

2012

Estudio de la afectación de las sombras en
un panel fotovoltaico



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Autor: Jordi Pallejà Cabré
Director: Jordi Garcia Amorós
Universitat Rovira i Virgili
Setiembre 2012



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

0. Índice general

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

04/09/2012

0. ÍNDICE GENERAL	1
0.1. ÍNDICE DE TABLAS	4
0.2. ÍNDICE DE FIGURAS	4
0.3. ÍNDICE DE ECUACIONES	7
1. NORMAS Y REFERENCIAS	8
1.1. NORMATIVA	10
1.2. REFERENCIAS.....	10
1.2.1. <i>Bibliografía</i>	10
1.2.2. <i>Páginas web</i>	11
1.2.3. <i>Programas utilizados</i>	11
2. MEMORIA	12
2.1. ANTECEDENTES:.....	14
2.2. ENERGÍA SOLAR:	14
2.2.1. <i>Energía solar directa:</i>	14
2.2.2. <i>Energía solar térmica:</i>	14
2.2.3. <i>Energía Solar Fotovoltaica:</i>	14
2.3. MARCO NORMATIVO	15
2.4. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO:.....	17
2.4.1. <i>Generalidades:</i>	17
2.5. LA CÉLULA SOLAR:	20
2.6. EL PANEL FOTOVOLTAICO:.....	21
2.6.1. <i>Composición y geometría:</i>	21
2.7. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:.....	22
2.7.1. <i>Potencia Máxima de Salida</i>	22
2.7.2. <i>Curvas I-V</i>	22
2.7.3. <i>Intensidad</i>	24
2.7.4. <i>Efecto de la temperatura</i>	24
2.7.5. <i>Máxima potencia de salida</i>	25
2.7.6. <i>Temperatura de trabajo del panel:</i>	26
2.7.7. <i>Evaluación de la potencia de salida:</i>	26
2.8. ORIENTACIÓN INCLINACIÓN Y SOMBRAS.....	28
2.8.1. <i>Generalidades:</i>	28
2.8.2. <i>La influencia de la orientación e inclinación</i>	29
3. ANEXO 1: ESTUDIO SOMBRAS	32
3.1. COMPORTAMIENTO DE LAS CÉLULAS CON SOMBRAS.....	34
3.1.1. <i>Descripción general</i>	34
3.1.2. <i>Descripción del estudio</i>	37
3.1.3. <i>Estudio sobre el caso</i>	38
3.2. COMPORTAMIENTO DE LOS MÓDULOS CON SOMBRAS.....	39
3.2.1. <i>Descripción general</i>	39
3.2.2. <i>Descripción del estudio</i>	39
3.2.2.1. <i>Módulos Fotovoltaicos</i>	39
3.2.2.2. <i>Analizador de curvas</i>	41
3.2.3. <i>Curvas I-V de módulos fotovoltaicos sin sombreados</i>	42
3.2.4. <i>Curva I-V de los módulos 1 y 2</i>	43
3.2.5. <i>Curva I-V de los módulos 1, 2 y 3</i>	44
3.2.6. <i>Curva I-V de los módulos 1, 2, 3 y 4</i>	45
3.2.7. <i>Curva I-V de los módulos 1, 2, 3, 4 y 5</i>	46
3.2.8. <i>Curva I-V de los módulos 1, 2, 3, 4, 5 y 6</i>	46
3.2.9. <i>Curvas I-V de módulos fotovoltaicos con diversas sombras</i>	48

3.2.9.1.	Caso 1: Tres módulos con la primera hilera de células con sombra	48
3.2.9.2.	Caso 2: Tres módulos con sombra en la cuarta hilera de células	50
3.2.9.3.	Caso 3: Tres módulos con la primera columna del primer módulo con sombra	51
3.2.9.4.	Caso 4: Tres módulos con sombra en una hilera del primer módulo	52
3.2.9.5.	Caso 5: Tres módulos con sombra horizontal en dos módulos	54
3.2.9.6.	Caso 6: Tres módulos con sombras verticales de diferente longitud en dos módulos	55
3.2.9.7.	Caso 7: Tres módulos con sombra oblicua en el primer módulo	56
3.2.9.8.	Caso 8: Tres módulos con sombra oblicua en dos módulos	58
3.2.9.9.	Caso 9: Tres módulos con sombra en una célula del primer módulo	59
3.2.9.10.	Caso 10: Tres módulos con sombra en una célula del primer y tercer módulo	60
3.2.9.11.	Caso 11: Un módulo con la sombra de una persona	62
3.2.10.	Conclusiones	63
4.	ANEXO2: CONFIGURACIÓN DE LOS DIODOS DE BYPASS	65
4.1.	INFLUENCIA DE LAS SOMBRAS SEGÚN LA CONFIGURACIÓN DE LOS DIODOS DE BYPASS	67
4.1.1.	Resumen	67
4.1.2.	Introducción	67
4.1.3.	Desarrollo	68
4.1.3.1.	Comportamiento de una célula fotovoltaica	68
4.1.3.2.	Comportamiento de un conjunto de células fotovoltaicas	69
4.1.3.3.	Comportamiento de un módulo fotovoltaico	70
4.1.3.4.	Diodos de bypass superpuestos	70
4.1.3.5.	Diodos de bypass no-superpuestos	73
4.1.4.	Conclusiones	74
5.	ANEXO 3: SIMULACIONES CURVA I-V	75
5.1.	OBJETIVO	77
5.2.	PLANTEAMIENTO	77
5.2.1.	Ecuaciones utilizadas	78
5.3.	PROGRAMACIÓN	78
5.3.1.	Consideraciones previas	78
5.3.2.	Definición de las variables	78
5.3.3.	Cálculos para una célula iluminada	79
5.3.3.1.	Curva I-V de la célula	79
5.3.4.	Cálculos para un panel iluminado	79
5.3.4.1.	Curva I-V del módulo	80
5.3.5.	Cálculos para una célula sombreada	81
5.3.5.1.	Curva I-V de una célula sombreada	82
5.3.6.	Conexión en serie de una célula iluminada con una sombreada	82
5.3.6.1.	Curva I-V de dos células FV iluminada + sombreada	83
5.3.7.	Conexión en serie de una célula sombreada con una iluminada	83
5.3.7.1.	Curva I-V de dos células FV sombreada + iluminada	84
5.4.	COMPARACIÓN ENTRE UN ENSAYO REAL Y LA SIMULACIÓN	84
5.4.1.	Análisis del ensayo real	84
5.4.2.	Módulos utilizados	84
5.4.3.	Curva I-V del ensayo real	85
5.4.4.	Simulación	86
5.5.	CONCLUSIONES	90
6.	PLANOS	91
6.1.	PLANO DE DETALLE PANEL BP 7185 S	93
6.2.	PLANO DE CONEXIÓN ENTRE MÓDULOS	94
7.	ANEXO 4: CÁLCULOS MATEMÁTICOS CURVA I-V	95
7.1.	CÁLCULO MATEMÁTICO DE LA CURVA I-V EN UNA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA	97

7.2.	CÁLCULO MATEMÁTICO DE LA CURVA I-V EN UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO.....	100
7.3.	OBTENCIÓN DE LA CURVA I-V	100
7.3.1.	<i>Modelo de Green</i>	100

0.1. Índice de tablas

TABLA (2.1)	LÍMITES DE PÉRDIDAS POR ORIENTACIÓN INCLINACIÓN Y SOMBRAS	28
TABLA (3.1)	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS MÓDULO FOTOVOLTAICO BP-7185S....	34
TABLA (3.2)	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS MÓDULO FOTOVOLTAICO BP-7185S.....	34
TABLA (3.3)	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS MÓDULOS CONERGY 170 MA.....	40
TABLA (3.4)	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICA SEGÚN FOTO-FLASH	41
TABLA (3.5)	RESUMEN DE LOS VALORES OBTENIDOS EN LOS CASOS ESTUDIADOS	63
TABLA (5.1).	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS MÓDULO BP 7185S.....	77
TABLA (5.2)	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS MÓDULOS CONERGY 170 MA.....	85

0.2. Índice de figuras

FIGURA (2.1).	EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA INSTALADA EN ESPAÑA PROVENIENTE DE LAS FOTOVOLTAICAS	16
FIGURA (2.2)	PUEDA VERSE UN DIAGRAMA DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO	17
FIGURA (2.3)	ESTRUCTURA CRISTALINA DEL SILICIO, COMBINACIÓN CON ÁTOMOS DE FOSFORO,..... COMBINACIÓN CON ÁTOMOS DE BORO	18
FIGURA (2.4)	ESTRUCTURA P-N DEL DIODO	18
FIGURA (2.5).	REPRESENTACIÓN DEL POTENCIAL ELÉCTRICO	19
FIGURA(2.6).	FUNCIONAMIENTO	
FIGURA(2.7).	CÉLULA	20
FIGURA(2.8).	CIRCUITO EQUIVALENTE MÓDULO FOTOVOLTAICO	20
FIGURA (2.9)	ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE.	21
FIGURA (2.10)	PANEL FOTOVOLTAICO MODELO BP-71585S. FABRICANTE BP	22
FIGURA (2.11)	CURVA I-V DEL PANEL BP 7185S.....	23
FIGURA (2.12)	.CURVAS I-V DEL PANEL KYOCERA KC130TM PARA DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN.	24
FIGURA (2.13)	EJEMPLO DE CURVA DE POTENCIA MÁXIMA DEL PANEL.	25
FIGURA (2.14)	ÁNGULOS DE INCLINACIÓN Y ACIMUT.....	28
FIGURA (2.15)	PÉRDIDAS POR ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN PARA LATITUD 41°.....	31
FIGURA (3.1)	CONEXIÓN CÉLULAS FOTOVOLTAICAS A ESTUDIAR.....	36
FIGURA (3.2)	CIRCUITO EQUIVALENTE CONJUNTO CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	36

FIGURA (3.3) CAMINO CORRIENTE ELÉCTRICA EN CIRCUITO EQUIVALENTE	37
FIGURA (3.4) SOMBRA CÉLULA FOTOVOLTAICA A ESTUDIAR	37
FIGURA (3.5) CIRCUITO EQUIVALENTE CONJUNTO CON SOMBRA EN UNA CÉLULA... 37	
FIGURA (3.6) CAMINO CORRIENTE ELÉCTRICA EN CIRCUITO EQUIVALENTE CON SOMBRA.....	38
FIGURA (3.7) CÉLULA FOTOVOLTAICA CON SOMBRA	38
FIGURA (3.8) DIODO DE BYPASS.....	40
FIGURA (3.9) MÓDULO SOLAR EMPLEADO	41
FIGURA (3.9) CURVA I-V MÓDULOS 1 Y 2.....	43
FIGURA (3.10) CURVA I-V MÓDULOS 1, 2 Y 3.....	44
FIGURA (3.11) CURVA I-V MÓDULOS 1, 2, 3 Y 4.....	45
FIGURA (3.12) CURVA I-V MÓDULOS 1, 2, 3, 4 Y 5.....	46
FIGURA (3.13) CURVA I-V MÓDULOS 1, 2, 3, 4, 5 Y 6.....	47
FIGURA (3.14) SOMBRA PRIMERA HILERA HORIZONTAL EN LOS TRES MÓDULOS.....	48
FIGURA (3.15) CURVA I-V DE LA SOMBRA EN LA PRIMERA HILERA HORIZONTAL EN LOS TRES MÓDULOS	49
FIGURA (3.16) SOMBRA CUARTA HILERA HORIZONTAL DE LOS TRES MÓDULOS	50
FIGURA (3.17) CURVA I-V DE LA SOMBRA HORIZONTAL EN LA CUARTA HILERA DE LOS TRES MÓDULOS	50
FIGURA (3.18) SOMBRA VERTICAL DE LA PRIMERA COLUMNA DEL PRIMERO MÓDULO	51
FIGURA (3.19) CURVA I-V DE LA SOMBRA VERTICAL DE LA PRIMERA COLUMNA DEL PRIMERO MÓDULO	52
FIGURA (3.20) SOMBRA HORIZONTAL DE UNA HILERA DEL PRIMERO MÓDULO.....	53
FIGURA (3.21) CURVA I-V DE LA SOMBRA HORIZONTAL DEL PRIMERO MÓDULO.....	53
FIGURA (3.22) SOMBRA HORIZONTAL DE DOS MÓDULOS	54
FIGURA (3.23) CURVA I-V DE LA SOMBRA HORIZONTAL DE DOS MÓDULOS.....	54
FIGURA (3.24) SOMBRAS VERTICALES EN DOS MÓDULOS	55
FIGURA (3.25) CURVA I-V DE DOS SOMBRAS VERTICALES EN MÓDULOS DIFERENTES	56
FIGURA (3.26) SOMBRA OBLICUA EN EL PRIMERO MÓDULO	57
FIGURA (3.27) CURVA I-V DE LA SOMBRA OBLICUA DEL PRIMERO MÓDULO	57
FIGURA (3.28) SOMBRA OBLICUA EN DOS MÓDULOS	58
FIGURA (3.29) CURVA I-V DE LA SOMBRA OBLICUA DE DOS MÓDULOS	58
FIGURA (3.30) SOMBRA EN UNA CÉLULA DEL PRIMERO MÓDULO	59
FIGURA (3.31) CURVA I-V DE LA SOMBRA DE UNA CÉLULA DEL PRIMERO MÓDULO	60
FIGURA (3.32) SOMBRA DE UNA CÉLULA DE DOS MÓDULOS	61
FIGURA (3.33) CURVA I-V DE LA SOMBRA DE DOS CÉLULAS DE MÓDULOS DIFERENTES.....	61

FIGURA (3.34) SOMBRA DE UNA PERSONA PROYECTADA EN EL MÓDULO	62
FIGURA (3.35) CURVA I-V DE LA SOMBRA DE UNA PERSONA	62
FIGURA (3.36) GRÁFICA COMPARATIVO DE CORRIENTES Y FACTOR DE POTENCIA... 63	
FIGURA (3.37) GRÁFICA COMPARATIVO DE TENSIONES Y POTENCIA..... 64	
FIGURA(4.1).DIODO DE BYPASS SUPERPUESTO(A), NO-SUPERPUESTO(B)..... 68	
FIGURA (4.2). CURVA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA POLARIZADA Y POLARIZADA EN SENTIDO INVERSO PARA UNA RADIACIÓN DE $0W/M^2$ 68	
FIGURA (4.3). CURVAS DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA PARA DIFERENTES RADIACIONES SOLARES..... 69	
FIGURA (4.4). CURVAS PARA UNA CÉLULA INDIVIDUAL CON SOL Y SOMBRA (A) Y CURVA DE 12 CÉLULAS EN SÉRIE, 11 SOLEADAS ($1000W/M^2$) Y UNA SOMBRADA ($100 W/M^2$) (B)..... 69	
FIGURA (4.5).MÓDULO FOTOVOLTAICO (A) LA DISTRIBUCIÓN FÍSICA (B) SISTEMA ELÉCTRICO CON..... 70	
DIODOS SOLAPADOS. 70	
FIGURA (4.6). CURVAS I-V Y P-V DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON LOS DIODOS DE BYPASS SUPERPUESTOS. 71	
FIGURA(4.7).CORRIENTE ELÉCTRICA EN LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON DIODOS DE DERIVACIÓN SUPERPUESTAS. 72	
FIGURA (4.8). CURVAS IV Y PV DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DIODOS DE BYPASS SUPERPUESTOS PROGRESIVAMENTE SOMBREADOS..... 72	
FIGURA (4.9). MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON DIODOS DE DERIVACIÓN NO-SUPERPUESTOS (A) DISTRIBUCIÓN FÍSICA..... 73	
(B) ESQUEMA ELÉCTRICO 73	
FIGURA (4.10).CORRIENTE ELÉCTRICA EN LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON DIODOS DE DERIVACIÓN NO-SUPERPUESTOS. 73	
FIGURA (4.11). CURVAS IV Y PV DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DIODOS DE BYPASS NO-SUPERPUESTOS PROGRESIVAMENTE SOMBREADOS. 74	
FIGURA (5.1) CURVA I-V DE UNA CÉLULA FV SIMULADA EN MATLAB 79	
FIGURA (5.2) CURVA I-V DE UN MÓDULO FV SIMULADA EN MATLAB 80	
FIGURA (5.3) CURVA I-V DE UNA CÉLULA FV SIMULADA EN MATLAB 81	
FIGURA (5.4) .CURVAS I-V DEL PANEL KYOCERA KC130TM PARA DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN 81	
FIGURA (5.5) CURVA I-V DE UNA CÉLULA FV SOMBREADA SIMULADA EN MATLAB ... 82	
FIGURA (5.6) ESQUEMA DE CONNEXIÓN DE LAS DOS CÉLULAS..... 82	
FIGURA (5.7) CURVA I-V DE DOS CÉLULAS FV ILUMINADA + SOMBREADA SIMULADA EN MATLAB 83	
FIGURA (5.8) ESQUEMA DE CONNEXIÓN DE LAS DOS CÉLULAS..... 83	
FIGURA (5.9) CURVA I-V DE DOS CÉLULAS FV SOMBREADA + ILUMINADA SIMULADA EN MATLAB 84	
FIGURA (5.10) CURVA I-V DE LA SOMBRA DE UNA CÉLULA DEL PRIMER MÓDULO..... 85	

FIGURA (5.11) CURVA I-V DE UNA CÉLULA ILUMINADA DEL PANEL CONERGY SC170MA.....	86
SIMULADA EN MATLAB	86
FIGURA (5.12) CURVA I-V DE UNA CÉLULA SOMBREADA DEL PANEL CONERGY SC170MA.....	87
SIMULADA EN MATLAB	87
FIGURA (5.13) CURVA I-V DEL PANEL FV CONERGY SC170MA SOLEADO SIMULADA EN MATLAB	88
FIGURA (5.14) CURVA I-V DEL PANEL FV CONERGY SC170MA SOMBREADO SIMULADA SIMULADA EN MATLAB	88
FIGURA (6.1). CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CÉLULA SOLAR Y EL EFECTO DE LA INCIDENCIA DE LA LUZ EN LA CARACTERÍSTICA I-V DE LA UNIÓN P-N	98
FIGURA (6.2). INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA SERIE, R_S , Y LA RESISTENCIA PARALELO R_P , EN LA CURVA I-V DE UNA CÉLULA SOLAR.....	99

0.3. Índice de Ecuaciones

ECUACIÓN (1.6): CORRIENTE FOTOGENERADA POR LA ILUMINACIÓN DE UNA CÉLULA	97
ECUACIÓN (2.6): FACTOR DE FORMA	97
ECUACIÓN (3.6): INCIDENCIA DE LA LUZ EN EL PRIMER CUADRANTE	98
ECUACIÓN (4.6): INCIDENCIA DE LA LUZ EN FUNCIÓN DE R_P Y R_S	99
ECUACIÓN (5.6): INCIDENCIA DE LA LUZ EN FUNCIÓN DE R_P Y R_S	100
ECUACIÓN (6.6): INCIDENCIA DE LA LUZ EN FUNCIÓN DE R_P , R_S Y EL NÚMERO DE CÉLULAS EN SERIE Y PARALELO	100
ECUACIÓN (7.6) LA EXPONENCIAL DE LA CURVA I-V	101
ECUACIÓN (8.6) INCIDENCIA DE LA LUZ EN CORTOCIRCUITO	101
ECUACIÓN (9.6) INCIDENCIA DE LA LUZ EN CIRCUITO ABIERTO 1.....	101
ECUACIÓN (10.6) INCIDENCIA DE LA LUZ EN CIRCUITO ABIERTO 2.....	101
ECUACIÓN (11.6) INCIDENCIA DE LA LUZ SEGÚN MODELO DE GREEN	101
ECUACIÓN (12.6) VOLTAJE MÁXIMO	101
ECUACIÓN (13.6) FACTOR DE FORMA MÁXIMO PARA UN DISPOSITIVO IDEAL	102
ECUACIONES (14.6), (15.6), (16.6) VALORES NORMALIZADOS DE VOLTAJE A CIRCUITO ABIERTO, RESISTENCIA SERIE Y RESISTENCIA PARALELO	102
ECUACIÓN (17.6) FACTOR DE FORMA ECUACIÓN (18.6) RESISTENCIA SERIE	102
ECUACIÓN (19.6) FACTOR DE FORMA OBTENIDO DE FORMA EMPÍRICA 1	102
ECUACIÓN (19.6) FACTOR DE FORMA OBTENIDO DE FORMA EMPÍRICA 2	102



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

1. Normas y referencias

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

04/09/2012

Índice normas y referencias

1. NORMAS Y REFERENCIAS	8
1.1. NORMATIVA.....	10
1.2. REFERENCIAS.....	10
1.2.1. <i>Bibliografía</i>	10
1.2.2. <i>Páginas web</i>	11
1.2.3. <i>Programas utilizados</i>	11

1.1. Normativa

RD661/2007:

Artículo 22. Plazo de mantenimiento de las tarifas y primas reguladas.

Una vez se alcance el 85 por ciento del objetivo de potencia para un grupo o subgrupo, establecido en los artículos 35 al 42 del presente real decreto, se establecerá, mediante resolución del Secretario General de Energía, el plazo máximo durante el cual aquellas instalaciones que sean inscritas en el Registro administrativo de instalaciones de producción en régimen especial con anterioridad a la fecha de finalización de dicho plazo tendrán derecho a la prima o, en su caso, tarifa regulada establecida en el presente real decreto para dicho grupo o subgrupo, que no podrá ser inferior a doce meses.

RD1/2012:

Artículo 1. Objeto.

Constituye el objeto de este real decreto-ley:

La supresión de los incentivos económicos para las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial y para aquellas de régimen ordinario de tecnologías asimilables a las incluidas en el citado régimen especial que se detallan en el artículo 2.1.

Artículo 2. Ámbito de aplicación.

1. El presente real decreto-ley será de aplicación a las siguientes instalaciones:

a) Aquellas instalaciones de régimen especial que a la fecha de entrada en vigor del presente real decreto-ley no hubieran resultado inscritas en el Registro de preasignación de retribución previsto en el artículo 4.1 del Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social.

1.2. Referencias

1.2.1. Bibliografía

Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. Por José M^a Fernández Salgado

Diagnóstico de instalaciones fotovoltaicas. Por Tomás Saz Guillén

Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass. Por E. Díaz-Dorado, A. Suárez-García, C. Carrillo, and J. Cidrás por el Department of Electrical Engineering, University of Vigo, ETSEI - Campus Universitario (Spain)

1.2.2. Páginas web

- Boletín Oficial del Estado
www.boe.es
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- Conergy
<http://www.conergy.es>
- BP
<http://www.bp.com>
- UDLL departamento de robótica
<http://robotica.udl.cat/>

1.2.3. Programas utilizados

- Microsoft Word: Herramienta para el procesamiento de textos.
- Autocad: Herramienta para el diseño gráfico.
- Matlab: Entorno de computación y desarrollo de aplicaciones



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

2. Memoria

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

04/09/2012

Índice Memoria

2. MEMORIA	12
2.1. ANTECEDENTES:	14
2.2. ENERGÍA SOLAR:	14
2.2.1. <i>Energía solar directa:</i>	14
2.2.2. <i>Energía solar térmica:</i>	14
2.2.3. <i>Energía Solar Fotovoltaica:</i>	14
2.3. MARCO NORMATIVO	15
2.4. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO:	17
2.4.1. <i>Generalidades:</i>	17
2.5. LA CÉLULA SOLAR:	20
2.6. EL PANEL FOTOVOLTAICO:	21
2.6.1. <i>Composición y geometría:</i>	21
2.7. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:	22
2.7.1. <i>Potencia Máxima de Salida</i>	22
2.7.2. <i>Curvas I-V</i>	22
2.7.3. <i>Intensidad</i>	24
2.7.4. <i>Efecto de la temperatura</i>	24
2.7.5. <i>Máxima potencia de salida</i>	25
2.7.6. <i>Temperatura de trabajo del panel:</i>	26
2.7.7. <i>Evaluación de la potencia de salida:</i>	26
2.8. ORIENTACIÓN INCLINACIÓN Y SOMBRAS.....	28
2.8.1. <i>Generalidades:</i>	28
2.8.2. <i>La influencia de la orientación e inclinación</i>	29

2.1. Antecedentes:

La disponibilidad de energía en el mundo se ha convertido en un problema crucial, dado que la gran mayoría de los países, tanto los en vías de desarrollo como los industrializados, de ven afectados por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus metas económicas y sociales.

A partir de los últimos años , se ha reconocido como inevitable que la oferta de energía debe sufrir una transición desde su actual dependencia de los hidrocarburos hacia aplicaciones energéticas más diversificadas, lo que implica el aprovechamiento de la variedad de fuentes de energía renovables que se disponen.

El sol es una fuente inagotable de recursos para el hombre. Provee una energía limpia, abundante y disponible en la mayor parte de la superficie terrestre y puede por lo tanto, liberarlo de los problemas ambientales generados por los combustibles convencionales, como el petróleo, y de otras alternativas energéticas, como las centrales nucleares. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos de las últimas décadas, el aprovechamiento de esta opción ha sido insignificante, comparándolo con el consumo global de energía en el mundo.

2.2. Energía Solar:

La energía solar, como recurso energético terrestre, esta constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. España es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio.

2.2.1. Energía solar directa:

Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

2.2.2. Energía solar térmica:

Se denomina térmica a la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por el medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

2.2.3. Energía Solar Fotovoltaica:

Se llama “fotovoltaica” a la energía solar aprovechada por medio de las celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin que tenga lugar un efecto térmico. En este caso nos centraremos en este tipo de energía solar.

2.3. Marco Normativo

Las instalaciones solares fotovoltaicas de conexión a la red son una tipología de instalación de generación de energía cuya retribución está regulada mediante la normativa de instalaciones e producción en régimen especial.

RD661/2007:

Artículo 22. Plazo de mantenimiento de las tarifas y primas reguladas.

1. Una vez se alcance el 85 por ciento del objetivo de potencia para un grupo o subgrupo, establecido en los artículos 35 al 42 del presente real decreto, se establecerá, mediante resolución del Secretario General de Energía, el plazo máximo durante el cual aquellas instalaciones que sean inscritas en el Registro administrativo de instalaciones de producción en régimen especial con anterioridad a la fecha de finalización de dicho plazo tendrán derecho a la prima o, en su caso, tarifa regulada establecida en el presente real decreto para dicho grupo o subgrupo, que no podrá ser inferior a doce meses.

RD1/2012:

Artículo 1. Objeto.

Constituye el objeto de este real decreto-ley:

- a) La supresión de los incentivos económicos para las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial y para aquellas de régimen ordinario de tecnologías asimilables a las incluidas en el citado régimen especial que se detallan en el artículo 2.1.

Artículo 2. Ámbito de aplicación.

1. El presente real decreto-ley será de aplicación a las siguientes instalaciones:

- a) Aquellas instalaciones de régimen especial que a la fecha de entrada en vigor del presente real decreto-ley no hubieran resultado inscritas en el Registro de reasignación de retribución previsto en el artículo 4.1 del Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social.

Visto el panorama legislativo queda claro que no se va a invertir en construir nuevas plantas y las que se han construido en los últimos años, apuntan a malas maneras en lo que afecta a planificación y construcción, por las prisas motivadas por el cambio de tarifa reglamentada en el RD 661/2007.

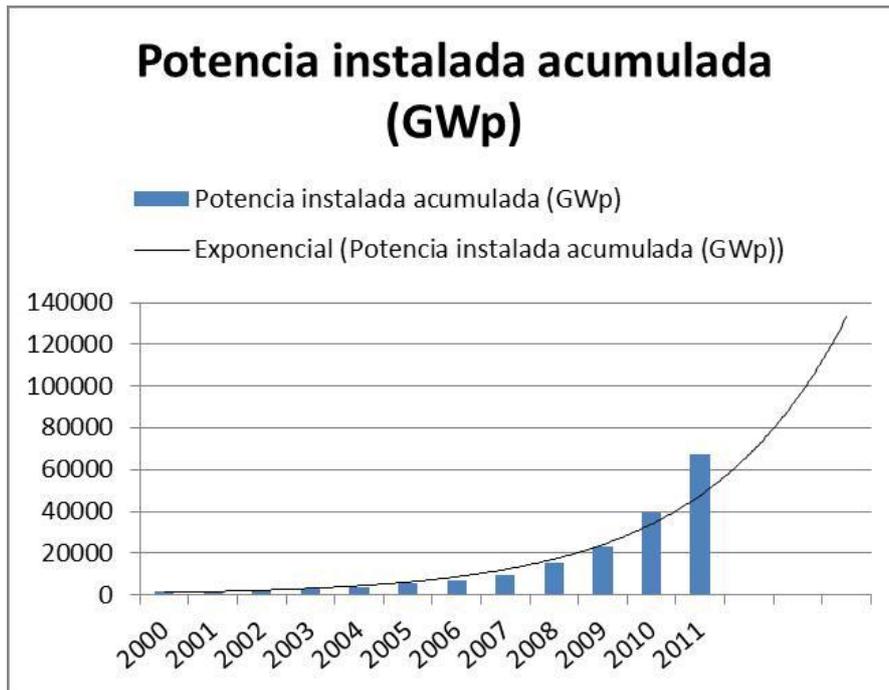


Figura (2.1). Evolución de la potencia eléctrica instalada en España proveniente de las fotovoltaicas

Viendo la evolución exponencial de las instalaciones solares fotovoltaicas queda reflejado el efecto “prisa” motivado por el cambio de retribución del RD 661/2007.

Con esta Información como precedente parece lógico pensar que el único estudio referente a las instalaciones solares fotovoltaicas es como mejorar el rendimiento de las que ya están instaladas y en funcionamiento.

2.4. El efecto fotoeléctrico:

2.4.1. Generalidades:

Se define como efecto fotoeléctrico a la aparición de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando estos se ven iluminados por radiación electromagnética, sin que sea necesario que aparezca intervenga ningún efecto mecánico o físico.

La generación de electricidad desde los paneles solares y células fotovoltaicas constituyen algunas de las aplicaciones más conocidas del efecto fotoeléctrico.

