é comum a colocação de fusíveis de protecção nos dois lados da fileira de modo a garantir a protecção contra sobreintensidades.

1.1.5. Efeitos de sombreamento nos módulos FV

Os fenómenos de sombreamento que ocorram em módulos fotovoltaicos produzem consequências negativas no que concerne à sua eficiência e segurança. Na maioria das situações, as sombras são de natureza temporária, na medida em que resultam de fenómenos naturais que são bastante imprevisíveis. O sombreamento temporário típico, resulta por exemplo da presença de folhas, sujidade de proveniência diversa (os dejectos de pássaros, poeiras de zonas industriais, etc.), nuvens ou mesmo a neve que se possa depositar sobre os módulos fotovoltaicos.

Não obstante o facto de todos estes agentes funcionarem como fontes de ocorrência de sombras, o seu impacto, no que diz respeito à eficiência e às operações regulares de manutenção, é diferente. Por exemplo, a ocorrência de nuvens é aquela que assume um carácter verdadeiramente transitório.

Por outro lado, o sombreamento causado por depósitos de neve, poeiras ou folhas sobre os módulos fotovoltaicos, é sem dúvida de carácter mais permanente. Contudo, nestes casos, a remoção deste tipo de sujidade efectua-se quase naturalmente desde que os módulos fotovoltaicos sejam posicionados com um ângulo mínimo de inclinação (que é da ordem dos 12°). Na verdade, a existência de um ângulo mínimo de inclinação funciona como um sistema autolimpante, já que estes depósitos são facilmente removidos através da água da chuva.

O outro extremo, com um impacto mais forte e mais duradouro, decorre da ocorrência de sombras que sejam causadas pela presença de depósitos que advenham dos dejectos dos pássaros ou da poluição do ar. Com efeito, estes agentes são responsáveis por perdas entre 2 a 5% na energia que deveria ser produzida. Por esta razão, é necessário que se proceda a operações de limpeza de modo muito mais regular. Para o efeito, os módulos devem ser lavados com grandes quantidades de água (sem detergentes), utilizando-se para o efeito uma mangueira e esponjas muito suaves para evitar riscar a sua superfície.

Considere-se em primeiro lugar, as condições normais de funcionamento de um módulo fotovoltaico (constituído por exemplo por 36 células) apresentadas na figura 1.13. A corrente gerada nas células fotovoltaicas é utilizada para alimentar uma carga (resistência R) localizada num circuito externo.

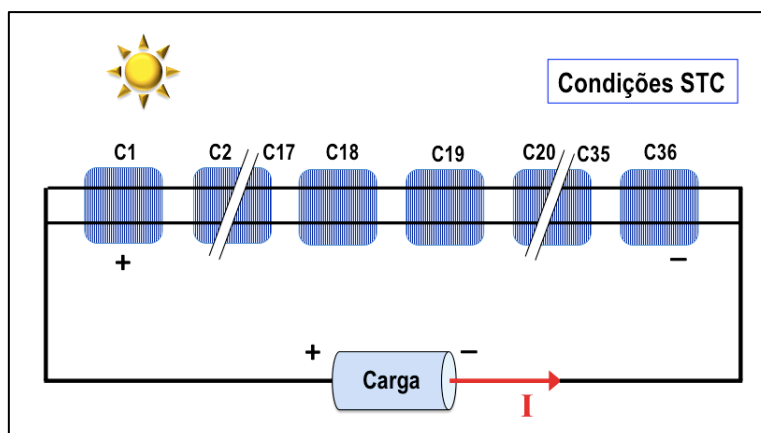


Fig. 1.13 – Representação esquemática de um módulo fotovoltaico (constituído por 36 células) capaz de gerar corrente eléctrica para alimentar uma carga externa

Na eventualidade de ocorrer sombreamento do módulo (ver figura 1.14), por exemplo através da queda de uma folha sobre a célula C36, esta célula passará a estar inversamente polarizada (a tensão inversa pode ter um valor elevado), actuando assim como uma “resistência eléctrica”. Nesta situação, ocorre conversão de energia eléctrica em calor que eleva a temperatura (pontos quentes) para valores que, em alguns casos, conduzem à destruição do módulo.

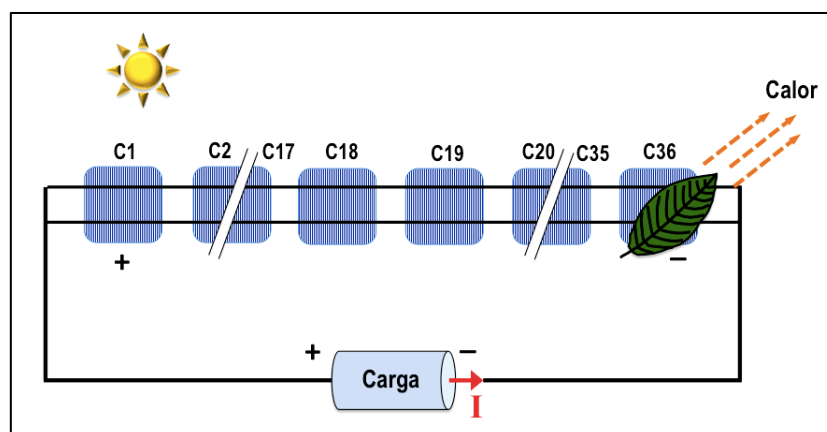


Fig. 1.14 – Representação esquemática do módulo fotovoltaico sombreado

Para prevenir a ocorrência de pontos quentes, a corrente deve ser desviada da célula sombreada através da utilização de diodos de *by-pass*. A inclusão destes diodos impede o aparecimento de tensões inversas elevadas nas células fotovoltaicas obscurecidas, permitindo assim que a fileira se mantenha em produção, embora diminuída. A figura 1.15 representa esquematicamente o módulo fotovoltaico contendo diodos de *by-pass*.