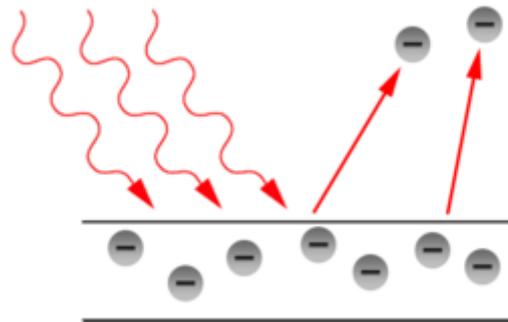


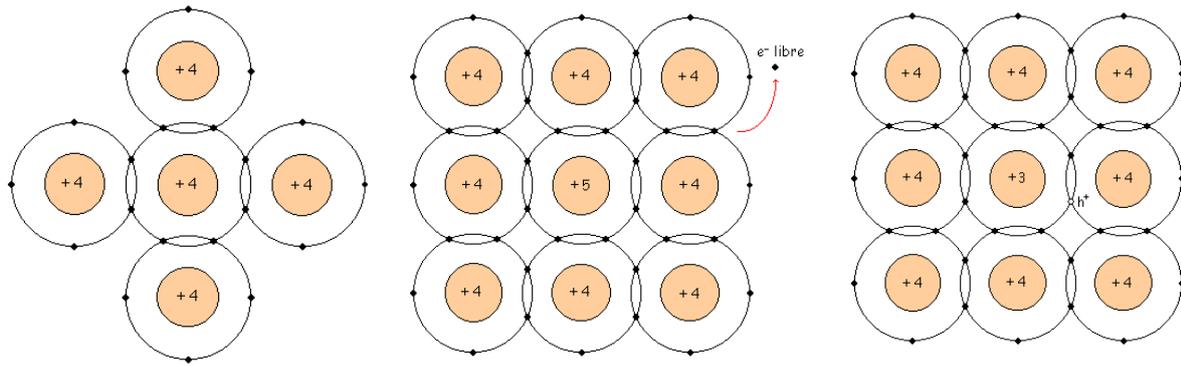
Figura (2.2) puede verse un diagrama del efecto fotoeléctrico

En la figura (2.2) puede verse un diagrama del efecto fotoeléctrico: Los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de una cantidad de energía que es suficiente para escapar del mismo.

El silicio como elemento químico cuenta con 14 electrones de los 4 son de valencia, lo que significa que están disponibles para unirse con los electrones de valencia de otros átomos. De este modo, en una configuración de cristal de silicio químicamente puro, cada átomo estará unido de forma covalente con otros 4 átomos de manera que dentro de el cristal no habrá, como consecuencia del enlace químico, electrones libres.

En realidad, algunos átomos de silicio en la configuración del cristal van a ser sustituidos por átomos de fósforo, elemento que tiene 5 electrones de valencia. Así, 4 serán utilizados para llevar a cabo los enlaces químicos con átomos adyacentes de silicio, mientras que el quinto podrá separarse del átomo de fósforo mediante una estimulación aportada por una fuente externa de energía térmica, con lo que pasará a disfrutar de libertad de movimiento en el interior del retículo de cristal.

En sentido contrario, si la sustitución del átomo de silicio se realizase con átomos de boro, que sólo tiene 3 electrones de valencia, se llegaría a una situación en la que sería necesario un electrón adicional para completar los enlaces químicos con átomos adyacentes de silicio. Este electrón que falta es denominado "hueco", y produce un efecto opuesto, como si se tratase de un electrón positivo



Estructura cristalina del silicio

Combinación con átomos de fósforo

Combinación con átomos de boro

Figura (2.3) Estructura cristalina del silicio, combinación con átomos de fósforo, combinación con átomos de boro

En la siguiente figura se muestra gráficamente la situación descrita; en la primera imagen se puede observar cuál es la estructura del retículo cristalino de silicio puro, en la segunda cómo es la variación de la estructura cuando se realiza una combinación de átomos de fósforo y en la última imagen aparece el retículo cristalino en el caso de enlace con átomos de boro.

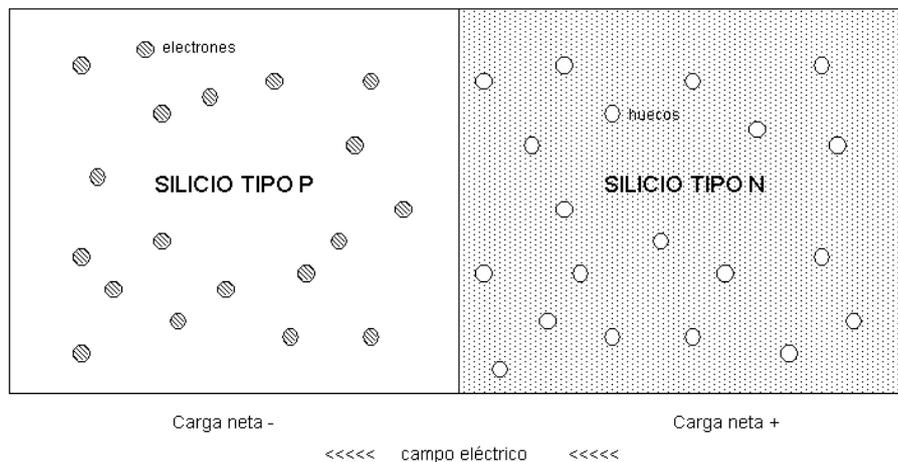


Figura (2.4) Estructura p-n del diodo

Por lo tanto, en el caso de que se produzca el enlace con fósforo, los portadores de carga libres poseen potencial negativo y el material es llamado semiconductor de “tipo n”. Mientras, en el caso en que la mencionada sustitución de átomos de silicio se produzca con átomos de boro, los portadores de carga son positivos y el material es llamado de “tipo p”.

Uniendo una barra de material tipo n con una barra de material tipo p se realiza la unión de dos de estos materiales “tipo n” y “tipo p”, constituyendo lo que se denomina diodo ó enlace “p-n”

Los electrones que se encuentran en estado libre dentro de la zona de material “tipo-n” detectarán que existe colindante una región en la que no existen electrones libres y, esto hará que se genere un flujo de estos electrones portadores hacia la otra zona, como consecuencia del intento de restablecer el equilibrio. Del mismo modo, los huecos existentes en la “zona-p” detectarán un área en la que no existen huecos y se producirá, por tanto, un flujo de cargas positivas en sentido contrario al flujo de electrones. Debido al avance de este proceso de difusión de electrones y huecos, en la “zona-p” se generará un exceso de cargas con potencial negativo mientras en la “zona -n” se producirá un exceso de cargas positivas.

Por tanto, en el área de unión de los dos materiales se origina un campo eléctrico que se hace cada vez mayor a medida que huecos y electrones se siguen difundiendo hacia lados opuestos. Este proceso no terminará hasta que el potencial eléctrico de este campo alcance un valor que impida la posterior difusión de electrones y huecos.

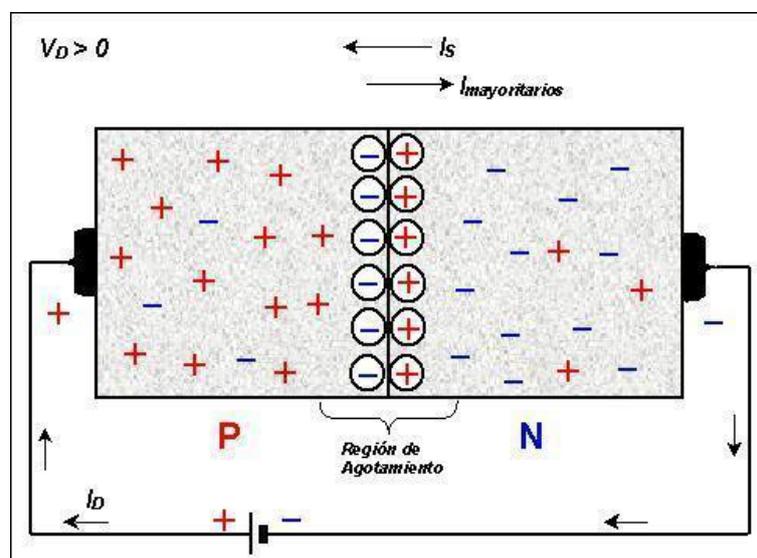


Figura (2.5). Representación del potencial eléctrico

Una vez se haya alcanzado este valor equilibrio, se habrá creado en el diodo p-n un campo eléctrico permanente sin la ayuda de campos eléctricos o elementos externos. Este potencial eléctrico permite explicar el por qué del efecto fotovoltaico.

Supongamos que un fotón (partícula que constituye un rayo solar) incide sobre la región de tipo p del material. Si el fotón incidente posee una energía térmica mayor que la energía mínima necesaria para romper un enlace del retículo del silicio (band-gap) será absorbido y con ello se creará una nueva pareja electrón-hueco. El efecto de la creación de esta nueva pareja será que el electrón liberado se trasladará hacia la “zona-n” a causa del potencial eléctrico.

En cambio si el fotón incide en la zona n, se generaría también una nueva pareja pero en este caso el hueco creado se movería hacia la “zona-p”.

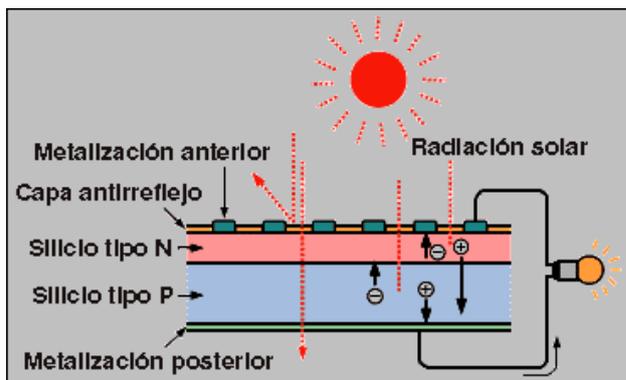
Este flujo va a tener como consecuencia la acumulación de de cargas positivas en la “zona-p” y de cargas negativas en la “zona-n”, dando origen a un campo eléctrico opuesto al creado por el mecanismo de difusión.

Evidentemente, cuando mayor sea el número de fotones que incide sobre la unión, mayor será el número de los campos que pasen a anularse el uno con el otro, hasta que se alcance un valor umbral en el que ya no haya un campo interno que separe cada pareja electrón-hueco. Esta es la condición que determina la tensión a circuito abierto de la célula fotovoltaica. Si se colocasen unos electrodos (contactos metálicos) sobre la superficie de la célula se puede utilizar el potencial creado, haciendo circular la corriente de electrones.

2.5. La célula solar:

En una célula solar la luz incide generalmente sobre una lámina tipo n de grosor muy fino y penetra suficientemente en el cristal como para crear pares electrón-hueco en las proximidades de la unión con el cristal de tipo p. Por lo tanto, **el grosor de la lámina superior influye en el rendimiento y deberá ser menor, por lo general, que $1\mu\text{m}$**

Así, al irradiar la célula, la lámina de tipo n recogerá los electrones, mientras que la de tipo p recogerá los huecos de los pares creados estableciéndose entonces la diferencia de potencial entro del cristal. Obtenemos corriente eléctrica con un circuito que una eléctricamente las láminas tipo p y n.

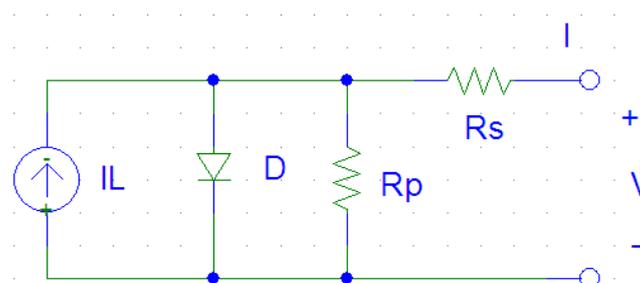


Figura(2.6). Funcionamiento



Figura(2.7). Célula

Podríamos representar un esquema eléctrico aproximado del funcionamiento de la célula fotovoltaica de la siguiente manera:



Figura(2.8). Circuito equivalente módulo fotovoltaico

2.6. El panel fotovoltaico:

2.6.1. Composición y geometría:

Las células solares constituyen un producto intermedio: proporcionan valores de tensión y de corriente limitados en comparación a los requeridos normalmente por los aparatos usuarios, son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin soporte mecánico. Se ensamblan de la manera adecuada para formar una única estructura: el panel fotovoltaico que es una estructura sólida y manejable.

El número de células en un panel, y por lo tanto su voltaje de salida, depende de la estructura cristalina del semiconductor usado. Los paneles pueden tener diferentes tamaños: los más utilizados están formados por 40-80 células conectadas eléctricamente en serie, con una superficie que oscila entre los 0.8 m^2 a los 2 m^2 . Las células están ensambladas entre un estrato superior de cristal y un estrato inferior de material plástico (Tedlar). El producto preparado de esta manera se coloca en un horno de alta temperatura, con vacío de alto grado.

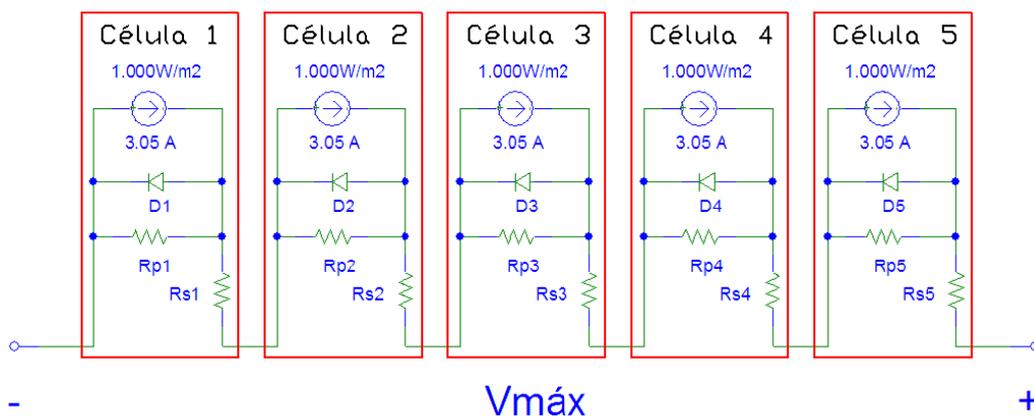


Figura (2.9) Esquema eléctrico equivalente.

El resultado es un bloque único laminado en el que las células están "ahogadas" en el material plástico fundido. Luego se añaden los marcos, normalmente de aluminio; de esta manera se confiere una resistencia mecánica adecuada y se garantizan muchos años de funcionamiento. En la parte trasera del módulo se añade una caja de unión en la que se ponen los diodos de by-pass y los contactos eléctricos.

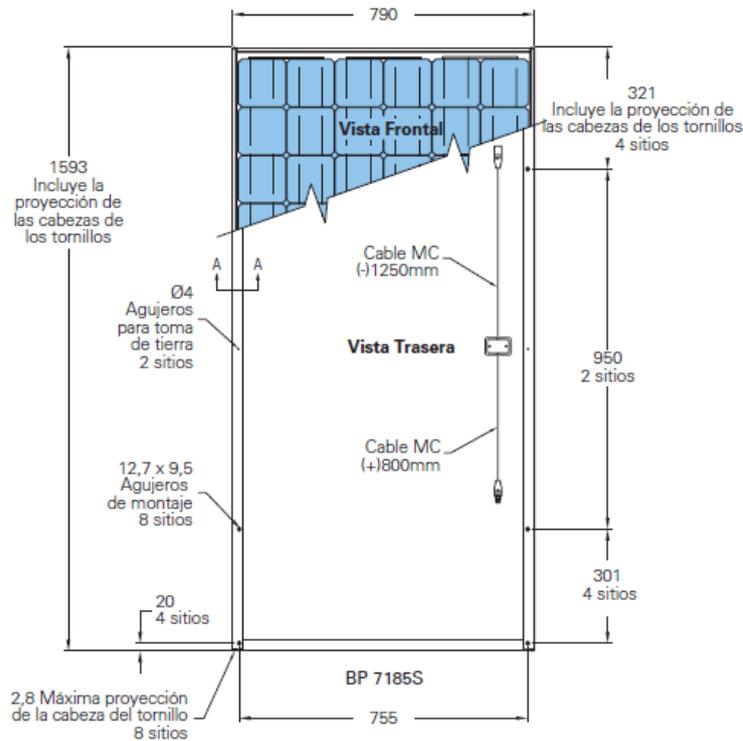


Figura (2.10) Panel fotovoltaico Modelo BP-71585S. Fabricante BP

2.7. Características eléctricas:

2.7.1. Potencia Máxima de Salida

La potencia máxima de salida de un panel fotovoltaico es, sin duda alguna, la característica más importante del mismo. Salvo en casos de muy bajo consumo, la implementación de un sistema fotovoltaico requiere el uso de paneles con salidas 30 o más vatios. Paneles con potencias por debajo de 30W no ofrecen una solución práctica, ya que la diferencia en el costo no es suficiente para justificar el mayor número de paneles requeridos.

Los módulos formados tienen una potencia que varía entre los 50Wp y los 220Wp, según el tipo y la eficiencia de las células que lo componen.

2.7.2. Curvas I-V

Si los valores de potencia luminosa y la orientación del panel permanecen constantes, la corriente de salida de un panel fotovoltaico varía con el valor del voltaje en la carga y su temperatura de trabajo. Esto se debe a las características intrínsecas de los materiales semiconductores.

Curvas I-V del BP 7185S

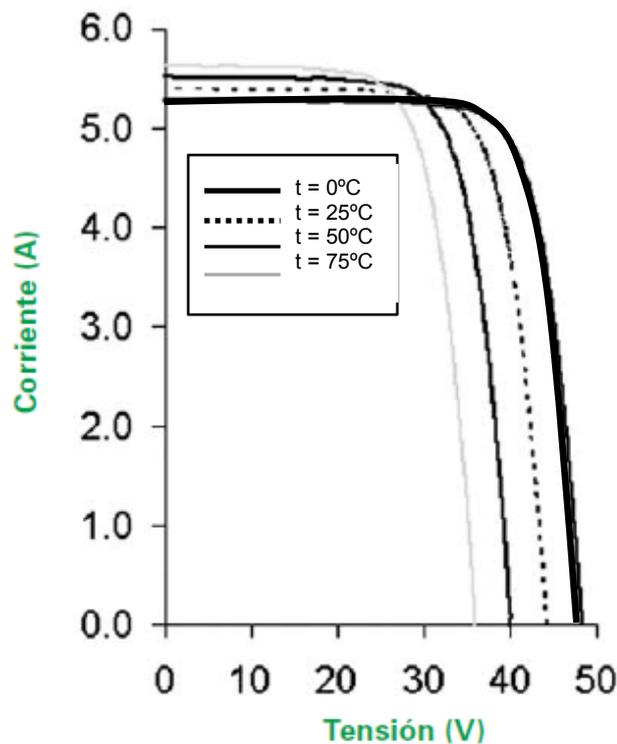


Figura (2.11) Curva I-V del panel BP 7185S

La Figura (2.11) muestra, en forma gráfica, la relación existente entre la corriente y el voltaje de salida para un panel fotovoltaico (curva I-V), para cuatro temperaturas de trabajo, cuando el nivel de radiación permanece constante. Si bien se ha seleccionado un panel en particular para esta figura, los restantes que podemos encontrar en el mercado van a tener un comportamiento similar, ya que utilizan células de silicio. Puede observarse que el valor máximo para el voltaje de salida corresponde a un valor de corriente nulo (voltaje a circuito abierto), mientras que el valor máximo para la corriente corresponde a un voltaje de salida nulo (salida cortocircuitada)

Todas las curvas tienen una zona donde el valor de la corriente permanece prácticamente constante para valores crecientes de voltaje de salida, hasta que alcanza una zona de transición. A partir de esta zona, pequeños aumentos en el voltaje de salida ocasionan bruscas disminuciones en el valor de la corriente de salida. El comienzo de la zona de transición se alcanza para menores valores del voltaje de salida cuando la temperatura de trabajo se incrementa.

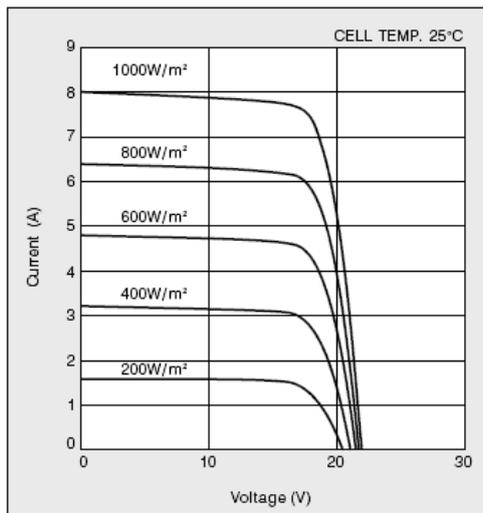


Figura (2.12) .Curvas I-V del panel Kyocera KC130TM para distintos niveles de radiación.

2.7.3. Intensidad

La intensidad de corriente que genera el panel aumenta con la radiación, permaneciendo el voltaje aproximadamente constante.

En la figura (anterior) puede verse, para unas condiciones de temperatura constante, como las curvas I-V de un panel varían por incidencia de la radiación. En las curvas puede apreciarse como la incidencia de la radiación afecta mucho más a la intensidad.

En este sentido tiene mucha importancia la colocación de los paneles (su orientación e inclinación respecto a la horizontal), ya que los valores de radiación varían a lo largo del día en función de la inclinación del sol respecto al horizonte.

2.7.4. Efecto de la temperatura

El aumento de la temperatura en las células supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. Esto implica que tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a circuito abierto se ven afectados por la temperatura de trabajo, aunque el tipo parámetros.

Si tomamos como referencia los valores de 25°C, la corriente de cortocircuito aumenta moderadamente (del orden de un 1% a 50°C pero un 3% a 75°C), mientras que el voltaje a circuito abierto disminuye sensiblemente (aproximadamente 8% a 50°C pero cerca de un 15% a 75°C).

El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo.

Una radiación de 1.000W/m² es capaz de calentar un panel unos 25 grados por encima de la temperatura del aire circundante, lo que reduce la tensión y por tanto la potencia en un factor superior al 10-12%.

Por ello es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien aireados.

*Mas adelante veremos más en profundidad los efectos de la temperatura cuando estudiemos los efectos de las sombras en los paneles fotovoltaicos.

2.7.5. Máxima potencia de salida

Para cada condición de trabajo se puede calcular la potencia de salida del panel multiplicando los valores correspondientes al voltaje y la corriente para ese punto de la curva I-V. En particular, la potencia de salida es nula para dos puntos de trabajo: circuito abierto y cortocircuito, ya que la corriente o el voltaje de salida es nulo. Por lo tanto, si la salida de un panel es cortocircuitada, éste no sufre daño alguno.

Entre estos dos valores nulos, la potencia de salida alcanza un valor máximo que varía con la temperatura. El valor máximo que corresponde a una temperatura de trabajo de 25°C se denomina “valor óptimo” o “valor pico” (Wp) del panel. Para determinarlo, se usan los denominados valores estándar STC:

- Radiación solar = 1.000W/m^2
- Temperatura = 25°C
- Espectro luminoso = 1.5 masa de aire

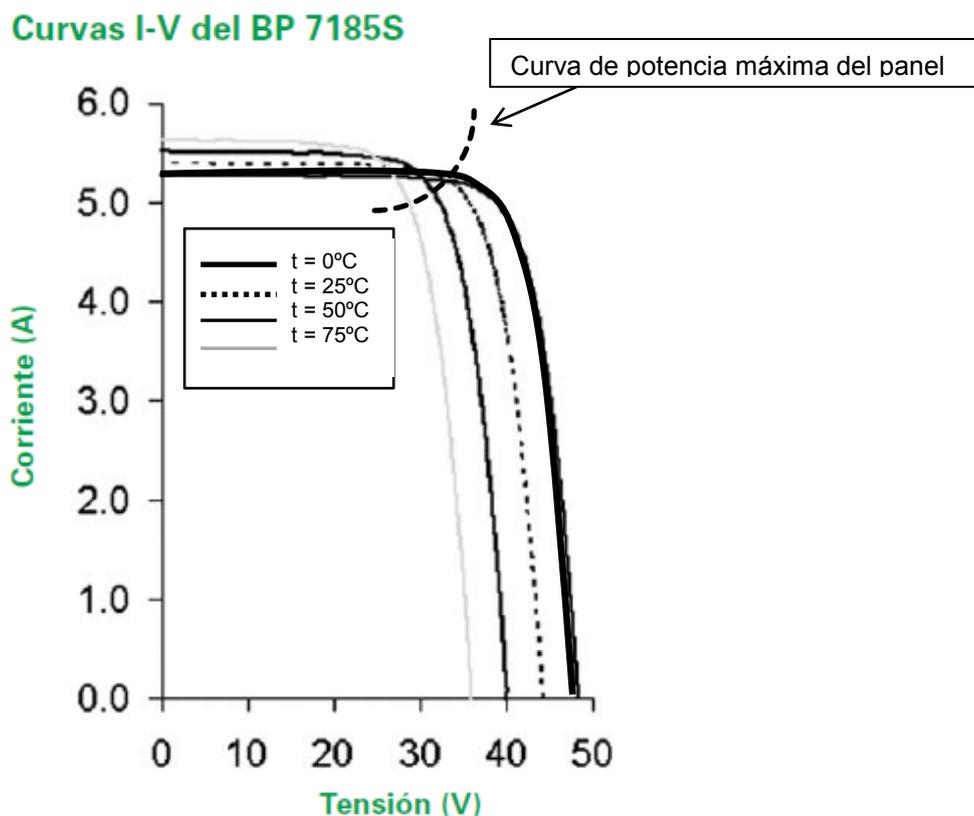


Figura (2.13) Ejemplo de curva de potencia máxima del panel.

Los valores de voltaje y corriente asociados con este máximo (V_p e I_p) son los dados en la hoja de especificaciones del panel. La figura () muestra, en la línea de puntos, la ubicación de los valores de potencia máxima en función de la temperatura de trabajo. Estos están ubicados al comienzo de la zona de transición de la curva I-V para la temperatura en consideración.

El W_p (watio pico) es la unidad de medida de referencia utilizada para los módulos fotovoltaicos.

Expresa la potencia eléctrica suministrable por el módulo en las condiciones estándares de STC.

2.7.6. Temperatura de trabajo del panel:

La temperatura de trabajo que alcanza un panel FV obedece una relación lineal dada por la expresión:

$$T_t = T_a + k \cdot R$$

Dónde:

- T_t es la temperatura de trabajo del panel,
- T_a es la máxima temperatura ambiente,
- R es el valor de la radiación en W/m^2 ,
- k es un coeficiente que varía entre 0.02 y 0.04 $^{\circ}C \cdot m^2/W$, dependiendo de la velocidad promedio del viento.

2.7.7. Evaluación de la potencia de salida:

Una vez conocido el valor de la temperatura de trabajo del panel puede determinarse el valor de la potencia de salida. Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$P_t = P_p - (P_p \cdot \delta \cdot \Delta T)$$

Dónde:

- P_t es la potencia de salida a la temperatura de trabajo (T_t)
- P_p es la potencia pico del panel (a $25^{\circ}C$)
- δ es el coeficiente de degradación
- ΔT es el incremento de temperatura por sobre de los $25^{\circ}C$, es decir:
 $\Delta T = T_t - 25^{\circ}C$

A modo de ejemplo, para determinar la potencia de salida a partir de los valores:

- Radiación solar: 1200W/m²;
- Máxima temperatura de verano: 35°C;
- Baja velocidad del viento durante esta estación: k=0.03
- Coeficiente de degradación $\delta=0.3\%/^{\circ}\text{C}$

Para un panel con potencia pico 175W:

En primer lugar es necesario calcular la temperatura de trabajo del panel en estas circunstancias.

$$T_t = T_a + k \cdot R$$

Sustituyendo:

$$T_t = 35(^{\circ}\text{C}) + 0.03(\text{m}^2/\text{W}) \times 1200 (\text{W}/\text{m}^2) = 71^{\circ}\text{C}$$

Por tanto la potencia de salida seña:

$$P_t = P_p - (P_p \cdot \delta \cdot \Delta T)$$

Sustituyendo:

$$P_t = 175(\text{W}_p) - 175(\text{W}_p) \times 0.003(1/^{\circ}\text{C}) \times (71-25)(^{\circ}\text{C}) = \mathbf{150.85 (W)}$$

2.8. Orientación inclinación y sombras

2.8.1. Generalidades:

La orientación e inclinación del generador fotovoltaico y las posibles sombras sobre el mismo serán tales que las pérdidas serán inferiores a los límites de la tabla siguiente:

	Orientación e inclinación (OI)	Sombras (S)	Total (OI+S)
General	10%	10%	15%
Superposición	20%	15%	30%
Integración arquitectónica	40%	20%	50%

Tabla (2.1) Límites de pérdidas por orientación inclinación y sombras

Se consideraran tres casos: general, superposición e integración arquitectónica. En todos los casos se han de cumplir tres condiciones: las pérdidas por orientación e inclinación, las pérdidas por sombreado y las pérdidas totales deben ser inferiores a los límites estipulados. Cuando la condición anterior no pueda cumplirse, por razones justificadas, y en casos especiales en los que no se puedan instalar de acuerdo con la consideración anterior, se evaluará la reducción en las prestaciones energéticas de la instalación, incluyéndose en la memoria del proyecto esta particularidad.

En todos los casos deberán evaluarse las pérdidas por orientación e inclinación del generador y sombras e incluir su cálculo detallado en la memoria del proyecto. Cuando existan varias filas de módulos, será necesario realizar el cálculo de la distancia mínima y las pérdidas por sombreado entre filas de módulos.

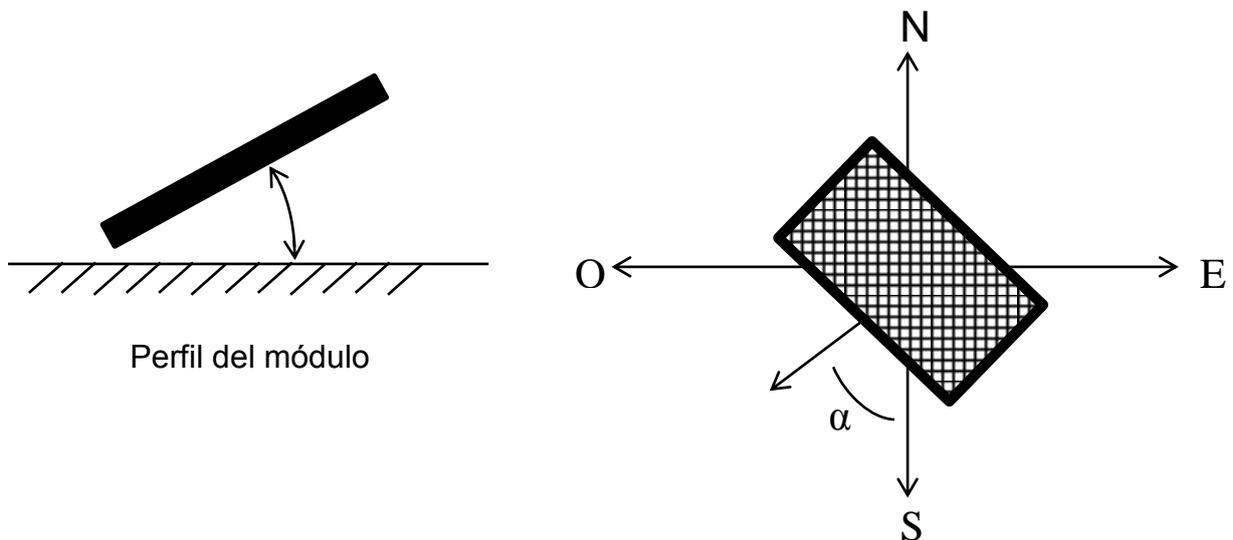


Figura (2.14) Ángulos de inclinación y acimut.

2.8.2. La influencia de la orientación e inclinación

Las pérdidas por este concepto se calcularán en función de:

- Ángulo de inclinación, β , definido como el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal. Su valor es 0° para módulos horizontales (coplanarios) y 90° para verticales.
- Ángulo de acimut, α , definido como el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar. Valores típicos son 0° para módulos orientados al sur, -90° para módulos orientados al este y $+90^\circ$ para módulos orientados al oeste.

Habiendo determinado el ángulo de acimut del generador, se calcularán los límites de inclinación aceptables de acuerdo a las pérdidas máximas respecto a la inclinación óptima señaladas en la tabla del Apartado anterior.

Para contrastar la influencia de la orientación e inclinación en el rendimiento de una instalación solar fotovoltaica, usaremos el programa on-line "PVGIS-SOLAREC Europe" para calcular la producción estimada de una central fotovoltaica de 20kWp situada en Tarragona, en función de la inclinación y la orientación de los paneles, teniendo en cuenta una perdidas del sistema (cables, inversor, etc) del 10%.

Inclinación: $\beta = 0^\circ$

Orientación: $\alpha = 0^\circ$ acimut

PVGIS estimates of solar electricity generation

Fixed system: inclination= 0° , orientation= 0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	30.20	937	1.89	58.6
Feb	41.90	1170	2.57	72.1
Mar	63.20	1960	3.91	121
Apr	77.40	2320	4.86	146
May	91.10	2820	5.84	181
Jun	98.10	2940	6.42	193
Jul	97.80	3030	6.46	200
Aug	86.30	2680	5.70	177
Sep	69.60	2090	4.49	135
Oct	49.80	1550	3.17	98.4
Nov	32.80	985	2.07	62.2
Dec	25.90	804	1.64	50.9
Yearly average	63.8	1940	4.09	125
Total for year		23300		1490

En estas condiciones el programa PVGIS nos calcula unas pérdidas globales del 21.8%.

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)

E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

Inclinación: $\beta = 10^\circ$
 Orientación: $\alpha = 0^\circ$ acimut

PVGIS estimates of solar electricity generation

Fixed system: inclination=10°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	38.40	1190	2.32	72.1
Feb	49.30	1380	2.99	83.7
Mar	69.70	2160	4.32	134
Apr	80.70	2420	5.09	153
May	92.00	2850	5.94	184
Jun	97.90	2940	6.45	194
Jul	98.30	3050	6.54	203
Aug	89.10	2760	5.92	183
Sep	75.40	2260	4.88	147
Oct	57.30	1780	3.63	113
Nov	40.60	1220	2.50	75.0
Dec	34.00	1050	2.06	63.8
Yearly average	68.7	2090	4.40	134
Total for year		25100		1600

En este caso podemos observar como al incrementar la inclinación de los paneles 10° se incrementa también la producción estimada anual en 1.800kW/h año, así como la media de radiación anual que reciben los paneles.

Las pérdidas totales se reducen ligeramente a 21.6%

Utilizando este método podemos proseguir a modo de ensayo error con el fin de encontrar la inclinación óptima para una futura instalación.

Inclinación: $\beta = 10^\circ$
 Orientación: $\alpha = 30^\circ$ acimut

PVGIS estimates of solar electricity generation

Fixed system: inclination=10°, orientation=30°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	37.30	1160	2.26	70.2
Feb	48.20	1350	2.93	82.1
Mar	68.70	2130	4.26	132
Apr	80.10	2400	5.06	152
May	91.80	2850	5.93	184
Jun	97.80	2930	6.44	193
Jul	98.10	3040	6.52	202
Aug	88.60	2750	5.88	182
Sep	74.50	2240	4.83	145
Oct	56.30	1740	3.57	111
Nov	39.50	1180	2.44	73.2
Dec	32.80	1020	2.00	62.0
Yearly average	67.9	2070	4.35	132
Total for year		24800		1590

Para tener en cuenta los cambios en el rendimiento que produce el cambio de orientación de los paneles, estos tienen que estar inclinados. En este caso tenemos las mismas condiciones que la simulación anterior pero con la orientación de los paneles en 30° acimut. Esto afecta en la producción anual en 300kW/h y las pérdidas totales se incrementan ligeramente 21.7%.

Para ver con más claridad la relación de las pérdidas entre la inclinación y la orientación tenemos al figura (2.15) que relaciona los dos factores en franjas de sombreados para latitud 41° (correspondiente a la ciudad de Tarragona).

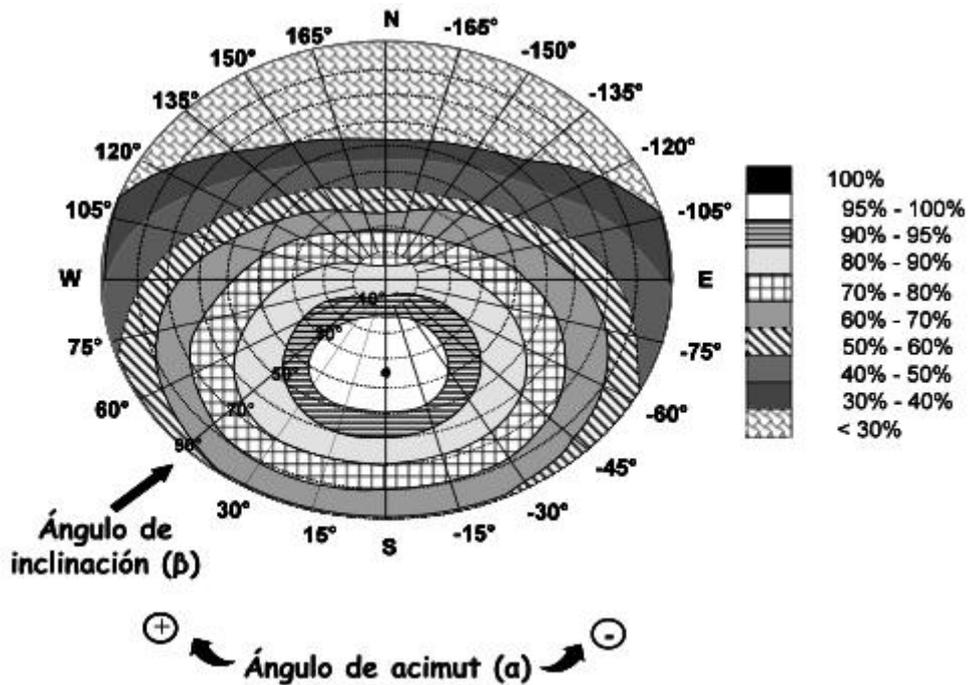


Figura (2.15) Pérdidas por orientación e inclinación para latitud 41°

En el caso que queramos verificar una instalación, podemos utilizar las siguientes fórmulas:

- Para $15^\circ < \phi < 90^\circ$:

$$P\acute{e}rdid\acute{a}s (\%) = 100 \cdot [1.2 \cdot 10 - 4 \cdot (\beta - \phi + 10)^2 + 3.5 \cdot 10 - 5 \alpha^2]$$

- Para $\phi < 15^\circ$

$$P\acute{e}rdid\acute{a}s (\%) = 100 \cdot [1.2 \cdot 10 - 4 \cdot (\beta - \phi + 10)^2]$$

Donde: β = ángulo de inclinación de los módulos (°)

α = ángulo de inclinación acimut (°)

ϕ = Latitud del lugar (°)



Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

3. Anexo 1: Estudio sombras

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

04/09/2012

Índice estudio sombras

3. ANEXO 1: ESTUDIO SOMBRAS	32
3.1. COMPORTAMIENTO DE LAS CÉLULAS CON SOMBRAS.....	34
3.1.1. Descripción general.....	34
3.1.2. Descripción del estudio.....	37
3.1.3. Estudio sobre el caso.....	38
3.2. COMPORTAMIENTO DE LOS MÓDULOS CON SOMBRAS.....	39
3.2.1. Descripción general.....	39
3.2.2. Descripción del estudio.....	39
3.2.3. Curvas I-V de módulos fotovoltaicos sin sombreados.....	42
3.2.4. Curva I-V de los módulos 1 y 2.....	43
3.2.5. Curva I-V de los módulos 1, 2 y 3.....	44
3.2.6. Curva I-V de los módulos 1, 2, 3 y 4.....	45
3.2.7. Curva I-V de los módulos 1, 2, 3, 4 y 5.....	46
3.2.8. Curva I-V de los módulos 1, 2, 3, 4, 5 y 6.....	46
3.2.9. Curvas I-V de módulos fotovoltaicos con diversas sombras.....	48
3.2.10. Conclusiones.....	63

3.1. Comportamiento de las células con sombras

Hemos visto en la memoria el funcionamiento de una célula solar fotovoltaica, la curva característica I-V y el circuito eléctrico equivalente. Ahora vamos a realizar un estudio teórico, tratando de describir el comportamiento de diversas células fotovoltaicas conectadas en serie. Para ello vamos a utilizar el circuito eléctrico equivalente descrito anteriormente.

3.1.1. Descripción general

El estudio se va a realizar a un conjunto de cinco células solares conectadas en serie. Estas células serán las que componen el módulo BP-7185S, con las características del módulo que se detallan en la Tabla ().

Características eléctricas típicas	BP 7185S
Potencia mínima garantizada*	185W
Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp})	36,5V
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mpp})	5,1A
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	5,5A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	44,8V
Coefficiente de temperatura de I_{sc}	(0,065±0,015)%/K
Coefficiente de temperatura de V_{oc}	-(160±20)mV/K
Coefficiente de temperatura de la P	-(0,5±0,05)%/K
NOCT (Temperatura ambiente 20°C; Irradiación solar 800W/m ² ; Velocidad del viento 1m/s)	47±2°C
Máximo valor del fusible en serie	15A
Tensión máxima del sistema	1000V (Certificado según IEC 61215) 1000V (Certificado por TÜV Rheinland)

Tabla (3.1) Características eléctricas módulo fotovoltaico BP-7185S

Características mecánicas	BP 7185S
Dimensiones (mm) (Tolerancias +/-3mm)	1593 x 790 x 50
Peso (kg)	15,4
Marco	Aleación clara de aluminio anodizado tipo 6063T6. Marco Universal plateado.
Células solares	72 células (125mm x 125mm) conectadas en serie y configuradas geométricamente en una matriz de 6 x 12.
Cables de salida	Cable de doble aislamiento de 3,3mm ² con conectores Multi-Contact. Longitudes de cable asimétricas de 1250mm (-) y 800mm (+).
Diodos	Tecnología IntegraBus™, que incluye diodos Schottky de bypass cada 12 células. Los diodos están integrados en una placa de circuito impreso y encapsulado.
Construcción	Frontal: cristal templado de 3,2mm de alta transmisibilidad. Posterior: poliéster blanco; encapsulante: EVA.

Tabla (3.2) Características mecánicas módulo fotovoltaico BP-7185S

Por lo tanto, teniendo las características eléctricas y físicas del módulo fotovoltaico se van a hallar las características eléctricas de las células fotovoltaicas que componen el módulo y de este modo poder realizar el comportamiento de cinco células en serie cuando existen sombras.

Para saber la cantidad de corriente de cortocircuito que suministra cada célula fotovoltaica hay que dividir la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico entre el número de células en paralelo. Siendo:

$$ISC, Célula = ISC, Módulo / Número de células en paralelo = 5,5 A / 1 = 5,5 A$$

En el caso de este panel en particular, todas las células están conectadas en serie. Una vez obtenida la corriente de cortocircuito, para obtener la tensión en circuito abierto de cada una de las células fotovoltaicas hay que dividir la tensión de circuito abierto del módulo entre el número de células en serie, obteniendo:

$$VOC, Célula = VOC, Módulo / Número de células en serie = 44,8 V / 72 = 0,62 V$$

Teniendo los valores de tensión en circuito abierto y corriente de cortocircuito de cada célula fotovoltaica en condiciones de 1 000 W/m², 25 °C y AM 1.5 ahora hay que obtener los valores de tensión y corriente para el punto de máxima potencia de la célula fotovoltaica realizando las mismas operaciones pero en lugar de escoger los parámetros de circuito abierto y corriente de cortocircuito de módulo fotovoltaico se escogen los del punto de máxima potencia.

$$IMáx, Célula = IMáx, Módulo / Número de células en paralelo = 5,1 A / 1 = 5,1 A$$

$$VMáx, Célula = VMáx, Módulo / Número de células en serie = 36,5 V / 72 = 0,51 V$$

Teniendo los valores de corriente y tensión para el punto de máxima potencia solo falta hallar la potencia máxima de la célula que se obtiene del producto de corriente y tensión.

$$PMáx, Célula = VMáx, Célula x IMáx, Célula = 0,51 V x 5,1 A = 2,601 W$$

Habiendo obtenido las características eléctricas de las células que componen el módulo en estudio (BP-7185S) solo falta describir el circuito a estudiar.

Las cinco células fotovoltaicas a estudiar están conectadas en serie, tal y como se muestra en la siguiente figura.

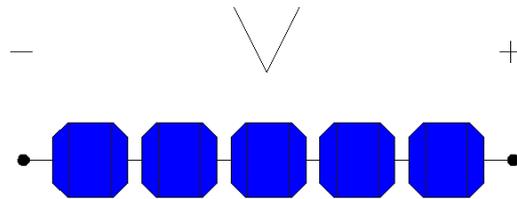


Figura (3.1) Conexión células fotovoltaicas a estudiar

Teniendo en cuenta que para estudiar el comportamiento de las cinco células conectadas en serie hay que tratar cada una de las células como un circuito eléctrico, del circuito equivalente descrito se obtiene la siguiente figura donde se describe eléctricamente las cinco células fotovoltaicas teniendo en cuenta una características de radiación y temperatura con los siguientes valores para cada una de ellas:

- Radicación: $1\,000\text{ W/m}^2$
- Temperatura ambiente: $25\text{ }^\circ\text{C}$
- Corriente suministrada por la fuente: $5,1\text{ A}$
- Tensión de cada célula: $0,51\text{ V}$
- Tensión del conjunto de 5 células: $2,55\text{ V}$
- Corriente del conjunto de 5 células: $5,1\text{ A}$

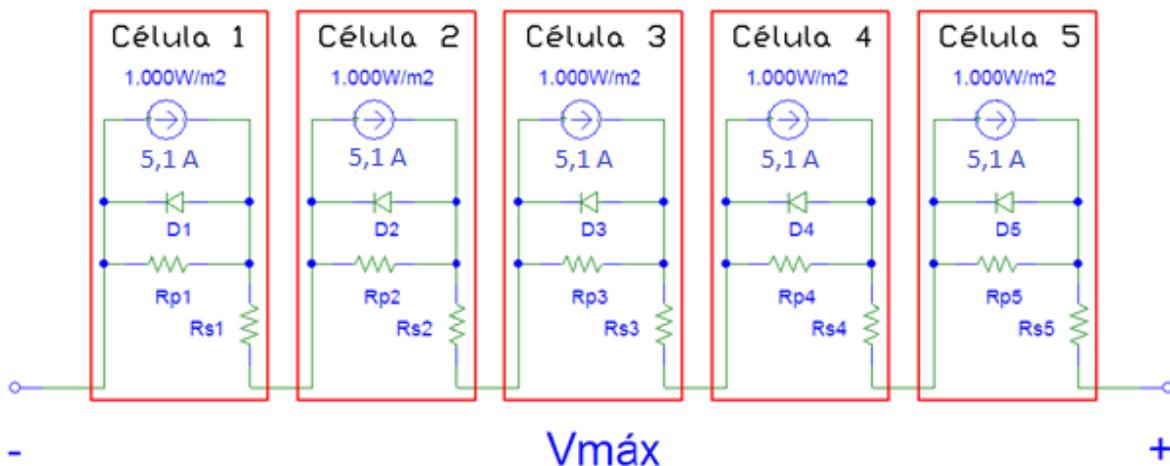


Figura (3.2) Circuito equivalente conjunto células fotovoltaicas

Como se observa de la figura anterior y del circuito equivalente, cada una de las células tiene una fuente de alimentación que inyecta corriente en función de la radiación que le incide, un diodo que no permite el paso de corriente cuando hay radiación pero cuando no hay radiación si permite y unas resistencias (paralelo y serie).

Por lo tanto, el camino que sigue la corriente es el mostrado con línea azul discontinua en la siguiente figura.

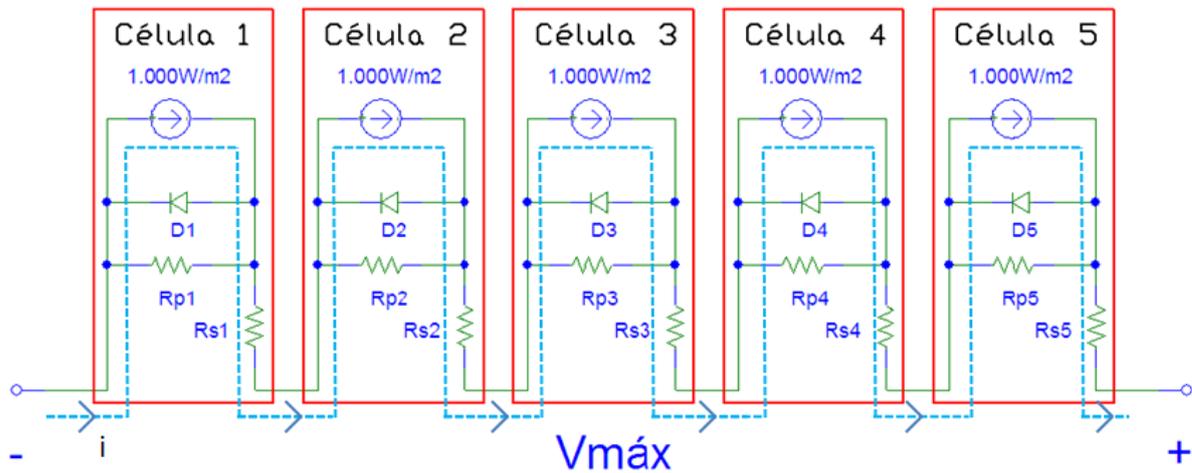


Figura (3.3) Camino corriente eléctrica en circuito equivalente

3.1.2. Descripción del estudio

Para poder estudiar el comportamiento del conjunto de las cinco células se tiene en cuenta el siguiente escenario donde se puede observar que una de las cinco células tiene la totalidad de la célula tapada.

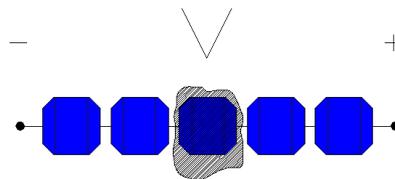


Figura (3.4) Sombra célula fotovoltaica a estudiar

El objeto que tapa la célula no permite a la fuente de la célula 3 suministrar corriente, por lo que el circuito equivalente para este caso se convierte en el siguiente.

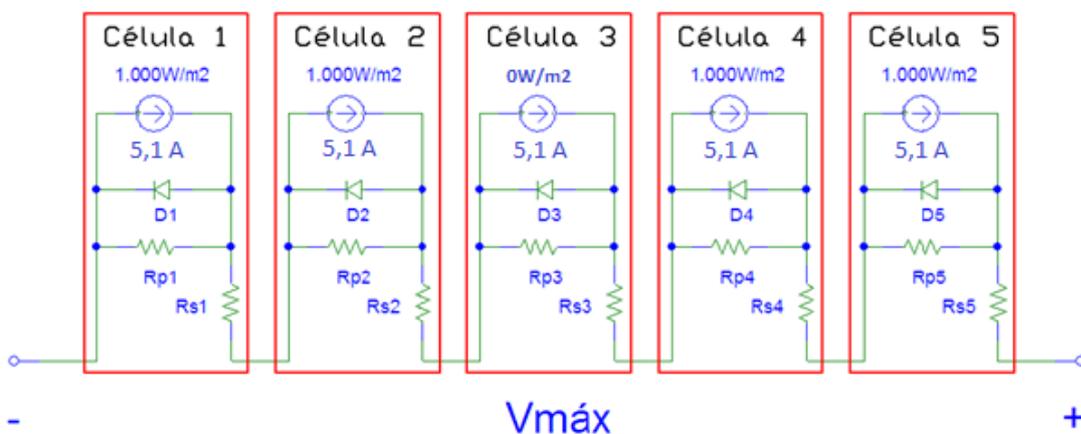


Figura (3.5) Circuito equivalente conjunto con sombra en una célula

Se puede observar, que debido a que la fuente no recibe radiación no suministra corriente y se comporta como un circuito abierto por lo que la corriente circula por la resistencia R_{p3} tal y como se observa en la siguiente figura.

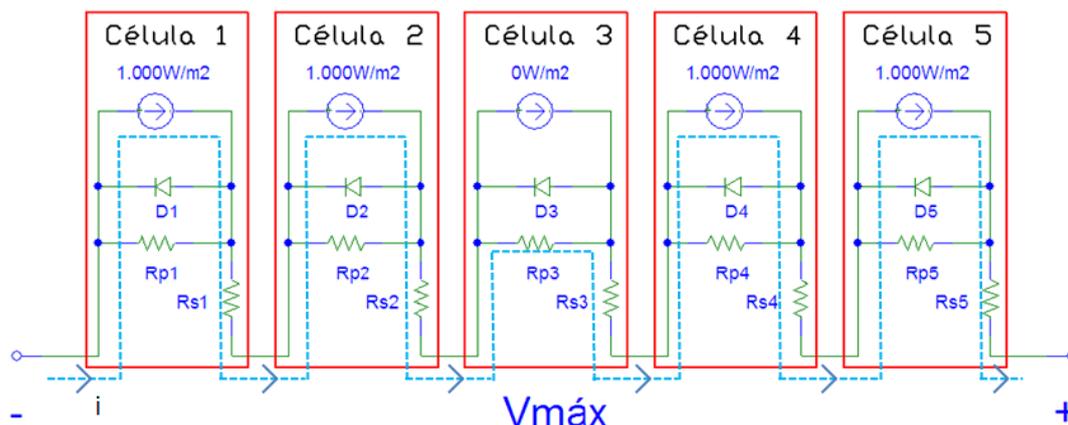


Figura (3.6) Camino corriente eléctrica en circuito equivalente con sombra

3.1.3. Estudio sobre el caso

Como se ha descrito en el planteamiento del caso a estudiar, en este apartado se va a estudiar cómo se comportan un conjunto de células conectada en serie cuando en una de ellas no se refleja radiación.

Hay que tener en cuenta que las cinco células están conectadas en serie y en cuatro de ellas hay una fuente de corriente que suministra una intensidad de 5,1 A y una de ellas, al no recibir radiación, la fuente de corriente se convierte en un circuito abierto.

La célula que no suministra corriente debido a la falta de radiación no corta la corriente generada por las otras células fotovoltaicas sino que esta corriente pasa por la resistencia en paralelo (R_{P3}) ya que el diodo no deja circular la corriente. Este proceso indica que la célula fotovoltaica 3 se comporta como una carga resistiva.

Al tratarse la célula fotovoltaica como una carga resistiva, la corriente que circula por la resistencia hace que esta consuma una potencia proporcional a la corriente que circula por ella.

Por lo tanto, la potencia que disipa esta resistencia se obtiene:

$$\text{Potencia (W)} = \text{Corriente (A)} \times \text{Tensión Célula (V)}$$

Teniendo en cuenta que gran parte de esta potencia se transforma en temperatura, la célula fotovoltaica se calienta.

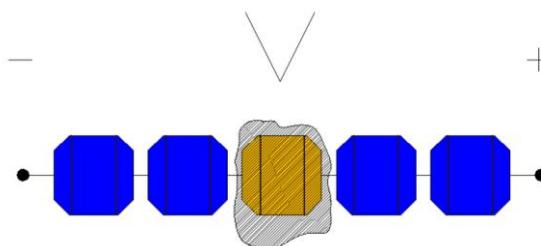


Figura (3.7) Célula fotovoltaica con sombra

Tal y como se observa en la figura anterior, una célula fotovoltaica con sombra cuando está conectada en serie con otras células fotovoltaicas se calienta más que las que están sometidas a radiación solar debido a que esta no se comporta como generadora de corriente sino como carga.

3.2. Comportamiento de los módulos con sombras

3.2.1. Descripción general

Habiendo realizado un pequeño estudio teórico sobre el comportamiento de las células fotovoltaicas cuando sobre ellas incide radiación solar o de lo contrario tienen sombras, se quiere aplicar estos conceptos teóricos en una instalación fotovoltaica.

Debido a la necesidad material que requiere este estudio empírico, vamos a explicar el estudio del Ingeniero Técnico Electrónico Tomás Saz, realizado en la empresa Aplir, constructora de instalaciones solares fotovoltaicas, donde se encarga de la supervisión y producción de las múltiples instalaciones repartidas por el territorio nacional pertenecientes a la empresa y otras instalaciones que contratan dicho servicio. Aplir es también la empresa donde tuve la oportunidad de realizar prácticas.

Aprovechando el acceso a una instalación fotovoltaica de 5 kW se va a realizar un estudio más práctico detallando la repercusión de sombras en una cadena variable de módulos.

3.2.2. Descripción del estudio

Para llevar a cabo este estudio se han utilizado los siguientes componentes de medida y los componentes propios de la instalación fotovoltaica instalada.

3.2.2.1. Módulos Fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos instalados son de la marca Conergy y modelo SC170MA con las características eléctricas y físicas que se detallan a continuación:

Módulo Conergy SC170MA	
Características Eléctricas (1 000 W/m ² , 25 °C, AM 1.5)	
Potencia Pico (P _{máx})	170 W
Eficiencia del módulo (%)	13,10%
Tensión punto de máxima potencia (V _{mpp})	35,5 V
Corriente punto de máxima potencia (I _{mpp})	4,79 A
Tensión en circuito abierto (V _{oc})	44,4 V
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	5,27 A
Coefficiente de temperatura (P _{mpp})	-0,485 %/°C
Coefficiente de temperatura (V _{oc})	-0,155 V/°C
Coefficiente de temperatura (I _{sc})	2,79 mA/°C
Tensión máxima del sistema	1.000 V
Características Físicas	
Células	72 monocristalinas
Dimensiones	1.575 x 826 x 46 mm
Peso	16,3 kg
Número de células en serie	24
Número de células en paralelo	3

Tabla (3.3) Características eléctricas módulos Conergy 170 MA

Como se puede observar, se destaca que los módulos están compuestos por tres cadenas de veinticuatro células fotovoltaicas conectadas en serie. Cada una de las tres cadenas tiene en paralelo un diodo llamado diodo de bypass. Este componente electrónico permite el flujo de corriente en un único sentido por lo que protege cada una de las cadenas de células de posibles daños ocasionados por las sombras parciales.

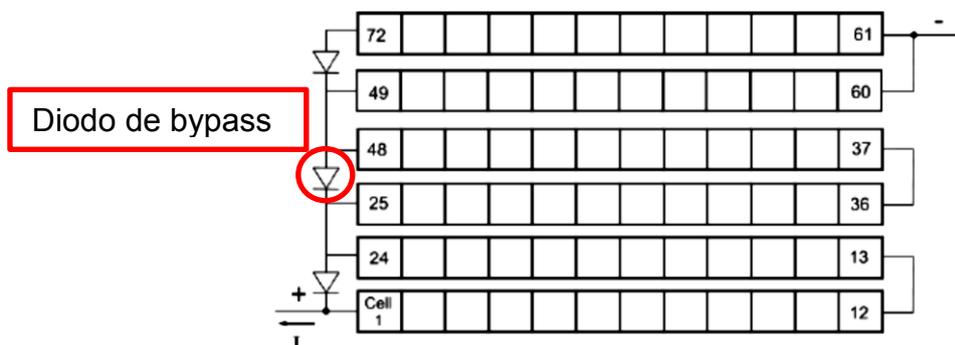


Figura (3.8) Diodo de bypass

La protección de cada una de las cadenas viene dada ya que el diodo impide que cada cadena de células absorba corriente de otra cadena si en un mismo módulo se producen sombras en alguna de las cadenas.

La colocación de los diodos de bypass puede variar según marca y modelo del módulo fotovoltaico. Según la configuración de dichos diodos puede variar mucho el efecto del

sombreado parcial en la potencia del panel. Más adelante veremos como afecta esta configuración a las curvas I-V y P-V.

La siguiente figura muestra el módulo solar fotovoltaico empleado en el estudio.

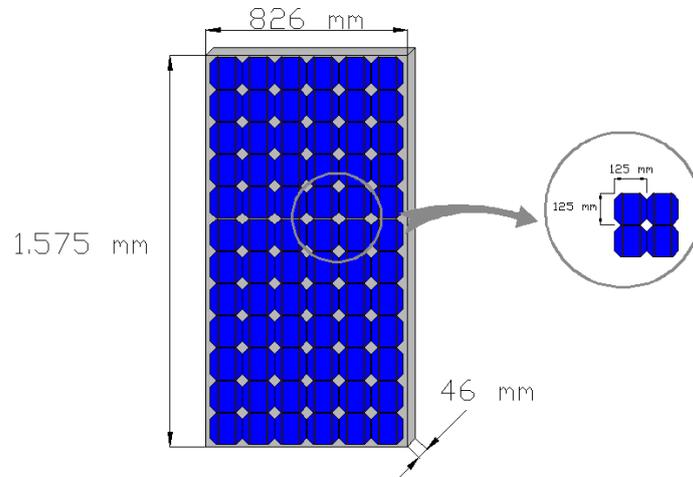


Figura (3.9) Módulo solar empleado

La colocación de los módulos es sobre una estructura fija inclinada a 30 grados y orientada a sur.