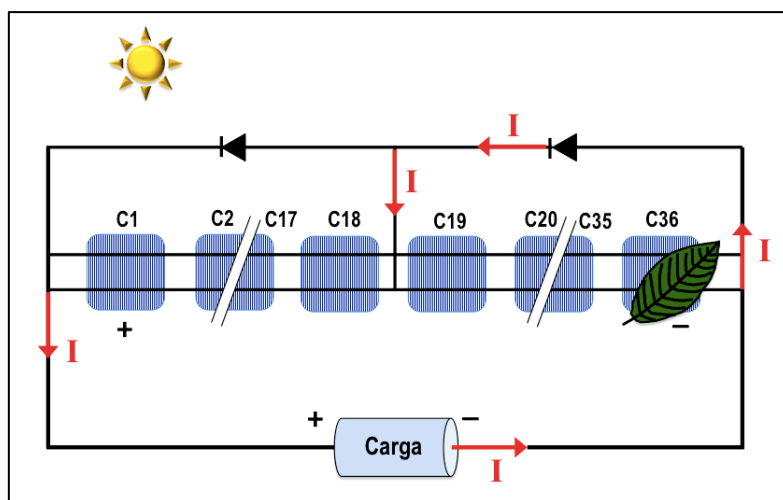


Fig. 1.15 – Representação esquemática do módulo fotovoltaico sombreado com diodos de by-pass

1.1.6. Efeitos da deposição de neve nos módulos FV

Um aspecto bastante importante a tomar em consideração, refere-se à eventualidade de ocorrer a deposição de neve sobre os módulos fotovoltaicos. A ocorrência deste fenómeno requer alguns cuidados no que concerne à colocação (disposição) dos módulos fotovoltaicos, visando minimizar os efeitos negativos na eficiência do sistema gerador, provenientes da acção de sombreamento.

A figura 1.16 representa duas maneiras possíveis de se proceder à colocação (por exemplo, sobre a cobertura de uma habitação) de módulos fotovoltaicos que eventualmente fiquem sombreados pela deposição de uma camada de neve.

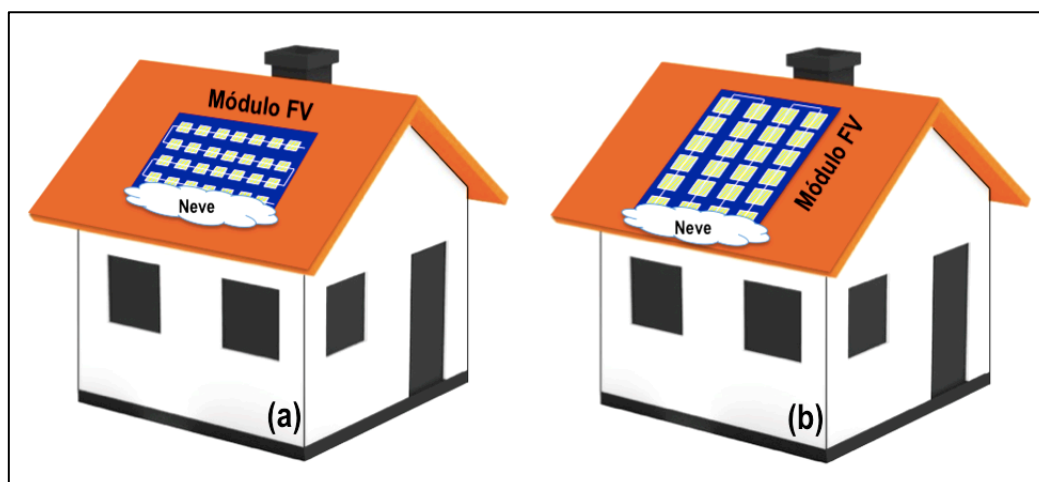


Fig. 1.16 – Representação esquemática referente à colocação de um módulo fotovoltaico sombreado pela deposição de uma camada de neve; (a) módulo na posição horizontal; (b) módulo na posição vertical

Face ao tipo das ligações entre as células que integram o módulo, verifica-se que a opção pela solução (a) – módulo em *posição horizontal*, corresponde àquela que apresenta menores efeitos negativos, na medida em que apenas é afectada uma fileira de células ligadas em série, mantendo-se no entanto a produção nas restantes. Por outro lado, se a opção incidisse na selecção da solução (b) – módulo colocado na *posição vertical*, todas as fileiras ficariam sombreadas pela neve, e por conseguinte conduziria a repercussões muito mais negativas no que respeita à eficiência do módulo fotovoltaico.

Referencias

- [1] T. P. Benedito, “*Práticas de energia solar fotovoltaica*”, Publindustria, ISBN: 9789728953423, 2010.
- [2] A. Luque and S. Hegedus, “*Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*”, John Wiley and Sons, ISBN 0471491969, 2003.
- [3] <http://pvcadrom.pveducation.org/MODULE/NOCT.htm>