Para ser más precisos en los cálculos y comparaciones a realizar en el estudio, los valores de tensión y corrientes serán los obtenidos mediante foto-flash en lugar de los generales, de este modo sabremos los valores reales de cada uno de los módulos.

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5	Módulo 6	Unidades
Potencia Pico (Wp):	172,88	174,15	173,57	171,48	172,30	172,41	Wp
Tensión en circuito abierto (Voc):	44,81	43,92	44,72	44,72	44,88	44,78	V
Corriente de cortocircuito (Isc):	5,12	5,15	5,17	5,14	5,13	5,12	A
Tensión en el punto de máxima potencia (Vmpp):	36,68	37,16	37,09	36,66	36,85	36,89	V
Corriente en el punto de máxima potencia (Impp):	4,71	4,69	4,68	4,68	4,68	4,67	A

Tabla (3.4) Características eléctrica según foto-flash

3.2.2.2. Analizador de curvas

El dispositivo utilizado para el análisis de curvas es un sistema de medición combinado entre el TRI-KA y TRI-SEN.

Con el sistema de medición pueden llevarse a cabo las siguientes medidas y evaluaciones:

- Tensión en circuito abierto
- Corriente de cortocircuito
- Curva característica I-U
- Irradiación sobre el plano de los paneles
- Temperatura de las células

- Curva característica STC

Por medio de la curva corriente-tensión se puede valorar la calidad de una instalación fotovoltaica.

Características del dispositivo TRI-KA:

Medición	Curva corriente-tensión (potencia, corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto)
Rango de medición de tensión	50 – 1.000 V \pm 2 %
Rango de medida de corriente	0.1 – 10.0 A \pm 2 %
Conexión de la medición	Pinzas tipo cocodrilo
Memoria	Hasta 125 curvas de medición
Pantalla LCD	Pantalla gráfica 128 x 64 Pixel (Retroiluminada)
Alimentación	Baterías (4 x 1.5 V)
Puertos	Infrarrojos con el TRI-SEN, 2 cables a las cadenas de paneles
Funcionamiento	Controlado por menú a través teclado de membrana
Evaluación	PC-Software
Dimensiones	236 x 125 x 42 mm
Peso	0,5 kg

Mientras que las características del dispositivo TRI-SEN son:

Medición	Temperatura de la célula e irradiación
Rango de medición de temperatura	10 – 60 °C \pm 3 %
Rango de medida de irradiación	100 / 1.000 W/m ² \pm 3 %
Conexión para medición	Sin Contacto
Memoria	Hasta aproximadamente 8 horas
Pantalla LCD	8 caracteres de 5 x 7 pixels
Alimentación	Batería (1 x 9 V) o puerto USB
Puertos	Infrarrojos al TRI-KA
Manejo de la unidad	Pulsador
Evaluación	Transmisión al TRI-KA
Dimensiones	130 x 75 x 40 mm
Peso	0,15 kg

3.2.3. Curvas I-V de módulos fotovoltaicos sin sombreados

De los seis módulos que se disponen los datos eléctricos según foto-flash se obtienen, variando la cantidad de módulos, las curvas I-V obteniendo las siguientes gráficas de los módulos:

- Módulos 1 y 2
- Módulos 1, 2 y 3
- Módulos 1, 2, 3 y 4
- Módulos 1, 2, 3, 4 y 5
- Módulos 1, 2, 3, 4, 5 y 6

En las gráficas se observan cuatro curvas distintas: las curvas azules y lilas representan las características Intensidad-Voltaje (I-V) y Potencia-Voltaje (P-V)

respectivamente según el fabricante y las rojas y marrones representan las características I-V y P-V medidas con foto-flash.

En la parte superior de los gráficos tenemos los datos de radiación y temperatura del panel en el momento del ensayo.

3.2.4. Curva I-V de los módulos 1 y 2

De los dos módulos conectados en serie se obtiene las siguientes gráficas I-V y P-V. Para el caso que ahora nos ocupa nos fijaremos en las curvas superiores pertenecientes al gráfico I-V. Tal como hemos descrito anteriormente la curva roja es la medida y la azul es la curva según el fabricante.

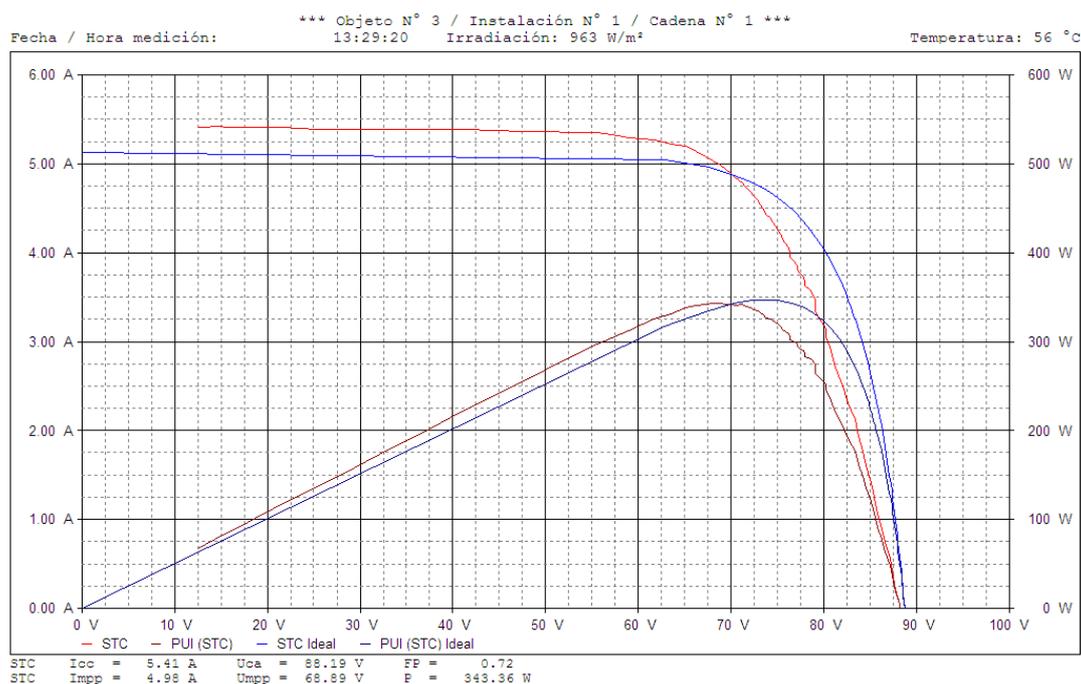


Figura (3.9) Curva I-V módulos 1 y 2

Comprobando los valores reales de cada módulo y recibidos por el fabricante se pueden comparar los parámetros de tensión en circuito abierto y corriente de cortocircuito.

Para los dos módulos conectados en serie, según la Tabla (), se obtiene:

$$V_{OC} \text{ (módulo 1 + módulo 2)} = 88,73 \text{ V}$$

$$I_{SC} \text{ (menor valor de los dos módulos)} = 5,12 \text{ A}$$

Comparando los valores según foto-flash con los obtenidos en la elaboración de la curva I-V y anotados en la parte inferior izquierda de la figura anterior se observan unas pequeñas variaciones tanto en corriente como en tensión.

3.2.5. Curva I-V de los módulos 1, 2 y 3

Para este caso, teniendo en cuenta que la curva I-V se realiza de tres módulos conectados en serie, se obtienen los siguientes valores extraídos de la Tabla ():

$$V_{OC} \text{ (módulo 1 + módulo 2 + módulo 3)} = 133,46 \text{ V}$$

$$I_{SC} \text{ (menor valor de los dos módulos)} = 5,12 \text{ A}$$

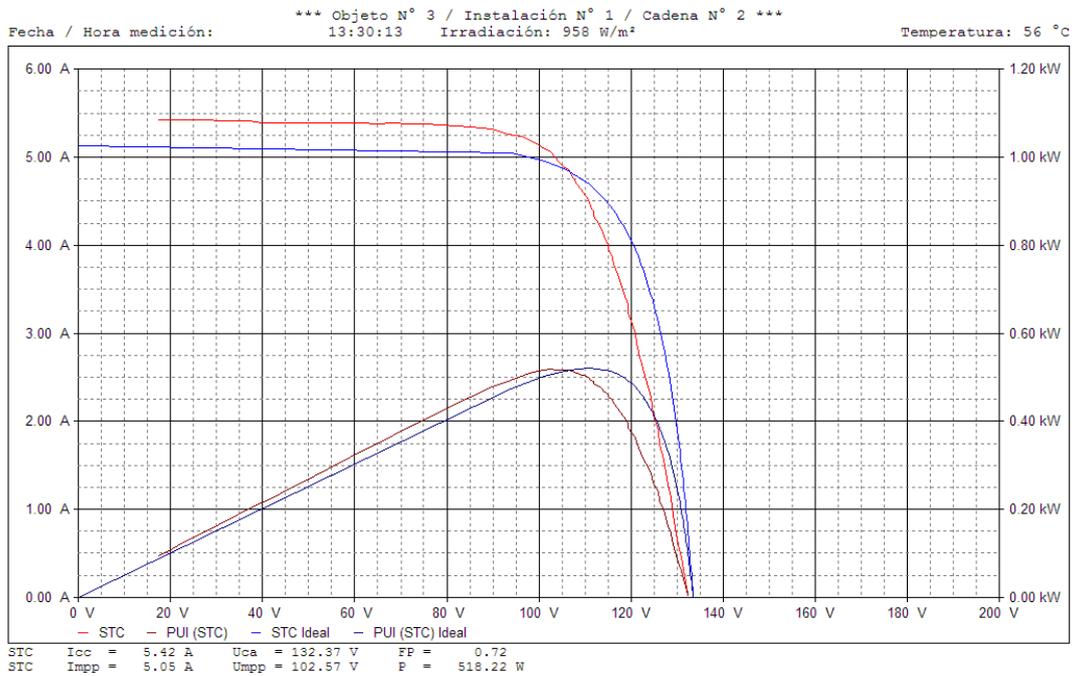


Figura (3.10) Curva I-V módulos 1, 2 y 3

Como se observa de la gráfica anterior, el valor de tensión en circuito abierto es de 132,37 V mientras que el valor obtenido mediante foto-flash es de 133,46 V. En lo que a corriente de cortocircuito se refiere el valor obtenido de la gráfica es de 5,42 A por los 5,12 A del valor según foto-flash.

3.2.6. Curva I-V de los módulos 1, 2, 3 y 4

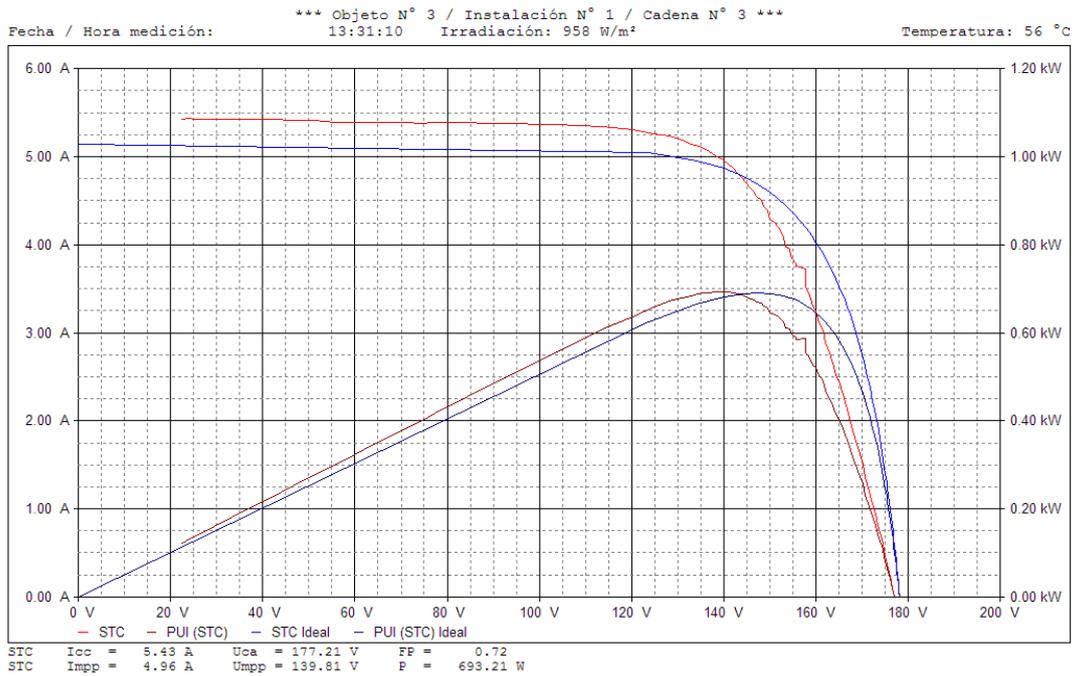


Figura (3.11) Curva I-V módulos 1, 2, 3 y 4

De los datos según foto-flash se obtiene una tensión en circuito abierto de 178,17 V y una corriente de cortocircuito de 5,12 A mientras que los valores obtenidos de la realización de la curva I-V son de 177,21 V y 5,43 A.

3.2.7. Curva I-V de los módulos 1, 2, 3, 4 y 5

La tensión en circuito abierto del conjunto de los cinco módulos conectados en serie según foto-flash es de 223,06 V mientras que la corriente en cortocircuito sigue siendo 5,12 A.

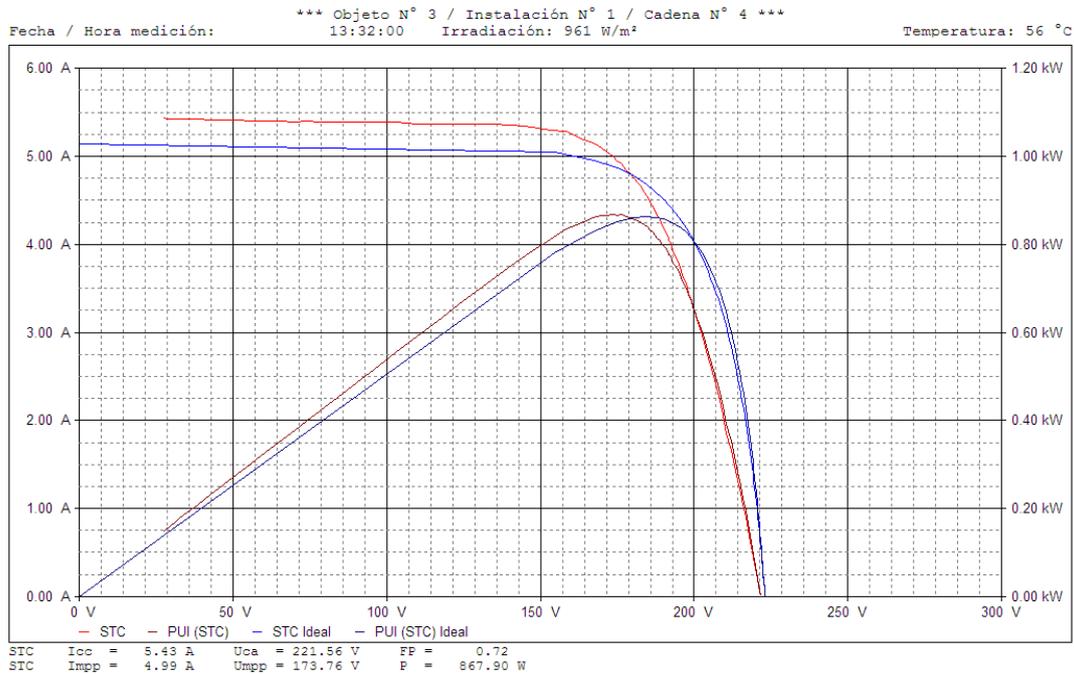


Figura (3.12) Curva I-V módulos 1, 2, 3, 4 y 5

Se observan de la figura anterior que la tensión en circuito abierto es de 221,56 V y la corriente de cortocircuito es de 5,43 A.

3.2.8. Curva I-V de los módulos 1, 2, 3, 4, 5 y 6

Se observa de la Tabla (3.4) que los valores de tensión en circuito abierto de los seis módulos es de 267,84 V y la corriente de cortocircuito es de 5,12 A, debido a que el módulo con menor corriente de cortocircuito tiene esta misma corriente.

De la siguiente figura donde se observa la curva I-V para los seis módulos conectados en serie se obtiene una tensión en circuito abierto de 266,57 V mientras que la corriente de cortocircuito es de 5,44 A.

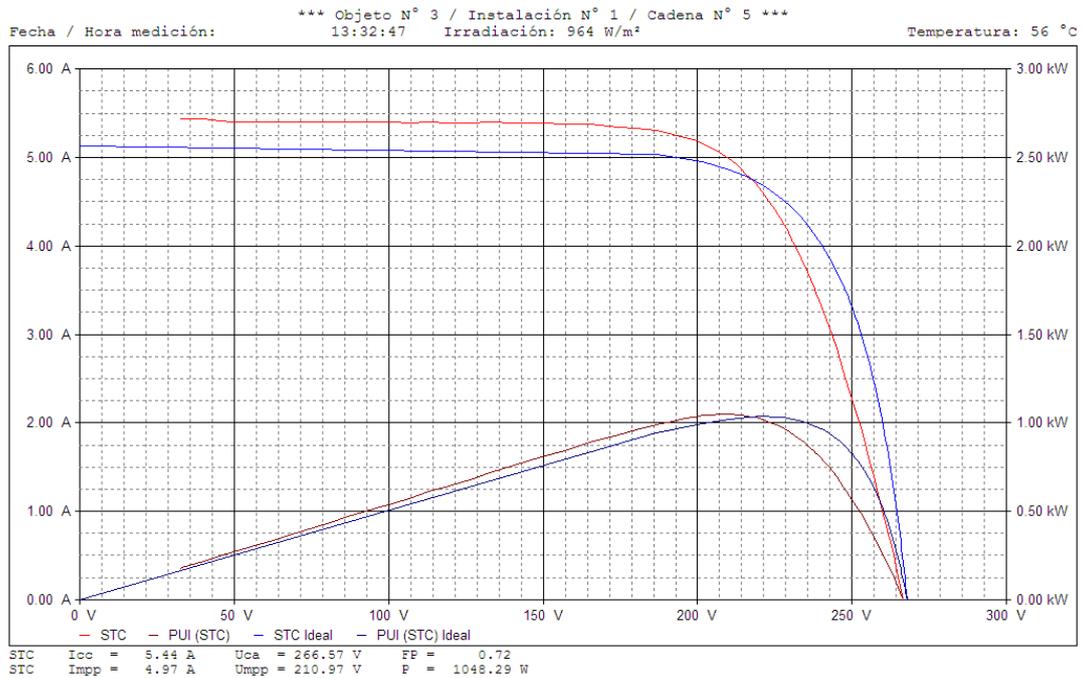


Figura (3.13) Curva I-V módulos 1, 2, 3, 4, 5 y 6

Como conclusión de las curvas I-V obtenidas a las distintas cadenas de módulos se concluye que los valores de tensión en circuito abierto son muy parecidos mientras que los valores de corriente de cortocircuito tienen diferencias significativas.

Cabe destacar que existe una diferencia considerable en las condiciones de obtener los dos valores ya que los valores obtenidos según foto-flash son muy próximos a las condiciones estándar de medida (1 000 W/m² de radiación y 25°C de temperatura del panel fotovoltaico) mientras que los valores meteorológicos en el momento de realizar la curva I-V son los detallados en cada una de las figuras anteriores con valores medios de 962 W/m² y una temperatura de panel de 56°C.

Por lo tanto, existe una diferencia considerable en la temperatura de panel.

3.2.9. Curvas I-V de módulos fotovoltaicos con diversas sombras

En este apartado, del mismo modo que se ha realizado en el anterior, se van a obtener las curvas I-V de diferentes módulos con variedad de sombras y se van a comparar en cada caso los valores de tensión y corriente en el punto de máxima potencia.

3.2.9.1. Caso 1: Tres módulos con la primera hilera de células con sombra

Para este caso se han tenido en cuenta tres módulos conectados en serie y una sombra que tapa la primera hilera de células de los tres módulos tal y como se muestra en siguiente figura.

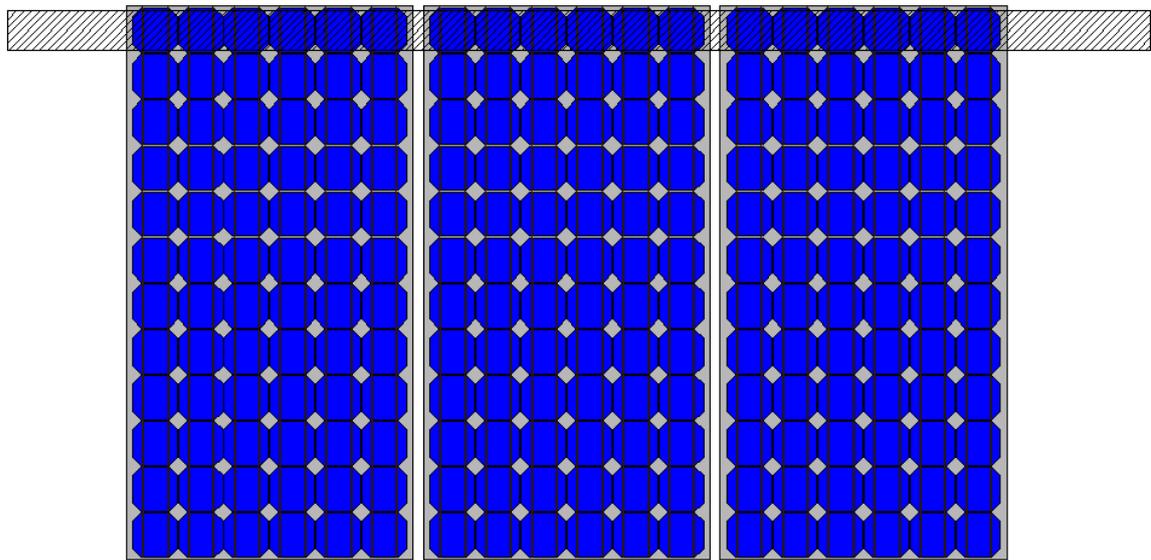


Figura (3.14) Sombra primera hilera horizontal en los tres módulos

Para aplicar artificialmente esta sombra sobre la hilera de módulos se ha utilizado un conjunto de tubos de PVC sosteniéndolos encima de las células.

Con ayuda de los dos instrumentos de medida (TRIKA y TRISEN) se ha obtenido la curva I-V que se muestra a continuación.

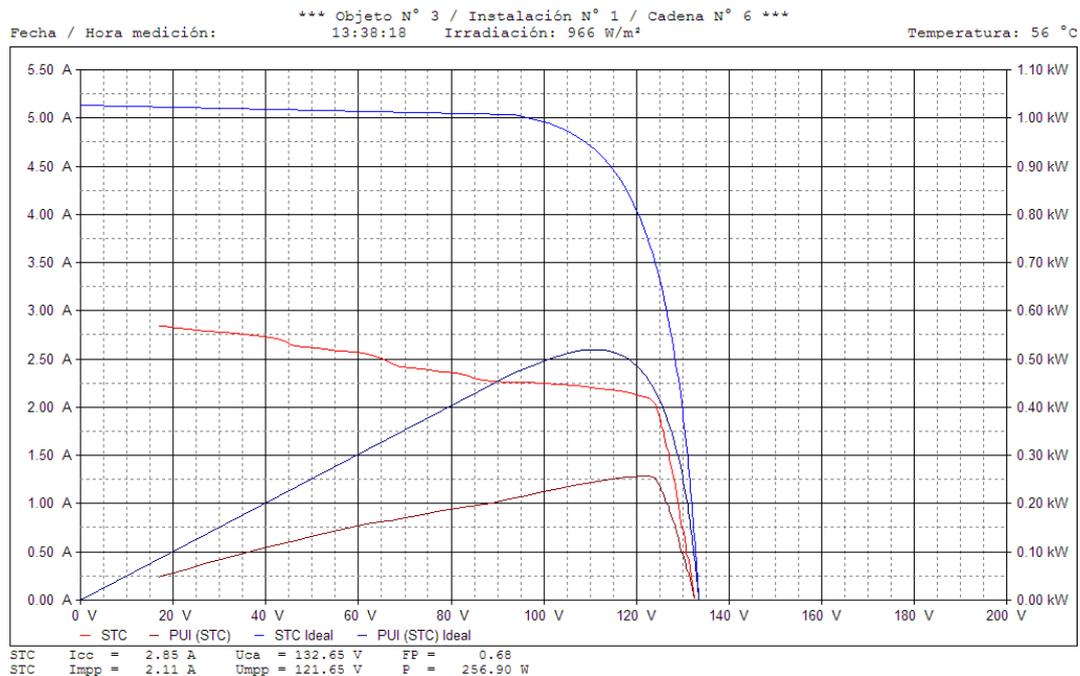


Figura (3.15) Curva I-V de la sombra en la primera hilera horizontal en los tres módulos

Comparando las curvas I-V anteriores y comparándolas con las curvas del apartado () donde se medían los mismos parámetros en condiciones sin sombras se observa que las diferencias más importantes vienen dadas por la corriente eléctrica y que se observa que la tensión no varía excesivamente.

Como se ha comentado en el estudio del comportamiento de las células fotovoltaicas cuando una célula recibe menor radiación su corriente también disminuye.

Cabe destacar que estos módulos tienen las células formando tres cadenas de 24 células conectadas en serie y la distribución de estas cadenas es en forma de tres "U" cuando el módulo está apoyado con el lado corto en el suelo. Por lo tanto, todas las cadenas de estos tres módulos conectados en serie tienen un porcentaje de sombras.

Teniendo en cuenta que todos los módulos tienen la misma sombra se puede observar en la gráfica que la corriente se ve afectada en todos los módulos por igual por lo que se ve considerablemente afectada respecto la curva I-V de estos tres mismos módulos sin sombras.

3.2.9.2. Caso 2: Tres módulos con sombra en la cuarta hilera de células

Habiendo realizado y analizado el caso 1 se realiza un caso muy parecido al anterior pero en lugar de sombrear la primera hilera de células se tapan las células de la cuarta hilera quedando como se observa en la siguiente figura.

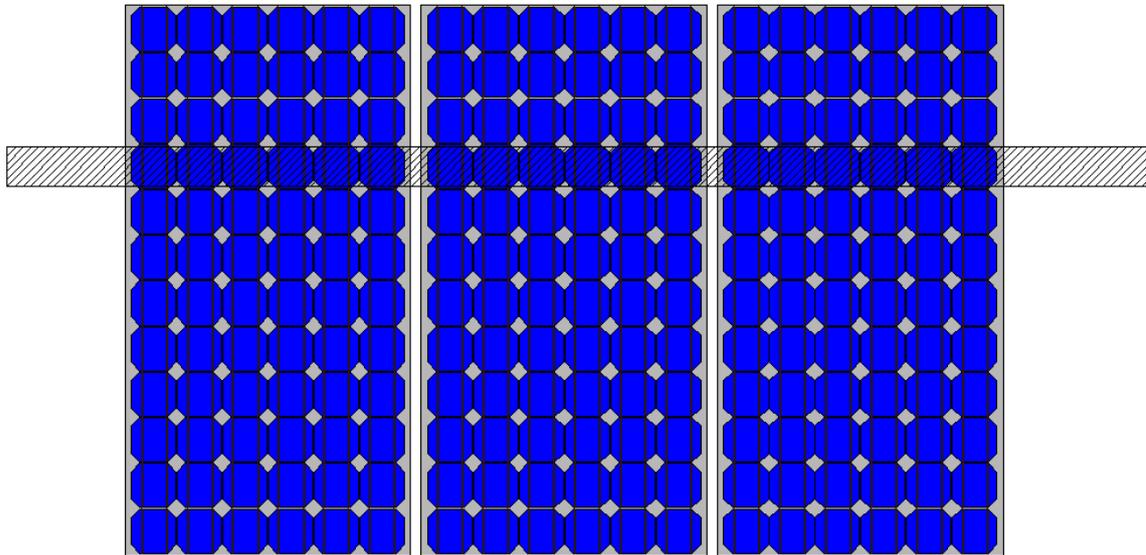


Figura (3.16) Sombra cuarta hilera horizontal de los tres módulos

Como se ha realizado en el caso anterior, se obtiene para estas características la curva I-V de los tres módulos conectados en serie.

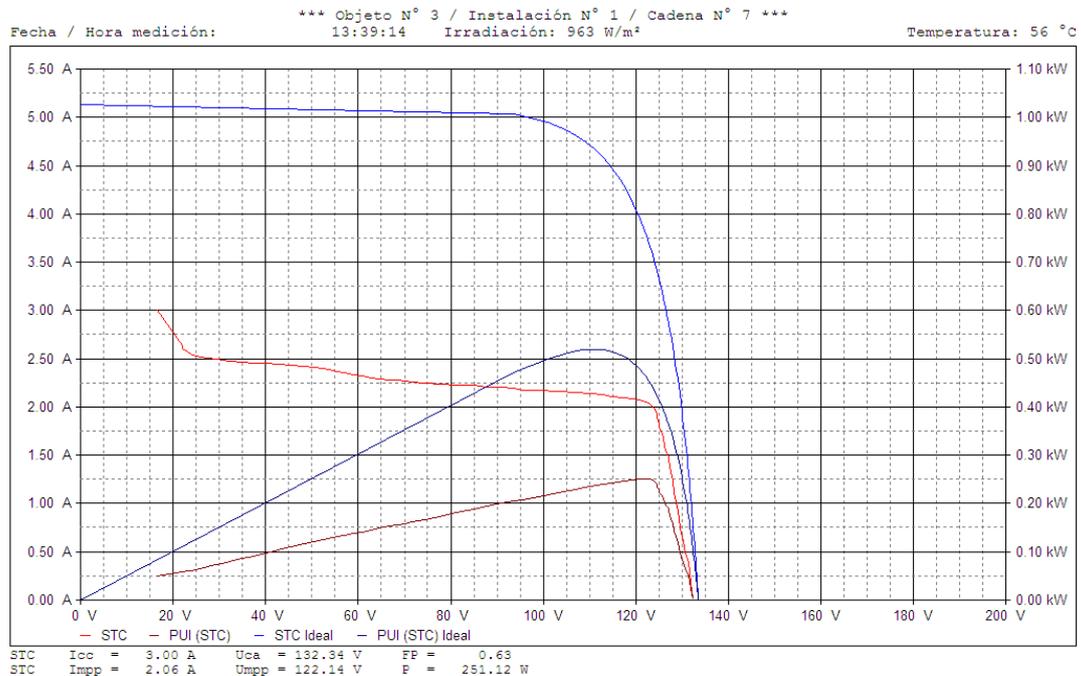


Figura (3.17) Curva I-V de la sombra horizontal en la cuarta hilera de los tres módulos

Para este caso, igual que para el caso anterior, el tener una sombra horizontal cuando los módulos están colocados verticalmente, entendiendo esta posición como ya se ha comentado con el lado corto de módulo en la base, cada una de las tres cadenas de células que tiene un módulo se encuentra repercutida por sombra por lo que la corriente se ve disminuida considerablemente tal y como se observa en la curva I-V.

Cabe destacar que no se observa diferencia alguna entre que la sombra sea horizontal tapando la primera hilera de células o tapando la cuarta hilera. Tiene sentido ya que en los dos casos se tapan la misma cantidad de células solares.

3.2.9.3.Caso 3: Tres módulos con la primera columna del primer módulo con sombra.

Habiendo comprobado mediante los dos casos anteriores que si una sombra horizontal repercute en un módulo vertical se ve disminuida considerablemente la corriente. Por lo tanto en este caso se plantea el comportamiento de un conjunto de tres módulos conectados en serie teniendo sombra únicamente la primera columna del primer módulo.

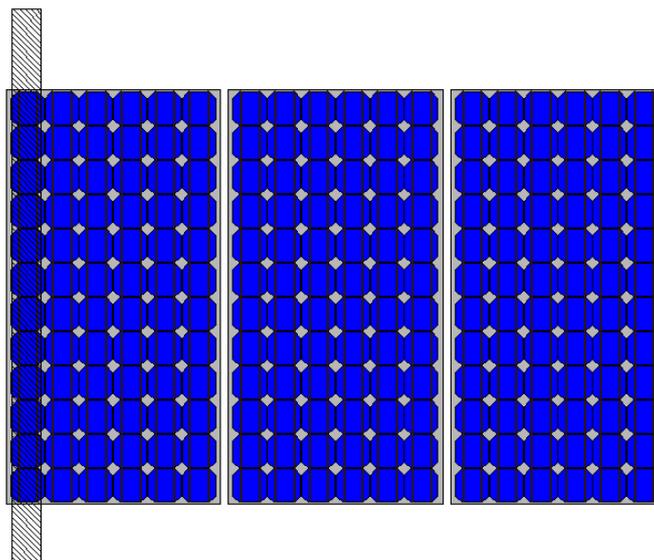


Figura (3.18) Sombra vertical de la primera columna del primer módulo

Por lo tanto, teniendo en cuenta las conexiones internas de los módulos se puede decir que esta sombra únicamente repercute a una cadena de células del primer módulo. Para ello vamos a obtener mediante los dos componentes de medida la curva I-V del conjunto de los tres módulos.

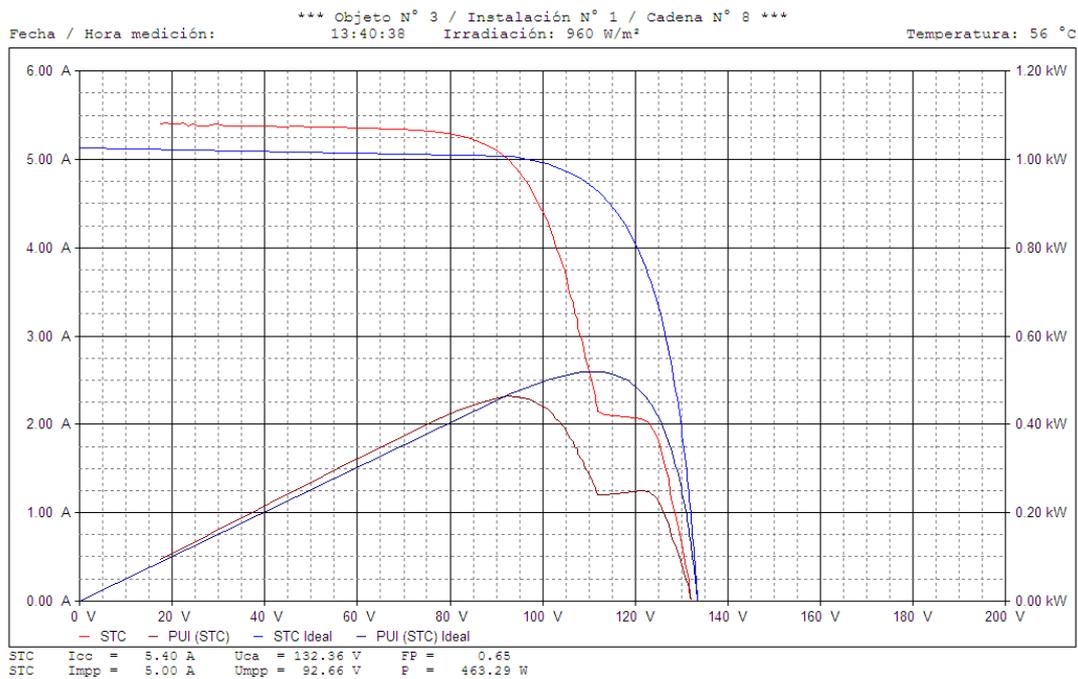


Figura (3.19) Curva I-V de la sombra vertical de la primera columna del primer módulo

De la figura anterior se destaca, siguiendo con los casos anteriores, que la corriente se ve mermada debido a la sombra en una parte de módulo pero a diferencia de los otros casos la sombra no decae de forma general sino de forma parcial. Este resultado se debe a que la sombra solamente ha afectado a una parte de un módulo por lo que la corriente se mantiene con valores medio altos.

Este resultado, nos justifica lo comentado anteriormente respecto a la colocación de los módulos fotovoltaicos. Por su conexión interna de células fotovoltaicas los módulos para sombras horizontales, como por ejemplo las ocasionadas por módulos cuando la inclinación del sol es baja, es mejor colocarlos con el lado largo en la base. De este modo el módulo queda dividido en tres partes, las tres cadenas de células, disminuyendo las posibles pérdidas por sombreado.

3.2.9.4. Caso 4: Tres módulos con sombra en una hilera del primer módulo

Como se puede observar en la siguiente figura, para este caso se tapa un hilera del primer módulo. Con este caso se quiere comprobar la diferencia de comportamiento de los dos módulos sin sombra.

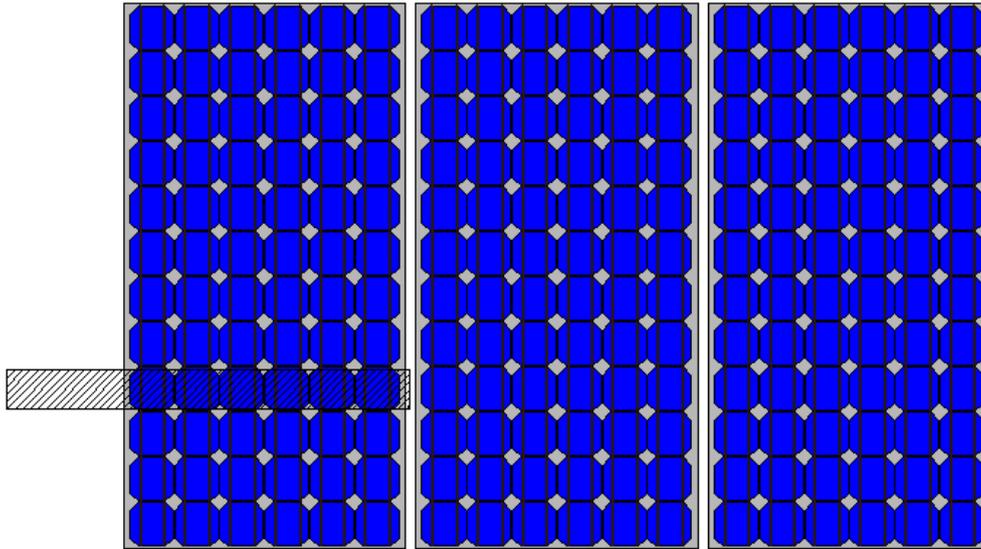


Figura (3.20) Sombra horizontal de una hilera del primer módulo

Para poder valorar los resultados obtenidos la siguiente figura muestra la curva I-V obtenida.

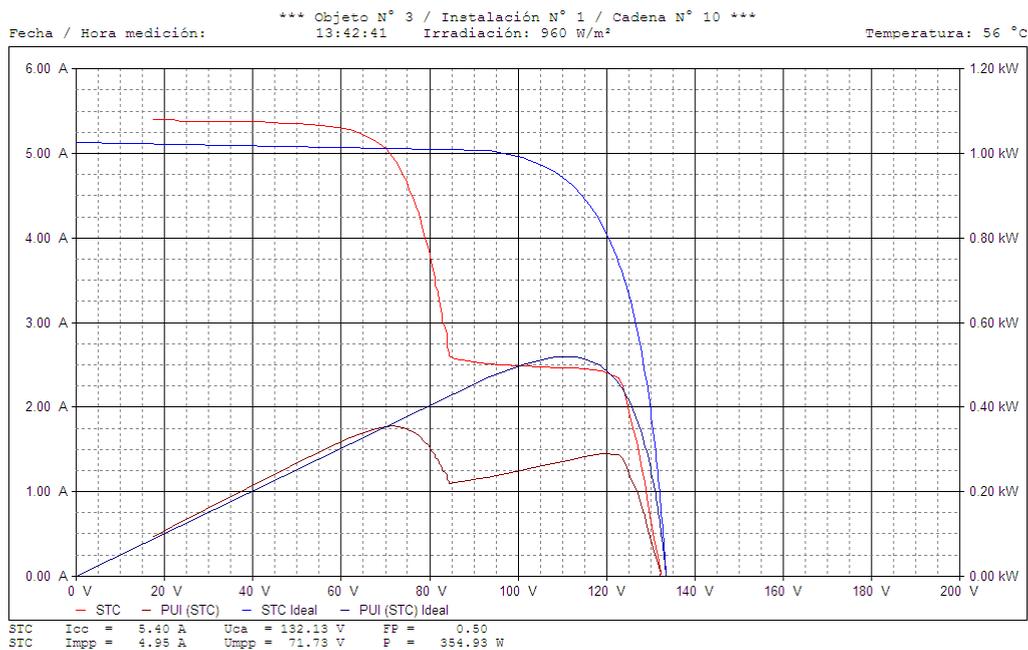


Figura (3.21) Curva I-V de la sombra horizontal del primer módulo

Si valoramos los resultados obtenidos con los del caso 1 o 2 se puede observar la importante diferencia para tensiones bajas. Este resultado es acorde a lo que se buscaba ya que los otros dos módulos no tienen sombra por lo que la corriente tiene los valores del comportamiento normal mientras que el módulo tapado se comporta como si se trata del conjunto de módulos de los casos 1 ó 2.

Para esta sombra, las pérdidas hubiesen sido menores si la colocación de los módulos hubiese sido horizontal.

3.2.9.5.Caso 5: Tres módulos con sombra horizontal en dos módulos

Siguiendo con el caso anterior se alarga la sombra hasta el segundo módulo tal y como se observa en la siguiente figura.

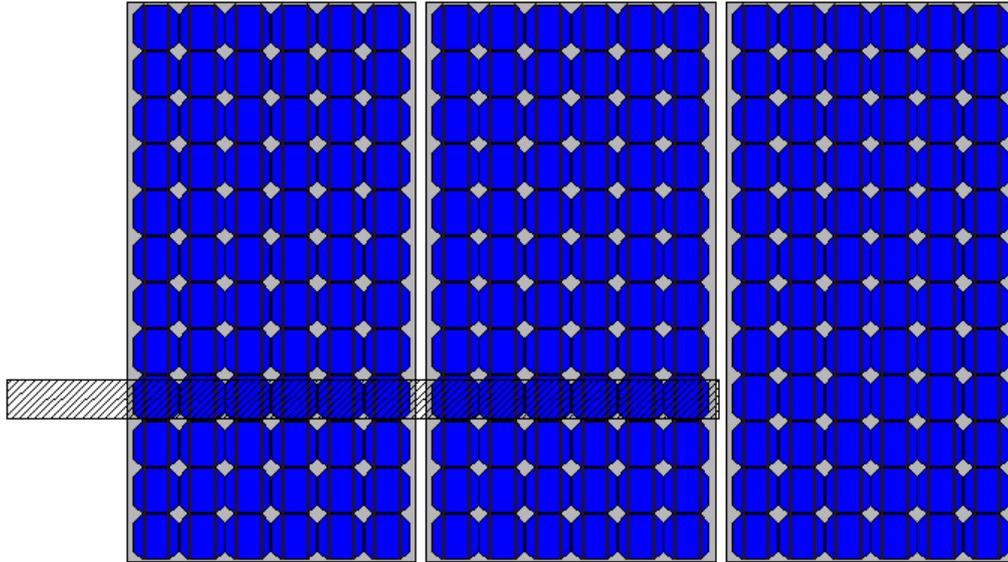


Figura (3.22) Sombra horizontal de dos módulos

Comprobando la sombra se realiza las mediciones necesarias para obtener la siguiente figura donde se observa la gráfica I-V.

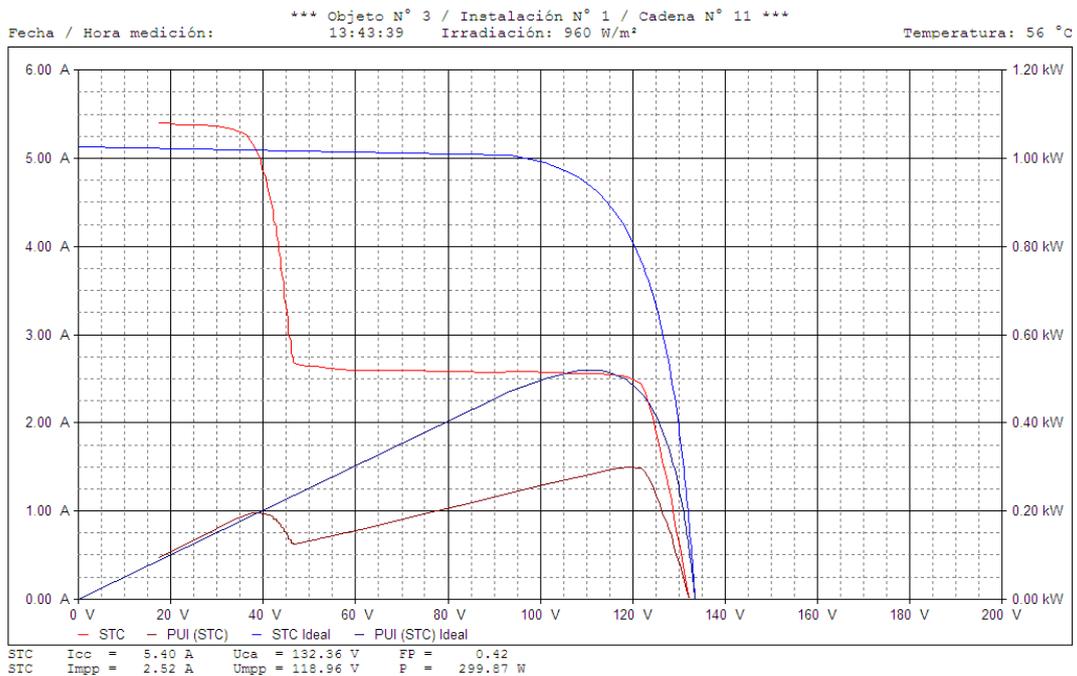


Figura (3.23) Curva I-V de la sombra horizontal de dos módulos

Se puede apreciar que al haber tapado algunas células de dos módulos, la corriente se ve afectada en un rango de tensión más amplio. Se observa como desde los 45 voltios aproximadamente hasta el punto de máxima potencia la corriente se me mermada.

Se puede observar la diferencia con el caso anterior donde únicamente se tapaba un módulo y el rango de tensión donde la corriente era inferior era desde los 85 voltios hasta el punto de máxima potencia. Por lo tanto, el hecho de tapar más módulos o menos tiene reflejado un resultado en que la corriente se mantiene más tiempo o menos con valores inferiores.

3.2.9.6. Caso 6: Tres módulos con sombras verticales de diferente longitud en dos módulos

Habiendo realizado los casos anteriores con una única sombra horizontal o vertical se va a realizar un caso donde en el primer módulo se tapa una columna entera de células y para el segundo módulo únicamente se tapan 3 células en vertical tal y como se observa en la siguiente figura.

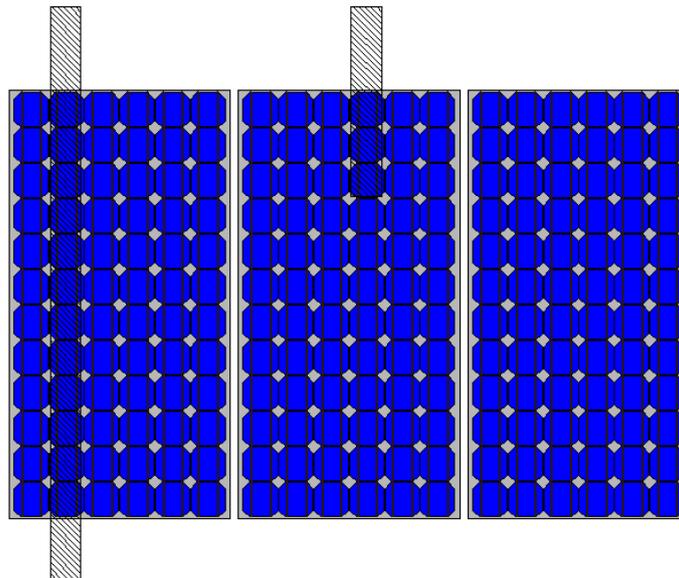


Figura (3.24) Sombras verticales en dos módulos

Teniendo en cuenta que estas dos sombras afectan a dos cadenas de células de módulos diferentes el comportamiento debe ser diferente a los anteriores tal y como se observa en la figura siguiente.

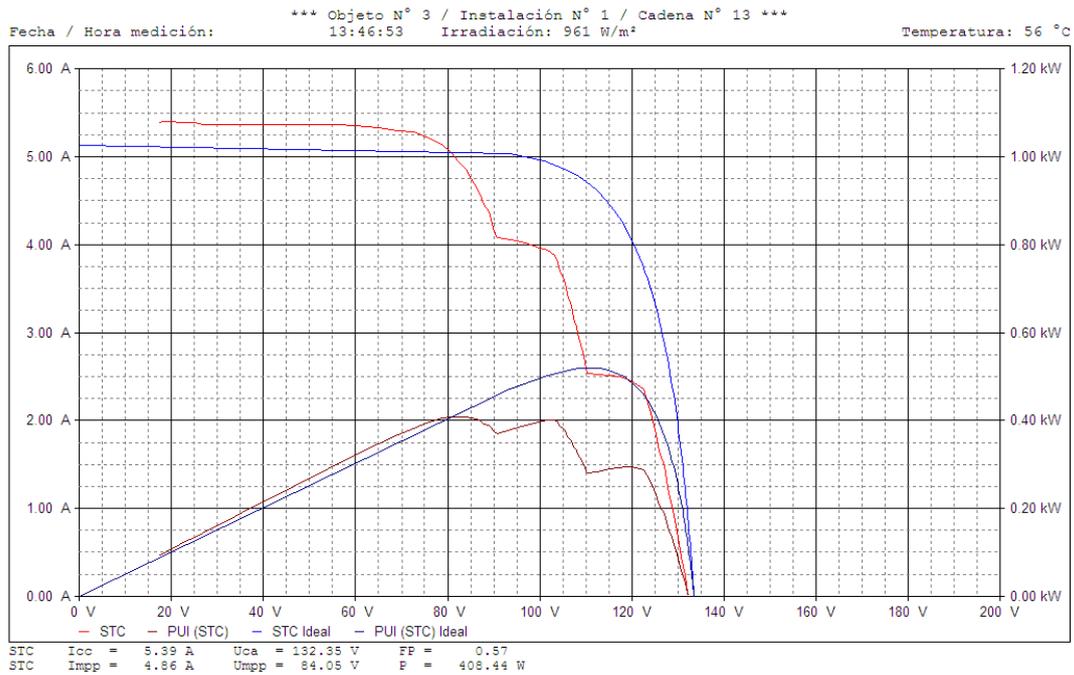


Figura (3.25) Curva I-V de dos sombras verticales en módulos diferentes

De la curva I-V con las características detalladas se observa como el comportamiento del conjunto de los tres módulos es escalonado, se detectan dos niveles diferentes de corriente. Este resultado viene dado ya que la sombra afecta a una cadena de células de cada uno de los módulos y sigue teniendo unos valores de corriente importantes.

3.2.9.7. Caso 7: Tres módulos con sombra oblicua en el primer módulo

Para este caso se ha aplicado una sombra oblicua sobre el primero de los tres módulos. Esta sombra es parecida a la ocasionada por el pararrayos en la instalación de VICSAN estudiada en la memoria.

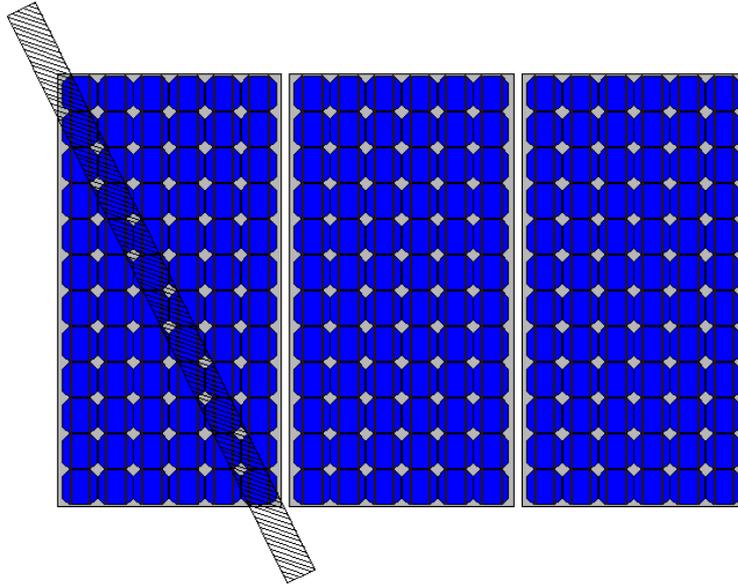


Figura (3.26) Sombra oblicua en el primer módulo

Este sombreado ocasiona sombra a distintas células de diferentes cadenas del primer módulo comportándose como se observa el siguiente curva I-V.

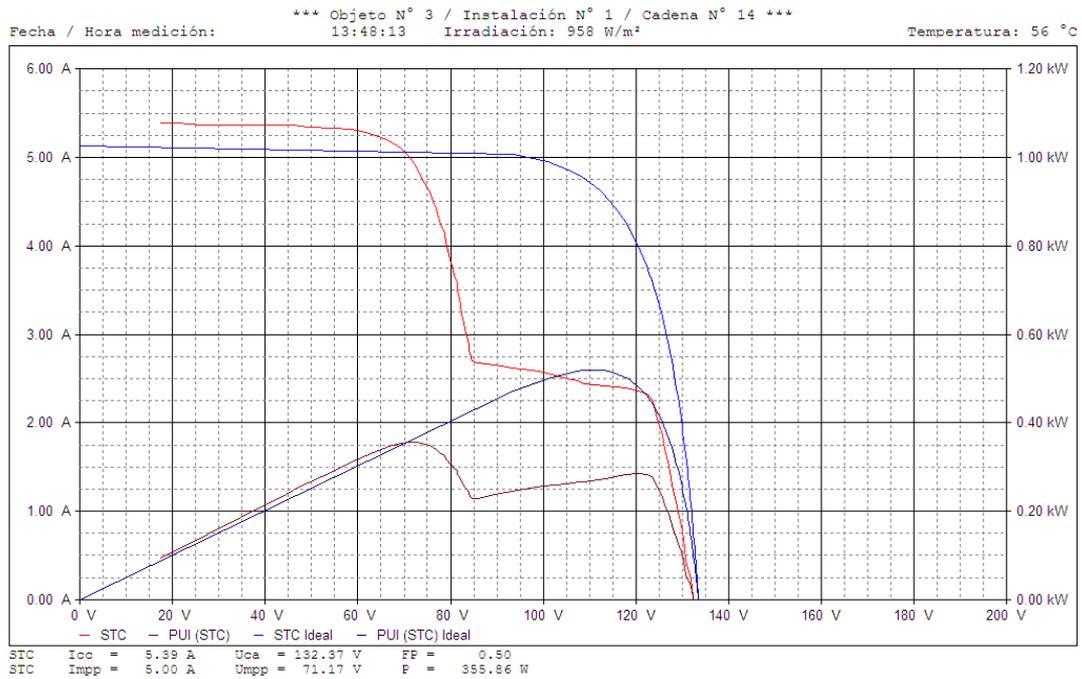


Figura (3.27) Curva I-V de la sombra oblicua del primer módulo

Se observa de la figura anterior que el comportamiento de estos tres módulos es muy parecido al caso 4 donde hay una sombra horizontal únicamente en el primer módulo.

El valor de corriente disminuye de manera importante a partir de los 65 voltios manteniéndose constante. Esto nos indica que únicamente hay un módulo que se comporta de manera irregular debido a la sombra.

3.2.9.8. Caso 8: Tres módulos con sombra oblicua en dos módulos

Habiendo realizado el caso anterior donde se observaba una sombra oblicua en el primer módulo, en este caso se realiza la misma sombra pero en dos módulos.

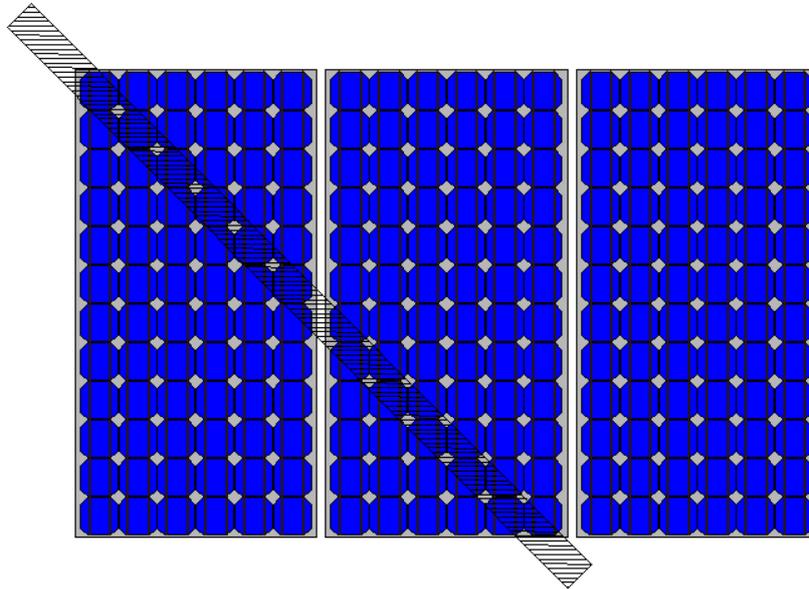


Figura (3.28) Sombra oblicua en dos módulos

Teniendo en cuenta la sombra horizontal en dos módulos que se ha realizado en caso 5 se espera una curva I-V parecida.

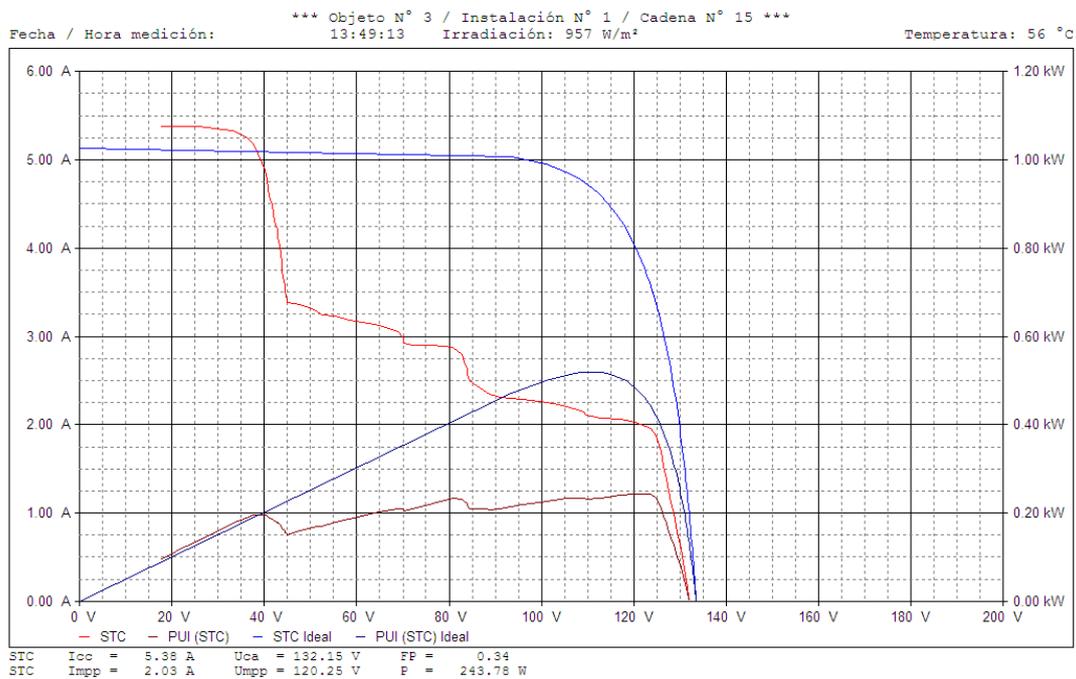


Figura (3.29) Curva I-V de la sombra oblicua de dos módulos

Se observa en la figura anterior que la curva I-V no es tan parecida con la del caso 5 sobre todo debido a que la que corriente no se mantiene con valores similares. Este motivo puede ser debido a que no todas las cadenas de células tienen la misma cantidad de sombra. Se observa que el resultado obtenido tiene cierta concordancia a la sombra ocasionada ya que hay dos módulos con sombra y uno sin por lo que se observa una disminución de corriente desde los 45 voltios hasta los 120 voltios.

3.2.9.9.Caso 9: Tres módulos con sombra en una célula del primer módulo

Habiendo realizado diversos casos con sombras importantes donde se ven afectadas diversas células de un mismo módulo en este caso se va a obtener la curva I-V de tres módulos conectados en serie donde en uno de ellos se observa una sombra en una única célula.

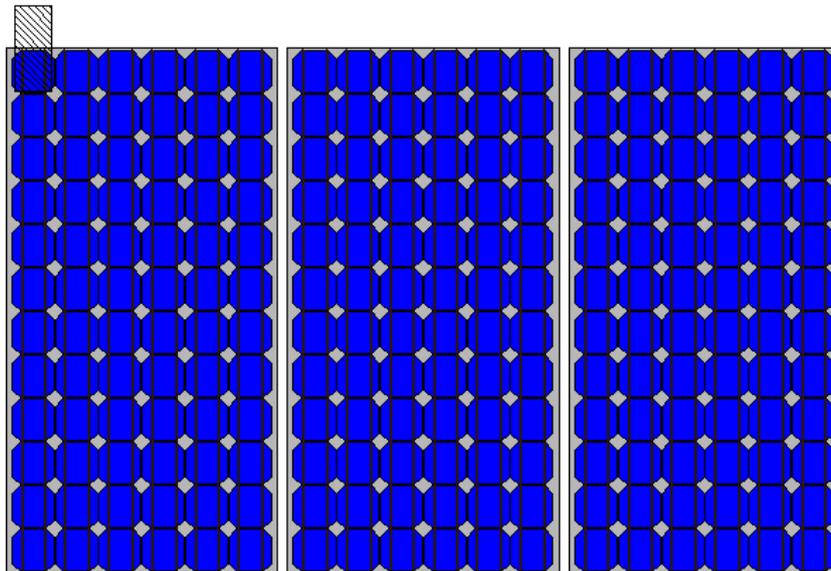


Figura (3.30) Sombra en una célula del primer módulo

Para este caso se prevé una pequeña disminución de corriente ya que ocho de las nueve cadenas no tienen sombra.

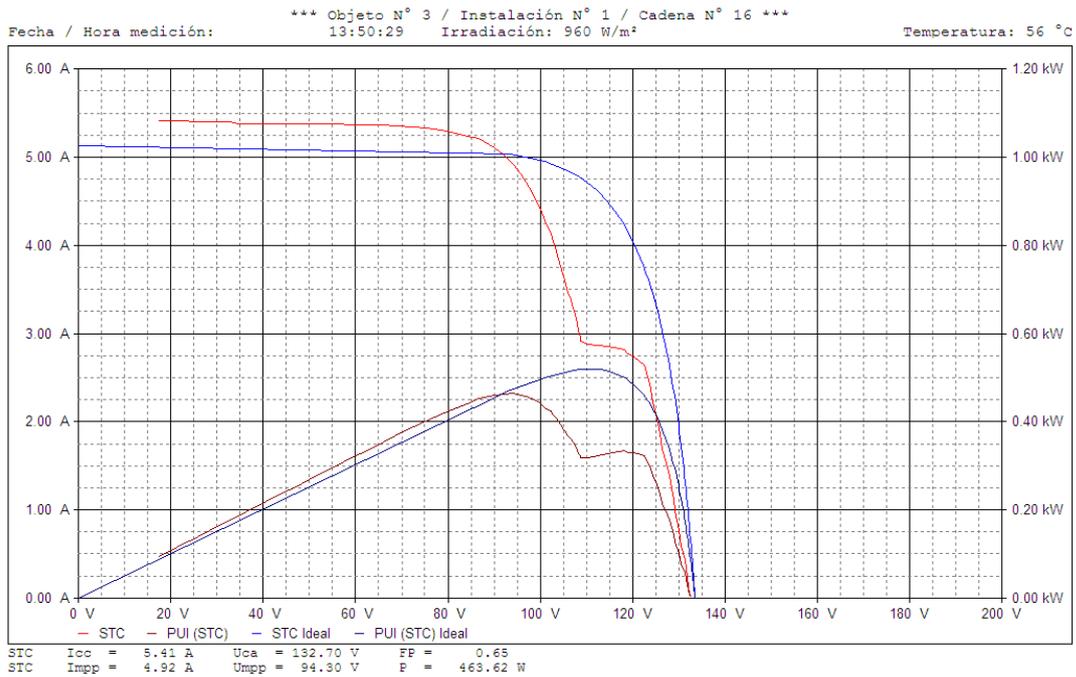


Figura (3.31) Curva I-V de la sombra de una célula del primer módulo

Como se ha predicho, la sombra en una única célula de una cadena de tres módulos repercute poco en la gráfica.

Se puede comparar este caso con las defecaciones aviares que se pueden encontrar en algunos módulos fotovoltaicos. Por lo tanto, las pérdidas ya si que pueden ser considerables. Por este, entre otros motivos, es importante realizar una limpieza anual de los módulos fotovoltaicos.

3.2.9.10. Caso 10: Tres módulos con sombra en una célula del primer y tercer módulo

Habiendo observado el comportamiento de tres módulos conectados en serie con una pequeña sombra en una célula de uno de los tres módulos, se va a realizar para este caso dos sombras en dos células de diferente módulo.

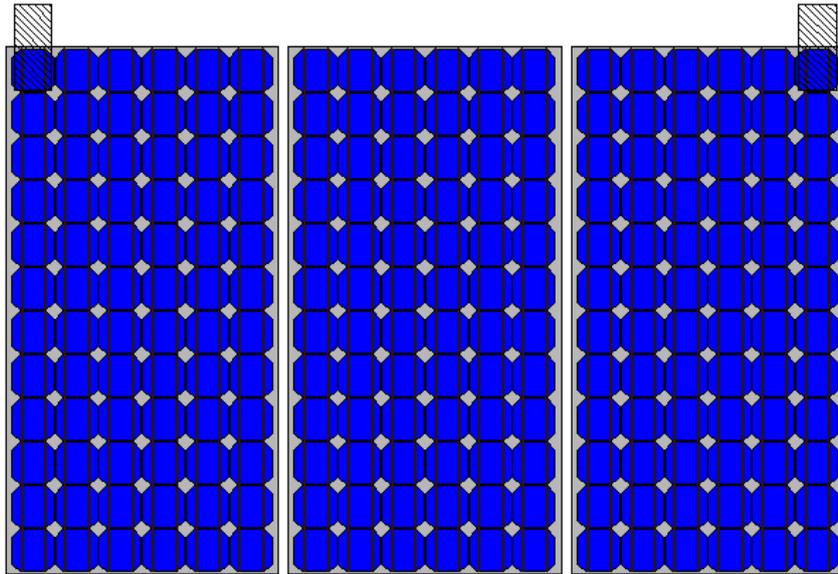


Figura (3.32) Sombra de una célula de dos módulos

Por lo tanto, teniendo dos pequeñas sombras la curva I-V es la que se muestra a continuación.



Figura (3.33) Curva I-V de la sombra de dos células de módulos diferentes

Se puede observar como la repercusión de la segunda sombra, en relación al caso anterior, es importante. La corriente disminuye en los 100 voltios.

3.2.9.11. Caso 11: Un módulo con la sombra de una persona

Habiendo realizado el estudio de sombras en los tres módulos fotovoltaicos se realiza un caso donde solamente hay un módulo fotovoltaico y la sombra es la ocasionada por una persona que se encuentra cerca del módulo fotovoltaico.

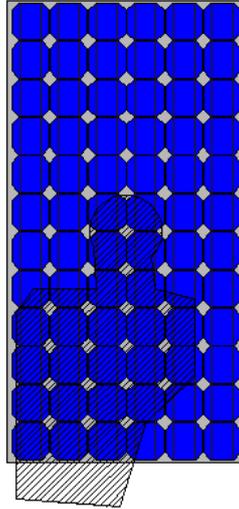


Figura (3.34) Sombra de una persona proyectada en el módulo

Se observa que la sombra no es regular y afecta a las tres cadenas de células del módulo por lo que la curva I-V tendrá resultados nada parecidos a todos los anteriores.

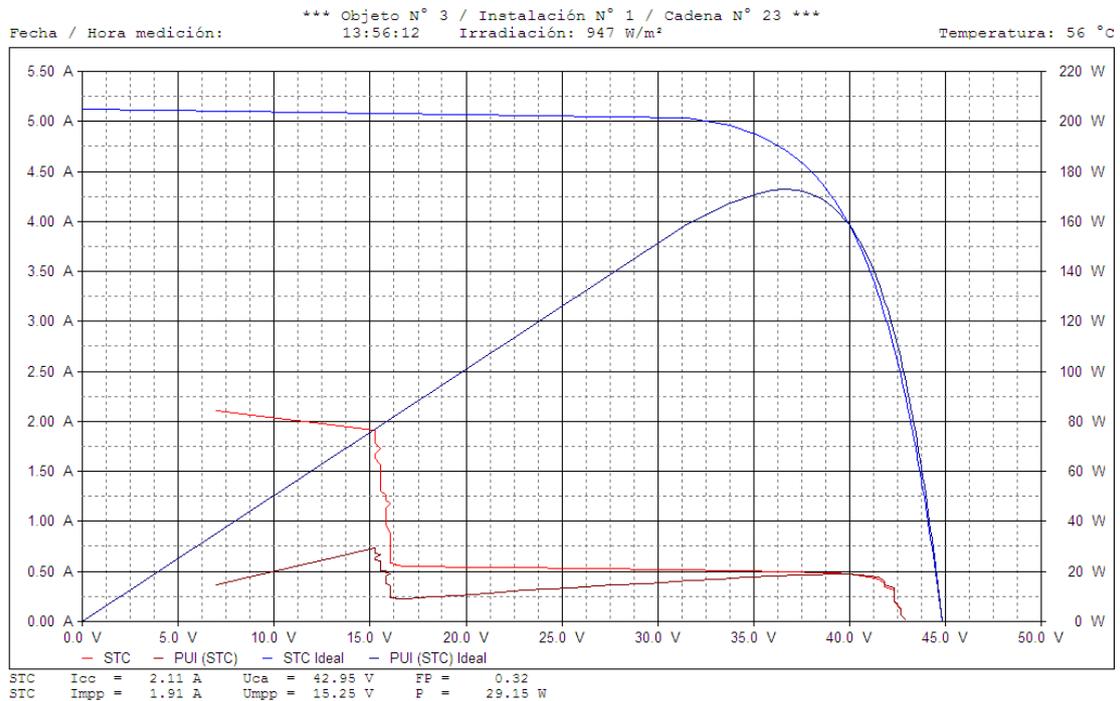


Figura (3.35) Curva I-V de la sombra de una persona

Se observa en la curva I-V que la corriente es muy baja debido a la gran cantidad de sombra que se encuentra el módulo. Cabe destacar que en los anteriores casos

cuando había una sombra en un único módulo, los otros dos producían correctamente, lo que mejoraba la gráfica.

3.2.10. Conclusiones

Habiendo realizado un estudio sobre el comportamiento de diferentes módulos en función de la sombra a la que están sometidos se obtiene la siguiente tabla donde se detalla para cada uno de los casos los valores de corriente, tensión, potencia y factor de potencia pudiendo compararlos con los valores sin sombra extraídos de la curva I-V de los módulos 1, 2 y 3 del apartado ()

	Sin sombras	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10
Tensión Pmpp	102,57	121,65	122,14	92,66	71,73	118,96	84,05	71,17	120,25	94,30	81,22
Corriente Pmpp	5,05	2,11	2,06	5,00	4,95	2,52	4,86	5,00	2,03	4,92	5,04
Tensión Vco	132,37	132,65	132,34	132,36	132,13	132,36	132,35	132,37	132,15	132,70	132,72
Corriente Isc	5,42	2,85	3,00	5,40	5,40	5,40	5,39	5,39	5,38	5,41	5,41
Potencia	518,22	256,90	251,12	463,29	354,93	299,87	408,44	355,86	243,78	463,62	409,06
FP	0,72	0,68	0,63	0,65	0,50	0,42	0,57	0,50	0,34	0,65	0,57

Tabla (3.5) Resumen de los valores obtenidos en los casos estudiados

De la tabla anterior, por lo tanto de los casos realizados, se observa que cuando la sombra que afecta a los módulos es horizontal y por lo tanto no solamente afecta a una cadena de células sino a más de una la corriente que circula por el módulo es aproximadamente la mitad que en el caso que no hubiese sombra. Este descenso de corriente afecta directamente a la potencia que da el módulo que se ve reducida aproximadamente a la mitad. Esta reducción de potencia, proporcional a la corriente, indica tal y como muestra la tabla anterior, que la tensión no se ve afectada a grandes rasgos.

Para poder comparar y extraer los mejores casos se realizan las siguientes gráficas donde se observan diversos parámetros comparados con los valores sin sombra.

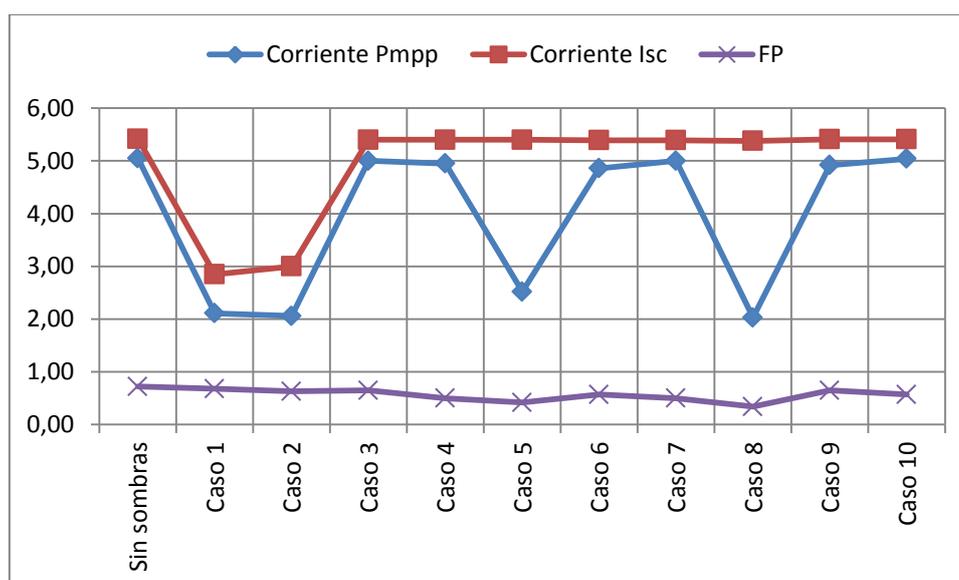


Figura (3.36) Gráfica comparativo de corrientes y factor de potencia

Se puede observar como en los casos 1, 2, 5 y 8 la corriente en el punto de máxima potencia a disminuido mucho mientras que las corrientes de cortocircuito se mantienen excepto en los casos 1 y 2.

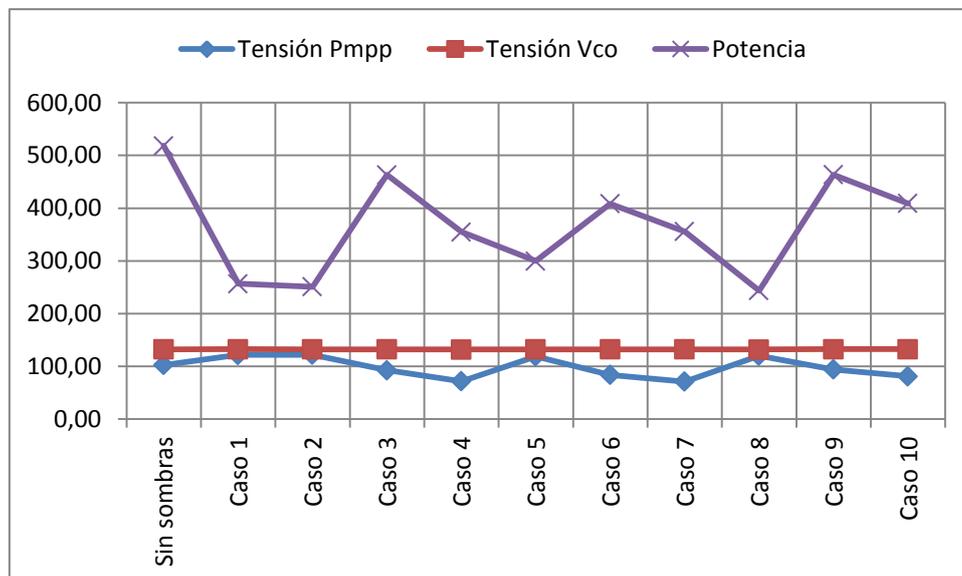


Figura (3.37) Gráfica comparativo de tensiones y potencia

Se puede observar que la potencia no tiene para ningún caso valores cercanos al obtenido cuando no hay sombras. Además se observa que la tensión en circuito abierto se mantiene constante mientras que la tensión en el punto de máxima potencia tiene valores dispares, aunque todos ellos inversamente proporcionales a los valores de potencia.

Por lo tanto, habiendo realizado un estudio con módulos colocados en una instalación fotovoltaica se puede llegar a la conclusión que las sombras en los módulos afectan muy negativamente en la producción. Es muy importante realizar un diseño de la instalación lo más preciso posible ya que si no, la producción se verá afectada igual que el estado de los módulos.



Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

4. Anexo2: Configuración de los diodos de bypass

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

Setiembre 2012

Índice Anexo 2

4. ANEXO2: CONFIGURACIÓN DE LOS DIODOS DE BYPASS	65
4.1. INFLUENCIA DE LAS SOMBRAS SEGÚN LA CONFIGURACIÓN DE LOS DIODOS DE BYPASS	67
4.1.1. <i>Resumen</i>	67
4.1.2. <i>Introducción</i>	67
4.1.3. <i>Desarrollo</i>	68
4.1.4. <i>Conclusiones</i>	74

4.1. Influencia de las sombras según la configuración de los diodos de bypass

4.1.1. Resumen

Como hemos visto, la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico se ve afectada por las sombras, dependiendo del área sombreada y la radiación recibida en dicha área.

Otro factor importante que determina la afectación de las sombras en el módulo fotovoltaico y por lo tanto la curva característica I-V es la configuración de las conexiones eléctricas entre las células y los diodos de bypass. Los diodos de bypass están instalados en los módulos para prevenir el consumo de energía cuando las células están sombreadas o dañadas, estos diodos también tienen la función de prevenir que las células no trabajen cerca de la zona de avalancha*.

**Efecto avalancha (diodos poco dopados). En polarización inversa se generan pares electrón-hueco que provocan la corriente inversa de saturación; si la tensión inversa es elevada los electrones se aceleran incrementando su energía cinética de forma que al chocar con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Estos electrones liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándolos a su vez. El resultado es una avalancha de electrones que provoca una corriente grande. Este fenómeno se produce para valores de la tensión superiores a 6 V.*

El siguiente estudio se examina el desempeño de un generador fotovoltaico. Un generador fotovoltaico consiste en módulos conectados entre sí. En particular, los diodos de bypass de superposición es analizado, mostrando que total o parcialmente, los módulos sombreados pueden consumir parte de la energía generada por otros módulos del generador fotovoltaico.

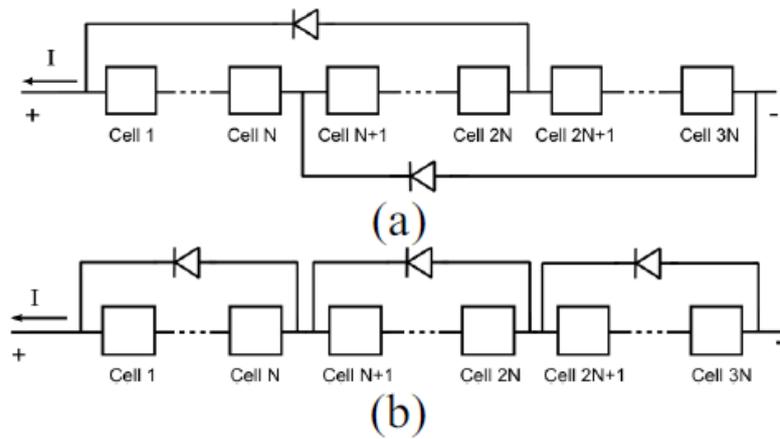
Este efecto está también presente en generadores fotovoltaicos de baja potencia. En estos casos la potencia disipada por el diodo es pequeña, pero si hay muchos, la potencia disipada por todos los diodos puede ser comparable con la energía producida por varios módulos fotovoltaicos.

4.1.2. Introducción

Una de las muchas causas de las pérdidas en la generación de energía con sistemas fotovoltaicos es el sombreado parcial en los módulos fotovoltaicos. Estos módulos están formados por células fotovoltaicas conectadas en serie o en paralelo con diodos incluidos en diferentes configuraciones.

La curva de las células varía dependiendo de la radiación recibida y de la temperatura. Además, los módulos tienen diodos que permiten que la corriente fluya a través de un camino alternativo cuando hay suficientes células sombreadas o dañadas. Hay dos configuraciones típicas de los diodos de bypass: superpuestos y no superpuestos (figura..). Cabe señalar que el análisis en módulos con diodos superpuestos es más complejo ya que puede haber diferentes caminos para el flujo de corriente.

En este caso vamos a estudiar el comportamiento individual de un módulo fotovoltaico con sombras.



Figura(4.1).Diodo de bypass superpuesto(a), No-superpuesto(b)

4.1.3. Desarrollo

4.1.3.1. Comportamiento de una célula fotovoltaica

Con el fin de analizar el comportamiento de un módulo con sombra parcial, es necesario conocer:

- La curva de las células polarizadas y polarizadas en sentido inverso.
- La curva de las células en términos de radiación.
- La curva de los diodos de bypass.

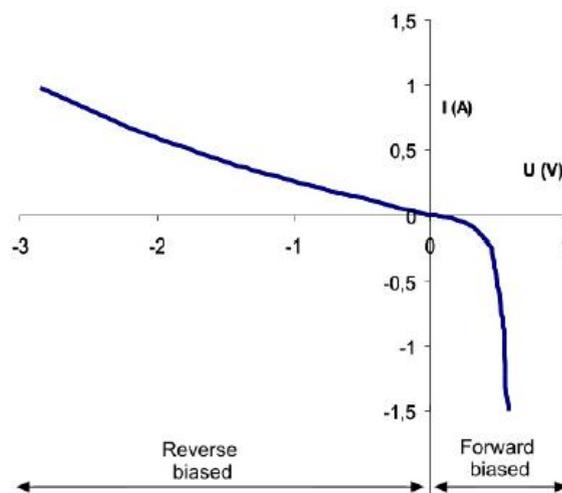


Figura (4.2). Curva de una célula fotovoltaica polarizada y polarizada en sentido inverso para una radiación de $0w/m^2$.

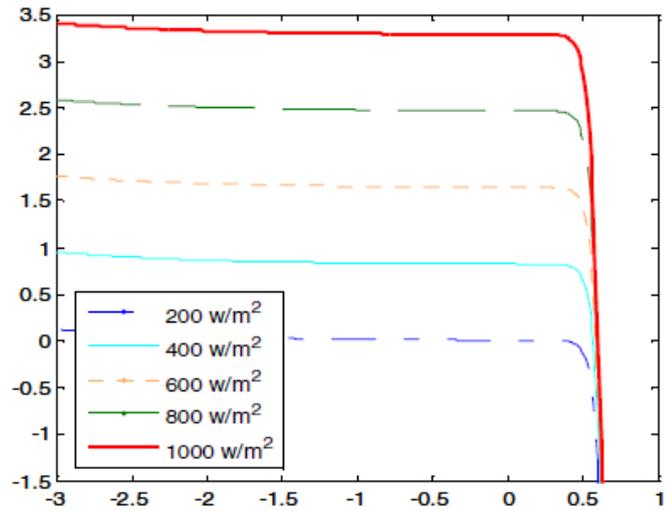


Figura (4.3). Curvas de una célula fotovoltaica para diferentes radiaciones solares.

4.1.3.2. Comportamiento de un conjunto de células fotovoltaicas

Cuando las sombras están fundidas en un módulo fotovoltaico, el comportamiento de una célula fotovoltaica en su zona inversa (voltaje negativo) debe ser tomada en consideración, puesto que las células fotovoltaicas sombreadas pueden ser polarizadas en sentido inverso. La figura () muestra que para una corriente de una celda soleada 2A tiene un voltaje de 0.55V, mientras que una celda sombrada tiene -5.5V. Si el diodo de derivación está en paralelo con 12 células fotovoltaicas conectadas en serie, y una de ellas está sombrada, la tensión del grupo será de 1.1V (figura...) y, por lo tanto, el diodo no conducirá porque está polarizado inversamente. Por el contrario, para valores de corriente superiores a 3ª, la tensión del grupo será negativa, y la corriente fluirá a través del diodo, ya que está polarizado.

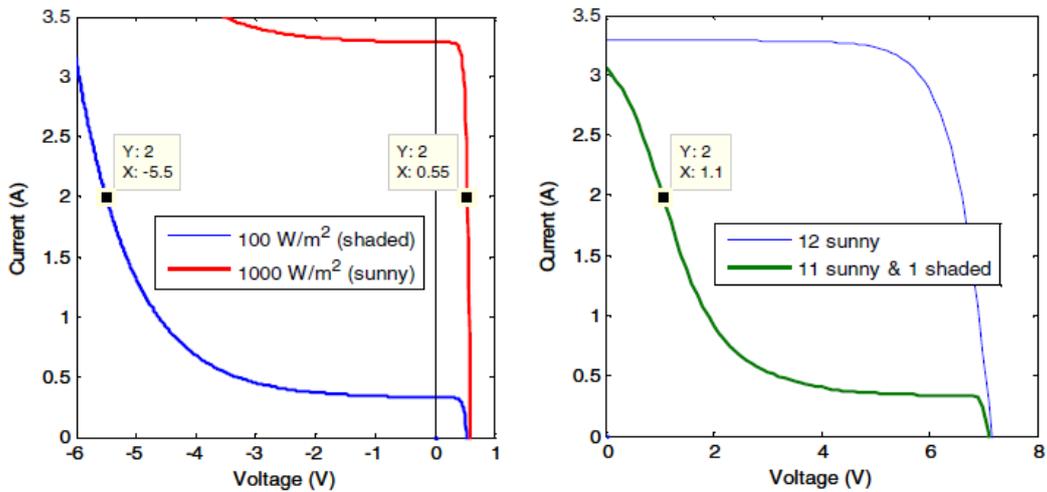


Figura (4.4). Curvas para una célula individual con sol y sombra (a) y Curva de 12 células en serie, 11 soleadas (1000W/m²) y una sombrada (100 W/m²) (b)

4.1.3.3. Comportamiento de un módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células fotovoltaicas y por diodos de bypass conectados en paralelo. La configuración de las conexiones determina la curva I-V del módulo fotovoltaico cuando este está parcialmente sombreado.

En el siguiente estudio, la composición del módulo fotovoltaico consiste en 72 células distribuidas en 6 filas compuestas por 12 células cada una, con las siguientes configuraciones:

- 1) Diodos de bypass superpuestos
- 2) Diodos de bypass no-superpuestos

4.1.3.4. Diodos de bypass superpuestos

En la primera configuración analizada, cada módulo se compone de 72 células conectadas con los diodos de bypass superpuestos (Figura...)

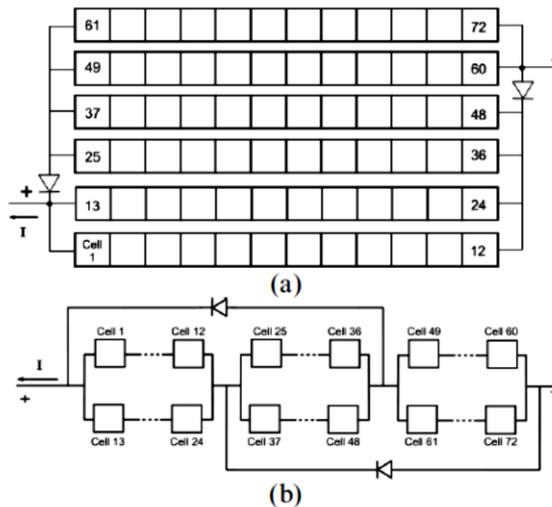


Figura (4.5). Módulo fotovoltaico (a) la distribución física (b) sistema eléctrico con diodos solapados.

Las curvas IV y PV del módulo fotovoltaico para radiaciones solares de 1000 y 100W/m² se representan en la figura(...). Cuando el módulo fotovoltaico está sombreado, su voltaje negativo en el punto de trabajo puede ser 1/3 de su voltaje de circuito abierto, y la potencia consumida puede exceder 1/3 de la potencia pico del módulo fotovoltaico.

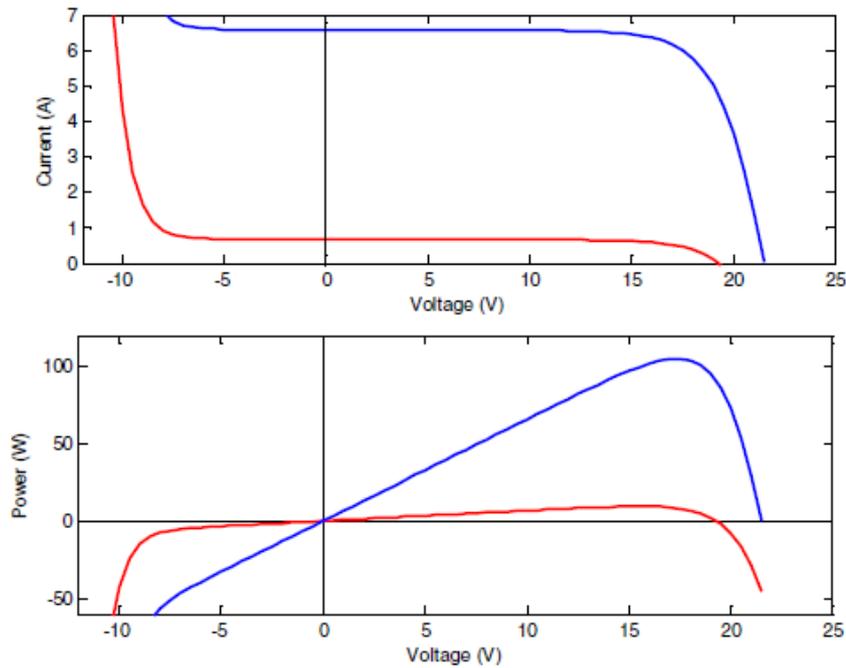
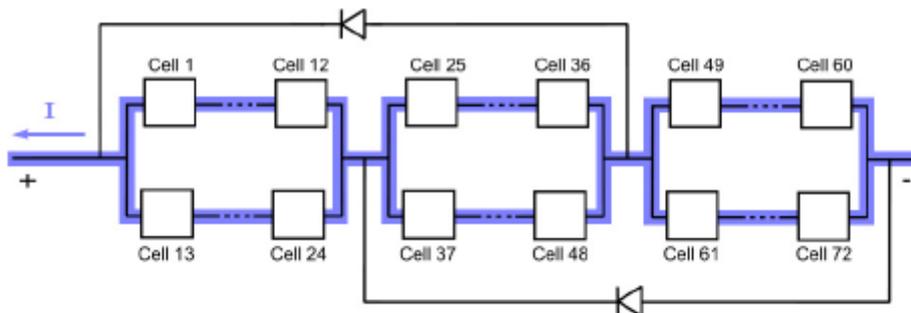
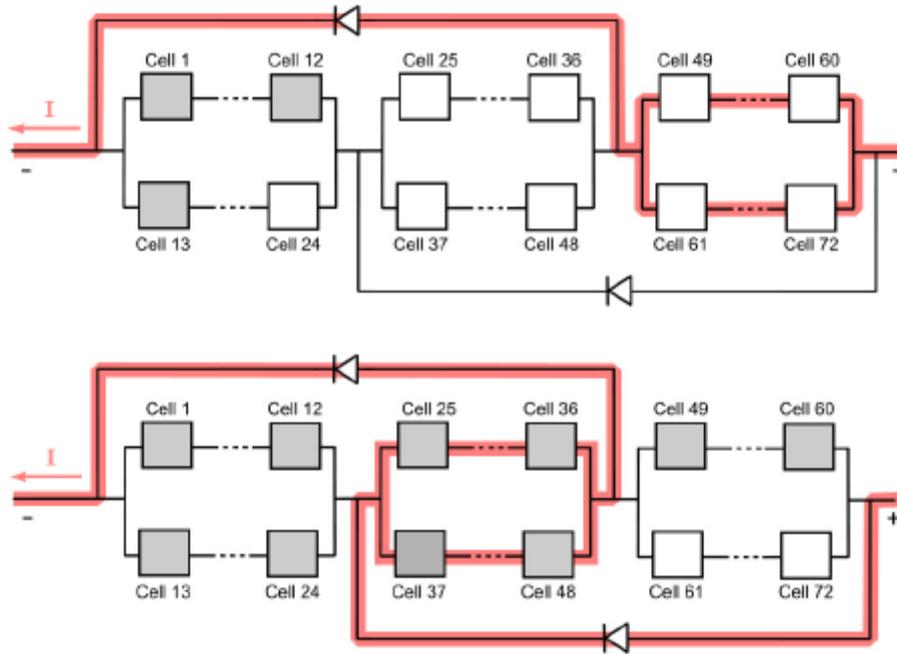


Figura (4.6). Curvas I-V y P-V de un módulo fotovoltaico con los diodos de bypass superpuestos.

Con el fin de estudiar el comportamiento típico de los módulos fotovoltaicos, una simulación de sombra progresiva se hará a partir de la fila inferior de las células fotovoltaicas a la superior. Este es un enfoque práctico, ya que en los amaneceres y puestas de sol pueden ocurrir situaciones en las que el módulo fotovoltaico tiene la misma sombra que la simulada. Hay tres posibles caminos para la mayor parte de la corriente eléctrica (Fig...). La ruta depende de los diodos polarizados, y el diodo de polarización depende de las células fotovoltaicas sombreadas. Cuando ambos diodos están polarizados, las dos series centrales del módulo son los responsables de un notable poder de drenaje.

Cada uno de estos caminos es un punto de la curva I-V y P-V (fig...).





Figura(4.7).corriente eléctrica en los módulos fotovoltaicos con diodos de derivación superpuestas.

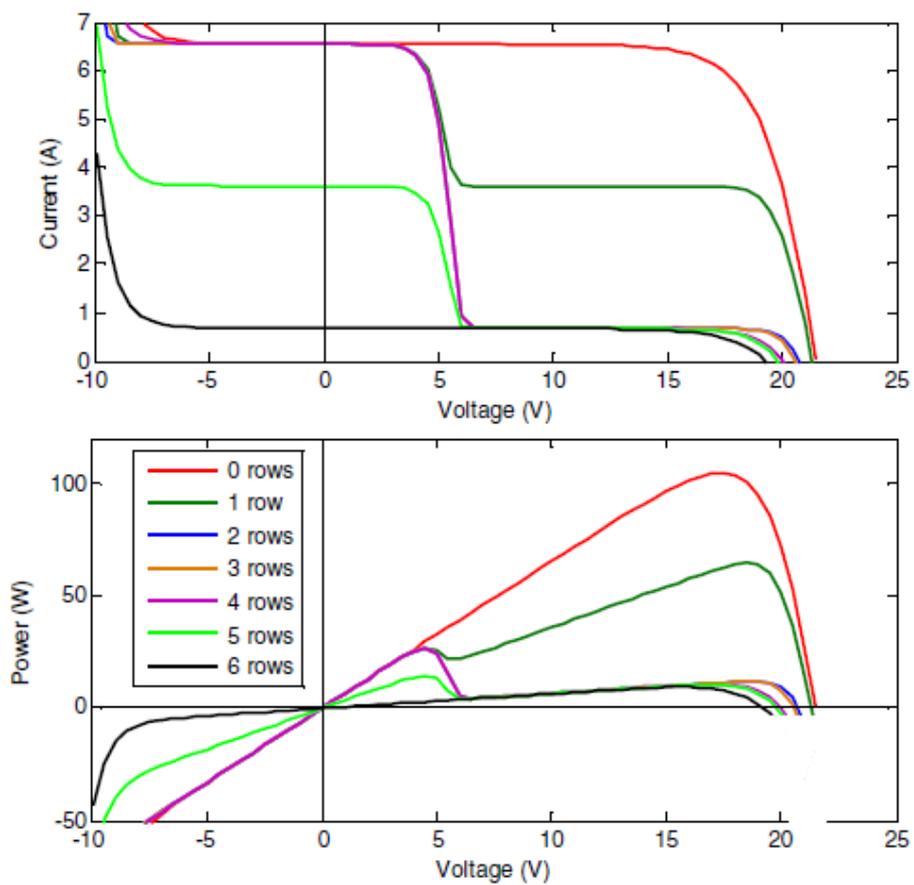


Figura (4.8). Curvas IV y PV de un módulo fotovoltaico con diodos de bypass superpuestos progresivamente sombreados.

4.1.3.5. Diodos de bypass no-superpuestos

En la segunda configuración analizada, el módulo fotovoltaico tiene los diodos de bypass no-solapadas, pero tiene la misma distribución física de las células fotovoltaicas. En este caso, el circuito eléctrico se compone de 3 series, cada una con 24 células fotovoltaicas. Cada serie tiene un diodo de derivación (fig...). A causa de esta configuración, la curva I-V del generador fotovoltaico tiene el doble de la tensión en circuito abierto y la mitad de la corriente de cortocircuito de un módulo fotovoltaico con diodos superpuestos con la misma potencia pico. Además, cuando el módulo fotovoltaico está polarizado inversamente, su voltaje y su consumo de energía son menores que en el caso anterior. Sin embargo, cuando la energía generada es baja, este consumo puede ser apreciable por el consumo de energía de los diodos polarizados (3,9 vatios / diodo).

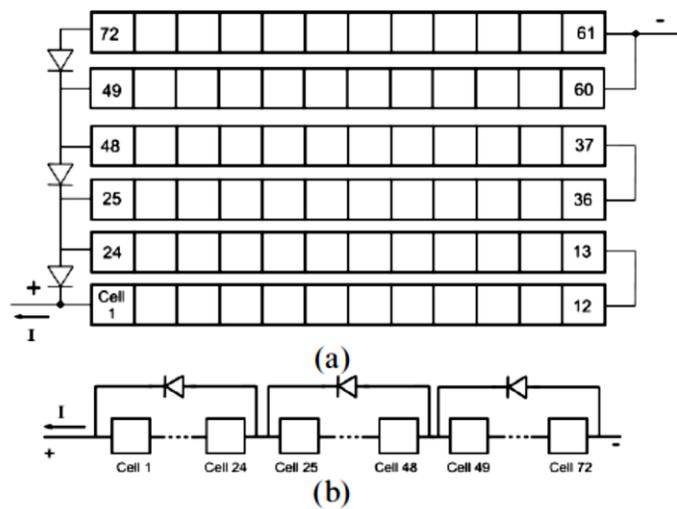


Figura (4.9). Módulos fotovoltaicos con diodos de derivación no-superpuestos (a) distribución física
(b) esquema eléctrico

En este caso, el número de posibles trayectorias de flujo de corriente es superior (fig. 4.10), pero el número de curvas I-V y P-V es inferior (fig.4.11).

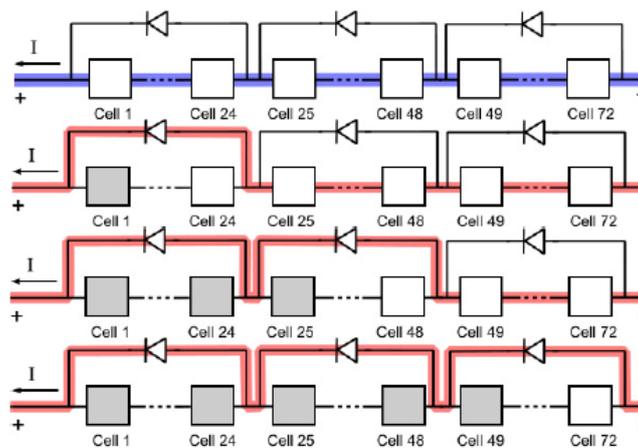


Figura (4.10). corriente eléctrica en los módulos fotovoltaicos con diodos de derivación no-superpuestos.

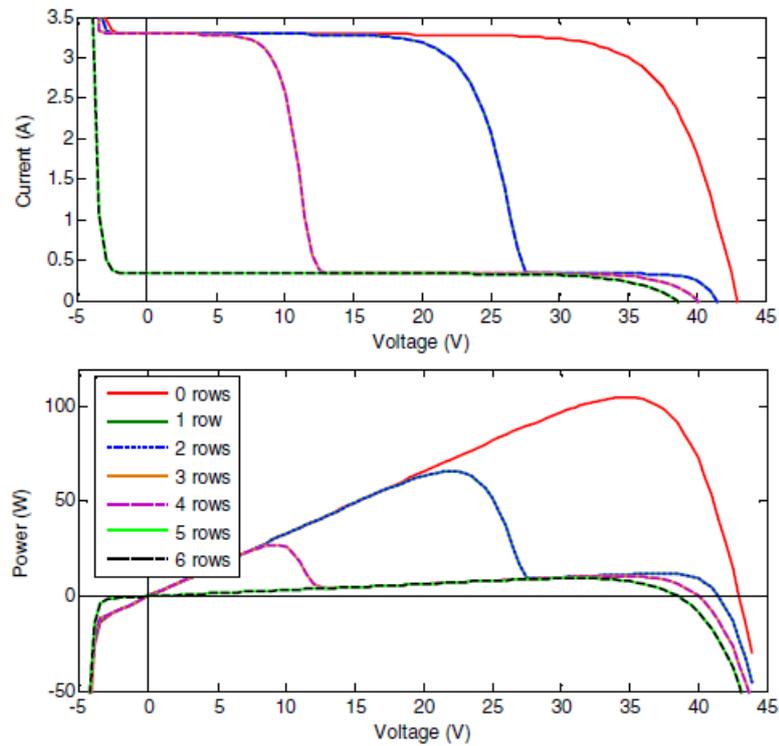


Figura (4.11). Curvas IV y PV de un módulo fotovoltaico con diodos de bypass no-superpuestos progresivamente sombreados.

4.1.4. Conclusiones

Se ha demostrado que las pérdidas producidas por las sombras dependen de la configuración de los diodos de bypass en los módulos fotovoltaicos. Las pérdidas de energía en módulos fotovoltaicos con diodos superpuestos pueden ser de un tercio de su potencia máxima, ya que además de los diodos de bypass, un tercio de sus células fotovoltaicas también puede consumir energía. En los módulos fotovoltaicos con diodos de bypass no-superpuestos, las pérdidas de energía sólo se producen por el consumo de energía de los diodos, de todos modos, sólo se notaría si hay demasiados diodos de bypass y demasiadas sombras en los módulos fotovoltaicos.



Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

5. Anexo 3: Simulaciones curva I-V

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

Setiembre 2012

Índice Anexo 3

5. ANEXO 3: SIMULACIONES CURVA I-V	75
5.1. OBJETIVO.....	77
5.2. PLANTEAMIENTO.....	77
5.2.1. Ecuaciones utilizadas.....	78
5.3. PROGRAMACIÓN	78
5.3.1. Consideraciones previas	78
5.3.2. Definición de las variables.....	78
5.3.3. Cálculos para una célula iluminada	79
5.3.4. Cálculos para un panel iluminado	79
5.3.5. Cálculos para una célula sombreada.....	81
5.3.6. Conexión en serie de una célula iluminada con una sombreada	82
5.3.7. Conexión en serie de una célula sombreada con una iluminada	83
5.4. COMPARACIÓN ENTRE UN ENSAYO REAL Y LA SIMULACIÓN.....	84
5.4.1. Análisis del ensayo real.....	84
5.4.2. Módulos utilizados	84
5.4.3. Curva I-V del ensayo real	85
5.4.4. Simulación.....	86
5.5. CONCLUSIONES	90

5.1. Objetivo

Se pretende crear un programa que a partir de las características eléctricas que nos facilitan los fabricantes de los módulos fotovoltaicos sea capaz de dibujarnos la curva característica I-V.

Para llevar a cabo este programa utilizaremos Matlab. Para su desarrollo se utilizan las ecuaciones matemáticas que más adelante se describen y usaremos como base de comparación las gráficas que hemos visto en los estudios anteriores.

5.2. Planteamiento

Para poder empezar a simular las curvas I-V, antes de nada desglosaremos el panel por células con el fin de obtener la curva I-V de una sola de ellas, y a partir de esta característica podremos empezar a trabajar, sabiendo que cuando dos células están en serie se suma el voltaje de cada una de ellas y si están en paralelo se suma la intensidad.

Para poder empezar a obtener resultados visibles, tomaremos como ejemplo un panel fotovoltaico ya utilizado en este estudio, es el módulo BP-7185S.

Características eléctricas típicas	BP 7185S
Potencia mínima garantizada*	185W
Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp})	36,5V
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mpp})	5,1A
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	5,5A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	44,8V
Coefficiente de temperatura de I_{sc}	(0,065±0,015)%/K
Coefficiente de temperatura de V_{oc}	-(160±20)mV/K
Coefficiente de temperatura de la P	-(0,5±0,05)%/K
NOCT (Temperatura ambiente 20°C; Irradiación solar 800W/m ² ; Velocidad del viento 1m/s)	47±2°C
Máximo valor del fusible en serie	15A
Tensión máxima del sistema	1000V (Certificado según IEC 61215) 1000V (Certificado por TÜV Rheinland)

Tabla (5.1). Características eléctricas módulo BP 7185S

Los datos en los que nos basaremos para obtener las curvas I-V van a ser la I_{cc} , la V_{oc} y el número de células que están en serie y en paralelo. Este módulo en concreto tiene 72 células conectadas en serie.

5.2.1. Ecuaciones utilizadas

Para poder transformar los datos que nos facilita el fabricante sobre el módulo fotovoltaico a datos específicos para cada una de sus células utilizaremos las siguientes ecuaciones tal i como hemos visto en el apartado 3.1.1.

$$ISC, Célula = ISC, Módulo / \text{Número de células en paralelo}$$

$$VOC, Célula = VOC, Módulo / \text{Número de células en serie}$$

Una vez conseguidos los datos deseados, trabajaremos con las siguientes ecuaciones para conseguir la curva I-V

$$I_o = I_{sc} \cdot e^{\left(\frac{V_{oc}}{m \cdot v_t}\right)}$$

$$I = I_{sc} - I_o \cdot e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot v_t}\right)}$$

En el siguiente anexo profundizaremos más sobre las matemáticas relacionadas con las curvas I-V y el funcionamiento de las células y módulos fotovoltaicos.

5.3. Programación

En primer lugar, basándonos en los datos del fabricante vamos a obtener la información deseada sobre una sola célula:

5.3.1. Consideraciones previas

Para simplificar los cálculos y estimar las curvas I-V, no tendremos en consideración las resistencias serie y paralelo presentes en el esquema eléctrico de la célula fotovoltaica, con lo que obtendremos unas curvas ideales, ni tendremos en cuenta la pequeña disminución de la Voc cuando la célula recibe menos radiación.

Exceptuando los casos en los que analizaremos las sombras, todas las gráficas serán las equivalentes a la climatología en que el fabricante nos facilita los datos del panel, es decir: 1000W/m², 25°C y AM 1.5.

5.3.2. Definición de las variables

Definimos los valores de Isc (Intensidad de cortocircuito), Voc (tensión a circuito abierto), Cp (número de células en paralelo) y Cs (número de células en serie)

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 5.5; \\ V_{oc} &= 44.8; \\ C_p &= 1; \\ C_s &= 72; \end{aligned}$$

5.3.3. Cálculos para una célula iluminada

Para realizar los siguientes cálculos utilizaremos las ecuaciones descritas en apartado 5.2.1.

```
Isc = Isc/Cp;      Transformamos los valores de panel a célula  
Voc = Voc/Cs;
```

```
xc = 0:0.01:Voc;   Creamos un vector para la tensión
```

```
Ioc = Isc * exp(-Voc/0.025);
```

```
yc = Isc - Ioc * exp((xc + Ioc*2)/0.0245);
```

5.3.3.1. Curva I-V de la célula

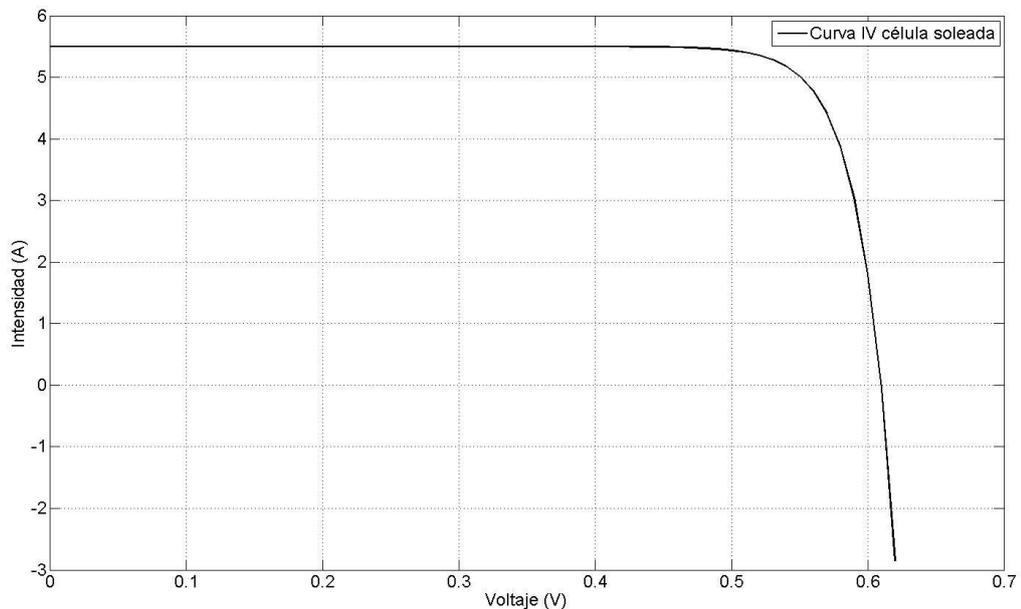


Figura (5.1) Curva I-V de una célula FV simulada en Matlab

En este caso se observa que al estar todas células en serie la Isc del panel es la misma que la de la célula.

5.3.4. Cálculos para un panel iluminado

Para este caso en concreto, al estar todas las células en serie, nos bastaría con multiplicar la Voc de la célula por el número de células que tenga el módulo. Es decir:

```
plot(72*xc,yc);
```

Pero para poder obtener la curva I-V cuando tengamos un panel con células en paralelo, escribiremos el programa de la siguiente manera:

```
x = 0:0.05:Voc;
y = Cp * Iscc*(1-exp((x-Voc)/2.5));
```

5.3.4.1. Curva I-V del módulo

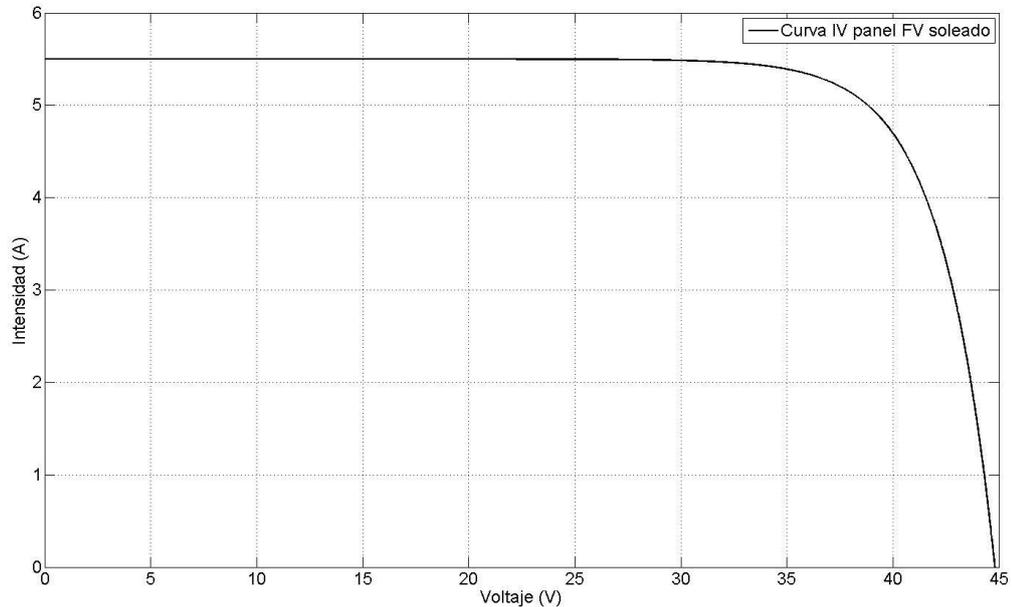


Figura (5.2) Curva I-V de un módulo FV simulada en Matlab

En nuestro caso en concreto se obtiene exactamente la misma curva utilizando ambos de los dos métodos anteriormente definidos.

En el caso que tuviésemos las mismas células pero distribuidas en dos cadenas en paralelo, es decir $C_s=36$ y $C_p=2$, y el resto de características del panel permanecieran constantes, tendríamos que observar que al haber la mitad de células en serie, si la V_{oc} del módulo no varía, cada célula tendrá que aumentar al doble su V_{oc} , es decir, aproximadamente a 1.2V. De la misma manera, si ahora tenemos el doble de células en paralelo, la I_{cc} de cada célula se verá disminuida a la mitad, es decir, aproximadamente 2.75A.

Aplicando el mismo programa que hemos estado utilizando hasta ahora cambiaremos solamente los valores de C_s y C_p para observar los resultados y compararlos con los esperados:

```
Isc = 5.5;
Voc = 44.8;
Cp = 2;      Cambiamos 2 el número de células en paralelo
Cs = 36;    Reducimos a la mitad el número de células en serie
```

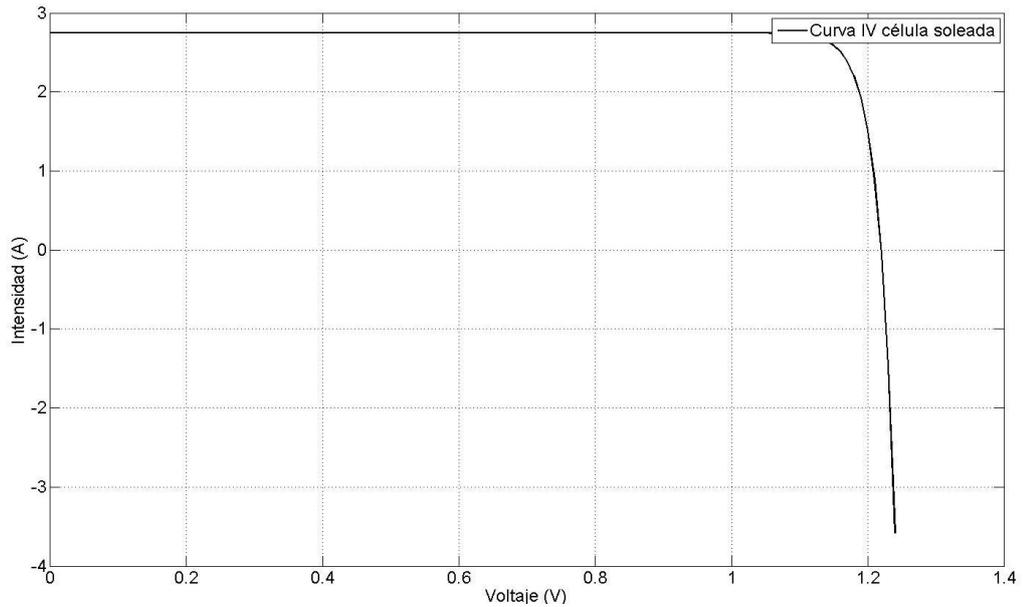


Figura (5.3) Curva I-V de una célula FV simulada en Matlab

Podemos observar en la gráfica exactamente los valores de I_{cc} y V_{oc} esperados para esta situación. En comparación observamos como como se reducen a la mitad los valores I_{cc} y se doblan los de V_{oc} .

5.3.5. Cálculos para una célula sombreada

Para poder empezar a programar la simulación de la curva I-V para una célula sombreada, antes de nada tenemos que llegar al acuerdo de la cantidad de radiación que va a recibir dicha célula.

Como hemos visto en el apartado 2.7.2. la curva I-V varía mucho en función de la radiación que recibe, y varía fundamentalmente en su I_{cc} tal y como observaremos a continuación:

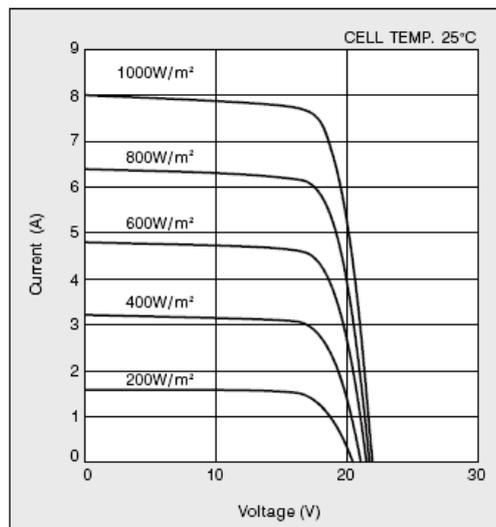


Figura (5.4) .Curvas I-V del panel Kyocera KC130TM para distintos niveles de radiación

En nuestro caso hemos determinado la I_{cc} de una célula sombreada como el 15% de la I_{cc} de una célula soleada, es decir, aproximadamente 0.8A. Utilizaremos el siguiente código para simular dicha curva.

```

Isc = (Isc/Cp) * 0.15;
Voc = Voc/Cs;

xcs = 0:0.01:Voc;

Iocs = Isc * exp(-Voc/0.025);

ycc = Isc - Iocs * exp((xc + Ioc*2)/0.0245);

```

5.3.5.1. Curva I-V de una célula sombreada

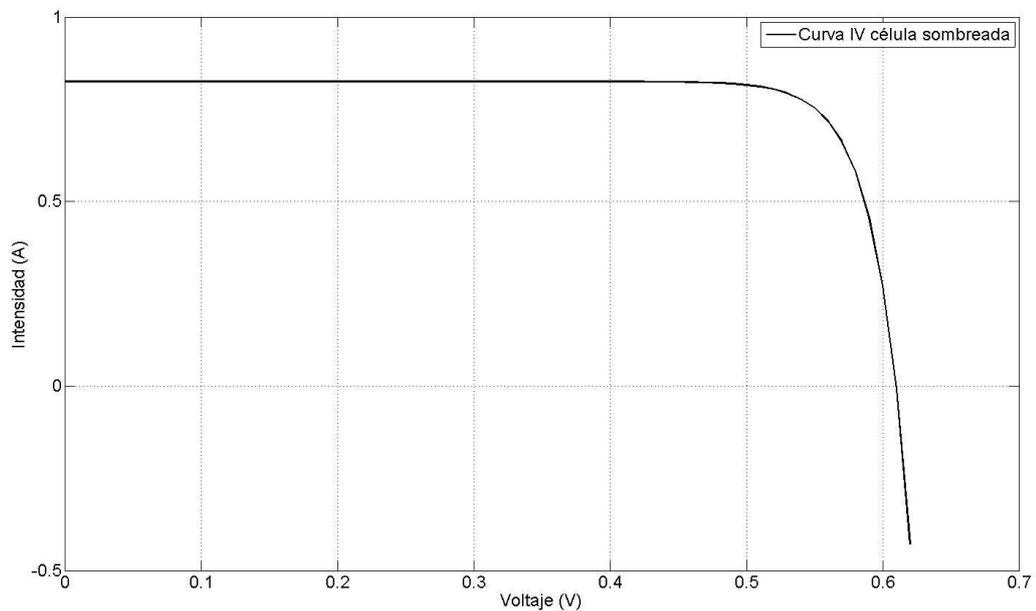


Figura (5.5) Curva I-V de una célula FV sombreada simulada en Matlab

5.3.6. Conexión en serie de una célula iluminada con una sombreada

Una vez visto el comportamiento de las células cuando están iluminadas y cuando están sombreadas, veamos ahora lo que pasa cuando las juntamos en serie una con otra:

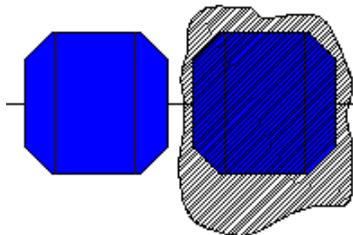


Figura (5.6) Esquema de conexión de las dos células

Si primeramente colocamos la célula iluminada y seguidamente la sombreada, deberíamos de observar que cuando la tensión llegue aproximadamente a 0.6V la intensidad decaiga hasta unos 0.8A (15% de la I_{cc}) y se comporte a partir de este momento tal y como hemos visto en la curva I-V de la célula sombreada.

Utilizaremos las siguientes líneas de código para juntar las dos curvas I-V:

```
plot([xc(1:end-2) xc+xcs(end)], [yc(1:end-2) ycs]);
```

5.3.6.1. Curva I-V de dos células FV iluminada + sombreada

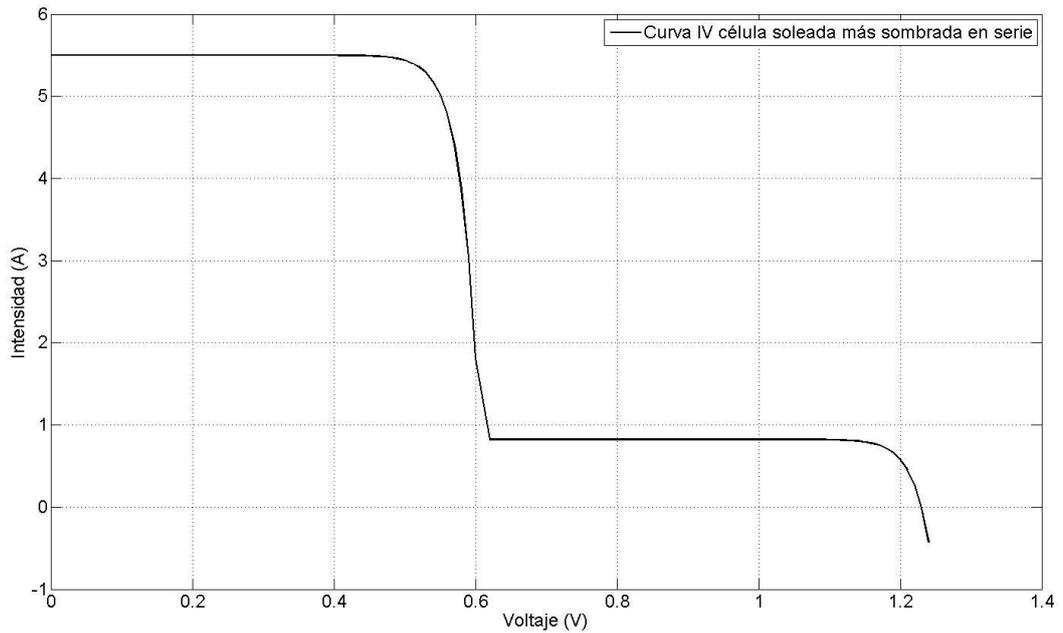


Figura (5.7) Curva I-V de dos células FV iluminada + sombreada simulada en Matlab

5.3.7. Conexión en serie de una célula sombreada con una iluminada

En este caso es cuando el efecto adverso de las sombras se hace más patente ya que aunque la segunda célula esté iluminada, la influencia de la primera no le permite generar más intensidad de la que recibe, es decir, que en este caso la $I_{scs} = I_{sc}$.

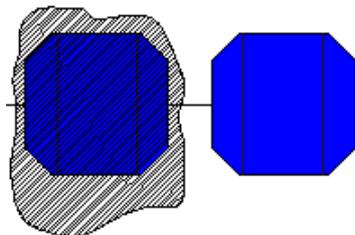


Figura (5.8) Esquema de conexión de las dos células

5.3.7.1. Curva I-V de dos células FV sombreada + iluminada

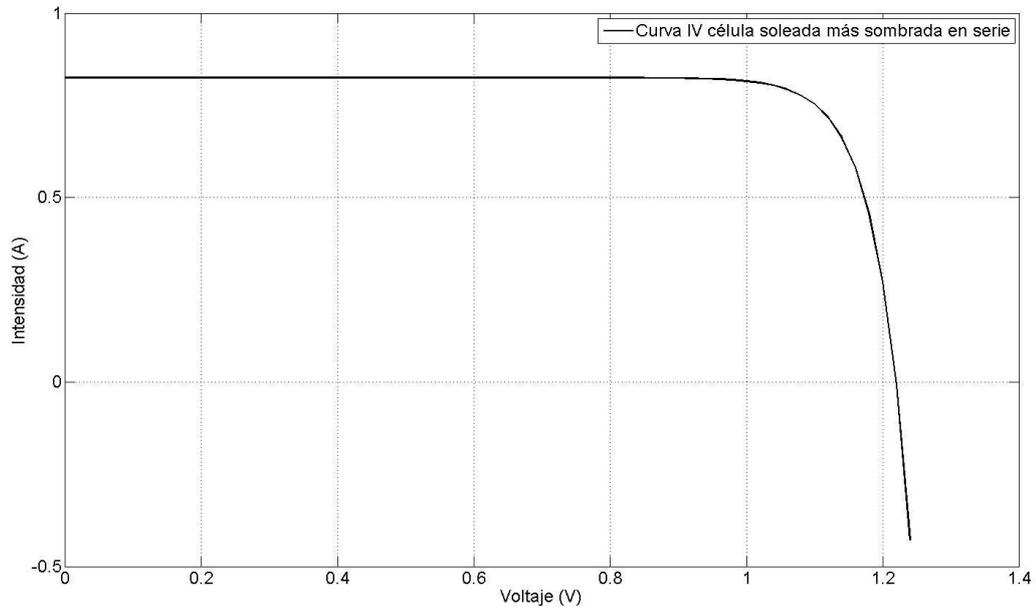


Figura (5.9) Curva I-V de dos células FV sombreada + iluminada simulada en Matlab

5.4. Comparación entre un ensayo real y la simulación

Hemos visto en los apartados anteriores como simulábamos las curvas I-V de una célula, un conjunto de células y un módulo FV con sol y con sombras. En este apartado se pretende escoger un ensayo real de los que hemos visto en el apartado 3.2 y simularlo utilizando los métodos de programación del apartado anterior.

5.4.1. Análisis del ensayo real

Para dar más énfasis a la importancia de las sombras, escogeremos el ensayo realizado en el apartado 3.2.9.9 descrito como caso 9: Tres módulos con sombra en una célula del primer módulo.

En este caso queda de manifiesto como una sola célula sombreada perjudica de forma notable en el panel y en el conjunto de paneles.

5.4.2. Módulos utilizados

Recordamos que el ensayo real fue realizado a una cadena tres módulos “Conergi CS170MA” conectados en serie. Cada módulo tenía una tensión a circuito abierto (Voc) de 44.4V, una intensidad de cortocircuito (Isc) de 5.27A y estaban compuestos de 3 cadenas en paralelo de 24 células cada cadena.

Módulo Conergy SC170MA	
Características Eléctricas (1 000 W/m ² , 25 °C, AM 1.5)	
Potencia Pico (Pmáx)	170 W
Eficiencia del módulo (%)	13,10%
Tensión punto de máxima potencia (Vmpp)	35,5 V
Corriente punto de máxima potencia (Impp)	4,79 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	44,4 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	5,27 A
Coefficiente de temperatura (Pmpp)	-0,485 %/°C
Coefficiente de temperatura (Voc)	-0,155 V/°C
Coefficiente de temperatura (Isc)	2,79 mA/°C
Tensión máxima del sistema	1.000 V
Características Físicas	
Células	72 monocristalinas
Dimensiones	1.575 x 826 x 46 mm
Peso	16,3 kg
Número de células en serie	24
Número de células en paralelo	3

Tabla (5.2) Características eléctricas módulos Conergy 170 MA

5.4.3. Curva I-V del ensayo real

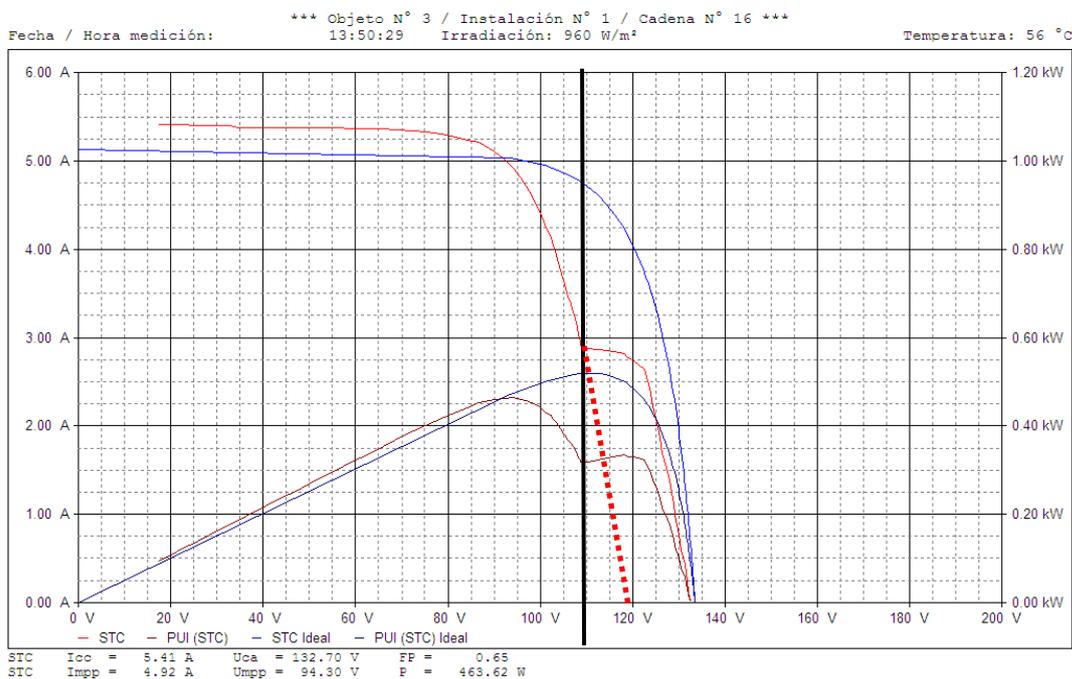


Figura (5.10) Curva I-V de la sombra de una célula del primer módulo

Analizando el gráfico a primera vista, observamos que la primera parte de la curva (a la izquierda de la línea vertical negra) equivale aproximadamente a los dos módulos iluminados más dos cadenas iluminadas del tercer módulo, es decir, que si

prolongamos dicha curva (línea de puntos roja) la Voc debería ser aproximadamente igual a : 44.4V (módulo 1) + 44.4V (módulo 2) + 2/3 de 44.4V (módulo 3). La suma de todo esto son unos 118V, que se aproxima bastante al resultado gráfico de la prolongación de la línea de puntos roja.

Por otra parte cabe pensar que la curva que se encuentra a la derecha de la línea vertical negra corresponde a un string sombreado, ya que como hemos visto anteriormente una sola célula sombreada afecta a todas que tiene a continuación.

5.4.4. Simulación

Para empezar, y teniendo en cuenta que cada panel está formado por 3 cadenas en paralelo y 24 células en serie cada cadena, analizaremos una sola célula en estas condiciones:

```
Isc = 5.27;
Voc = 44.4;
Cp = 3;
Cs = 24;
```

```
IscC = Isc/Cp;
VocC = Voc/Cs;
```

```
xc = 0:0.01:VocC;
Ioc = IscC * exp(-VocC/0.25);
yc = IscC - Ioc * exp((xc + Ioc*2)/0.25);
```

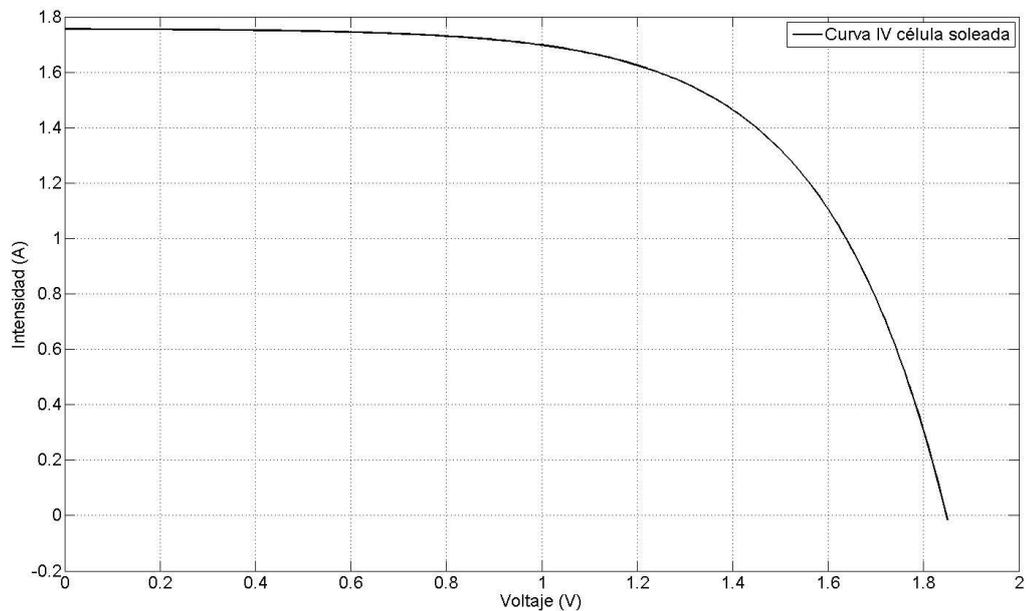


Figura (5.11) Curva I-V de una célula iluminada del panel Conergy SC170MA simulada en Matlab

Podemos observar como al I_{sc} es tres veces inferior a la de una célula cuyo panel está compuesto por tres cadenas conectadas en serie y la V_{oc} es tres veces superior.

El siguiente paso es observar cómo le afecta la sombra a dicha célula, suponiendo que la I_{sc} solo alcanza el 18% de la I_{sc} en condiciones de ensayo del fabricante.

```
radiacio = 0.18;
IscCs = (Isc/Cp)*radiacio*Cp;
VocC = Voc/Cs;
xcs = 0:0.01:VocC;
Iocs = IscCs * exp(-VocC/0.25);
yCs = IscCs - Iocs * exp((xc + Ioc*2)/0.25);
```

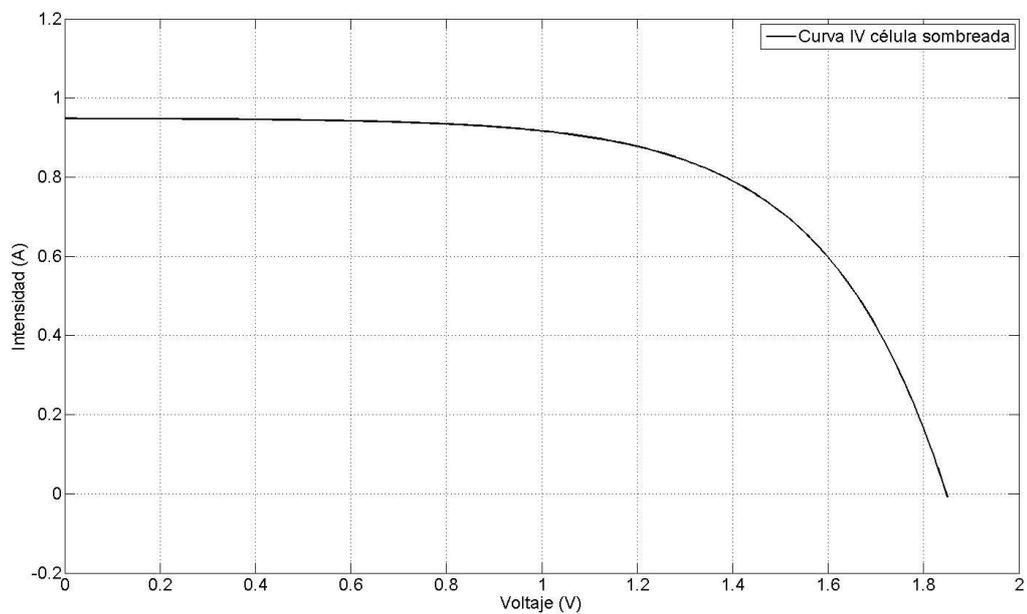


Figura (5.12) Curva I-V de una célula sombreada del panel Conergy SC170MA simulada en Matlab

A continuación vamos a simular las curvas características I-V para el panel en cuestión en los casos de que esté completamente soleado y completamente sombreado y de igual manera que hasta el momento supondremos una radiación del 18% de la que recibiría el panel soleado.

Para el panel soleado:

```
x = 0:0.01:Voc;
y = Cp * Isc * (1 - exp((x - Voc) / 3.5));
```

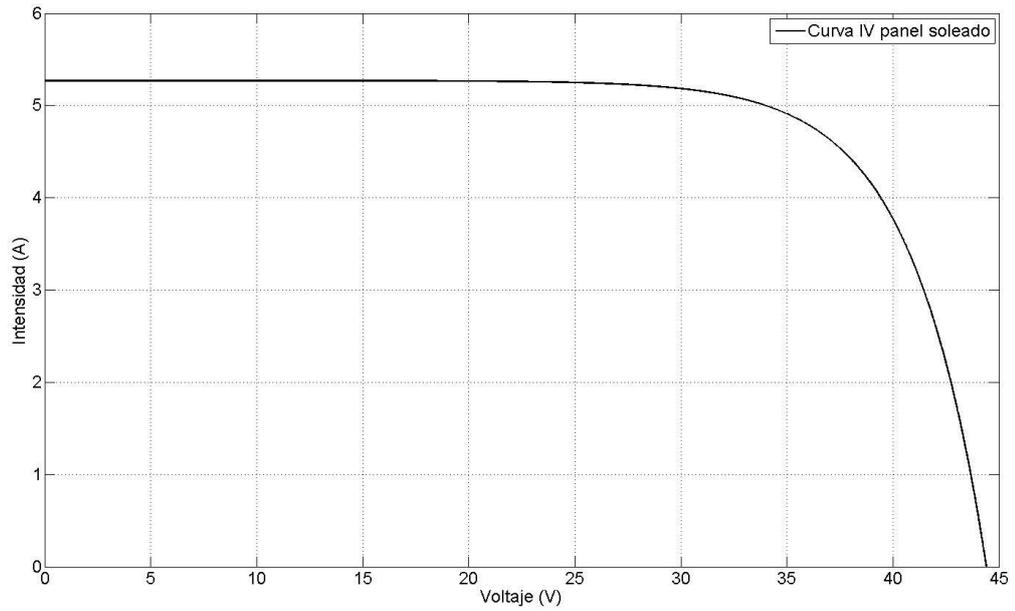


Figura (5.13) Curva I-V del panel FV Conergy SC170MA soleado simulada en Matlab

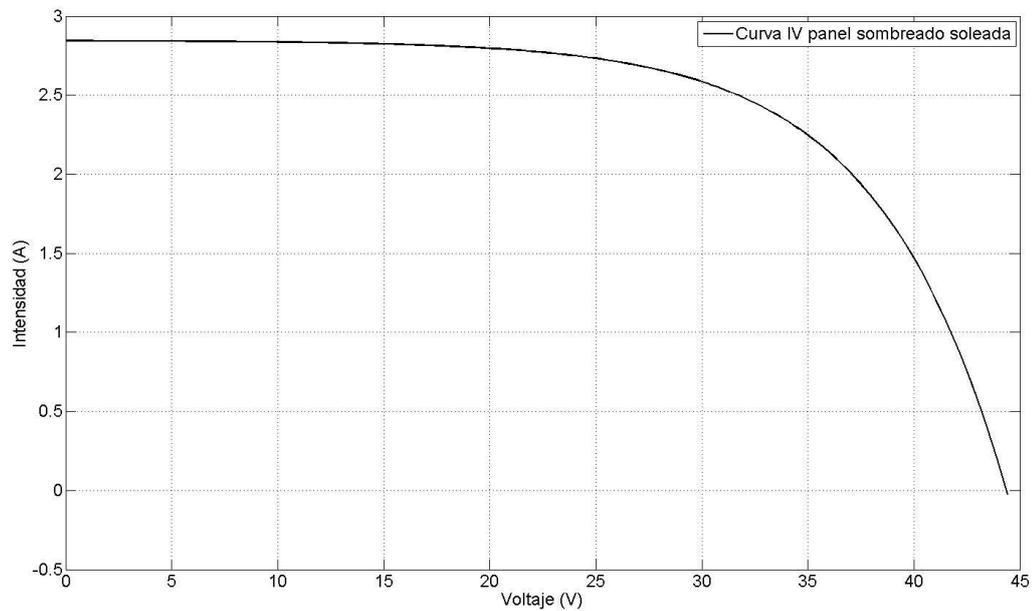


Figura (5.14) Curva I-V del panel FV Conergy SC170MA sombreado simulada simulada en Matlab

En este segundo caso se aprecia que al estar los tres strings que forman el panel en paralelo, la intensidad I_{cc} es tres veces superior a la que sería si estuviesen los tres strings en serie.

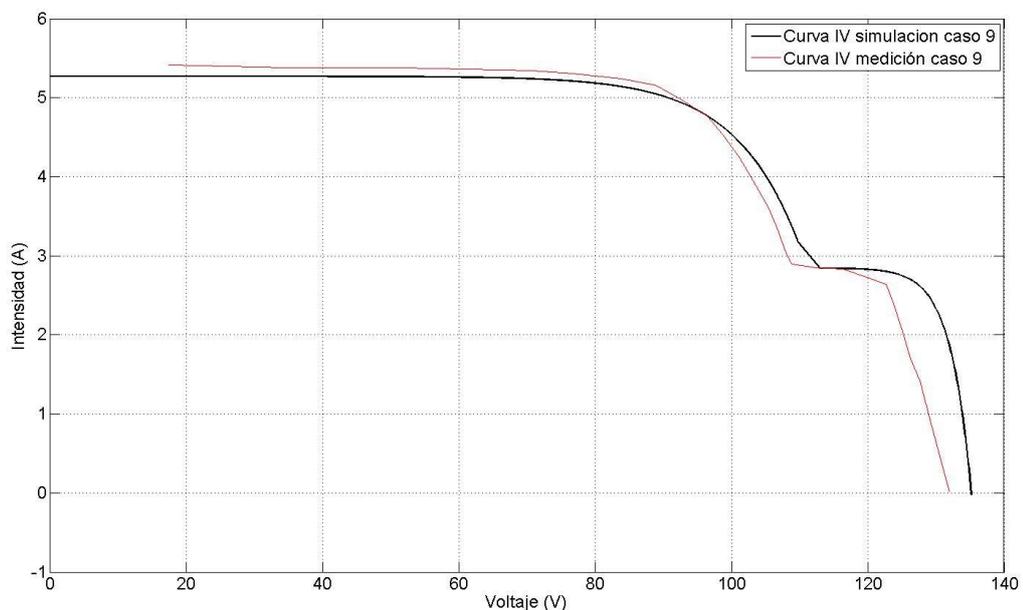
Ahora ya tenemos lo necesario para poder simular el caso real que nos habíamos propuesto referente al caso 9 del apartado 3.2.9.9.

Para ello tendremos en cuenta que en este ensayo la parte soleada afecta a los dos primeros paneles y a los dos primeros strings del tercero, es decir, los 2 primeros paneles más 1/3 del tercer panel, y la parte sombreada afecta a todo el tercer string del último panel, aunque por el efecto del diodo de bypass solo de verá afectado medio string.

Para poder comparar el resultado que nos da de la simulación con el caso del estudio real, utilizaremos un programa de Matlab llamado *GetFigure 3.0* facilitado por el departamento de robótica de la UdLL que nos permite extraer la curva en Matlab de una gráfica en formato imagen, de este modo podremos comparar el resultado pintando las dos curvas en el mismo gráfico.

```
plot([2.6667*x(1:end-320) 12*xcs+113],[y(1:end-320)
Cp*yCs], 'Color','k','LineWidth',2.0);
hold on;
load dades_cas9.mat
plot(dades_cas9(2,:),dades_cas9(1:,:), 'r-');
xlabel('Voltaje (V)','fontSize',18);
ylabel('Intensidad (A)','fontSize',18);
legend('Curva IV simulacion caso 9','Curva IV medición caso 9');
grid on;
hold off;
set(gca,'fontSize',18);
```

En las líneas de código podemos observar el plot de “dades_cas9”. Este es el nombre con el que hemos guardado los datos que el programa *GetFigure 3.0* nos ha dado de la curva comparada.



Podemos comprobar visualmente que la curva simulada se aproxima bastante a la medida en la situación real. La mayor diferencia se observa en la parte final en que la curva simulada tiene un mayor voltaje que la medida, supuestamente por no tener en

cuenta la caída de la tensión por efecto del calentamiento que se produce en las celdas como consecuencia de la temperatura.

5.5. Conclusiones

Basándonos en la experiencia adquirida durante la recopilación de información para realizar este estudio, las interpretaciones de las curvas I-V medidas en el apartado 3 (Estudio de las sombras) y la aplicación de las ecuaciones del siguiente apartado, hemos conseguido mediante el entorno de programación Matlab, simulaciones de las curvas I-V tanto de células fotovoltaicas individuales como de paneles enteros según su configuración interna y las sombras que los afectan, así como configuraciones específicas de diferentes paneles conectados entre sí y con sombras específicas.

Hemos podido observar que sin utilizar un código complejo y sin entrar en muchos detalles, es posible simular de una forma bastante aproximada las curvas I-V de un panel o un conjunto de paneles según su situación y poder cuantificar los problemas de pequeñas sombras y estimar las producciones en una situación ideal.



Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

6. Planos

Autor: Jordi Pallejà Cabré

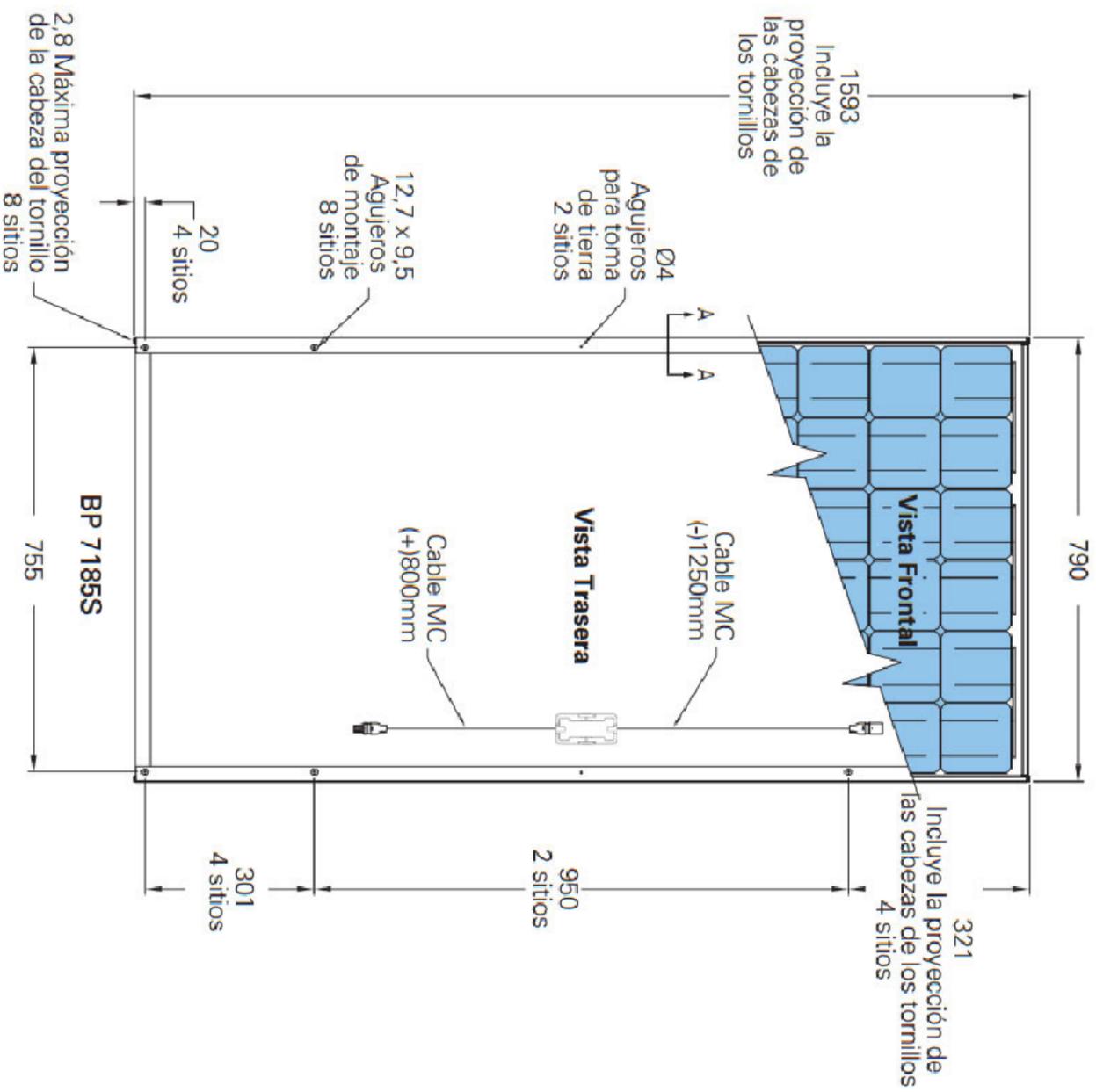
Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

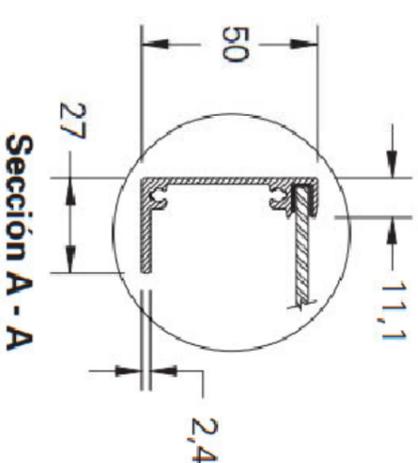
Setiembre 2012

Índice de planos

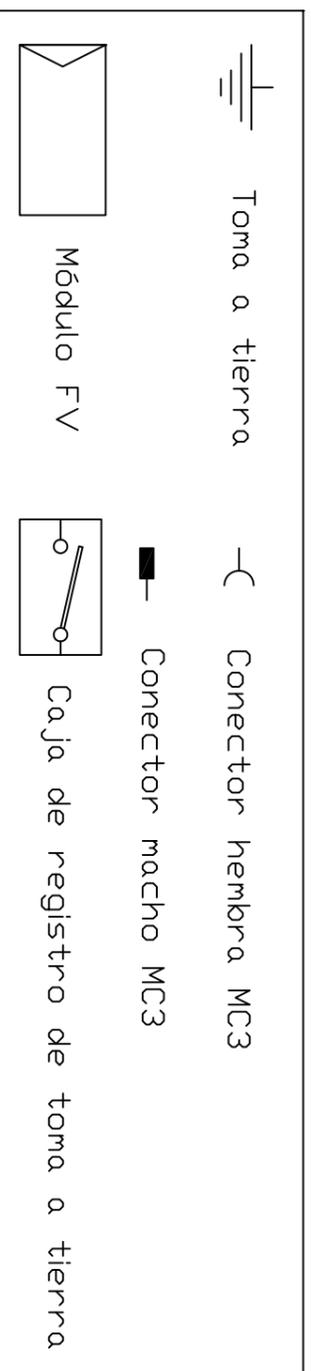
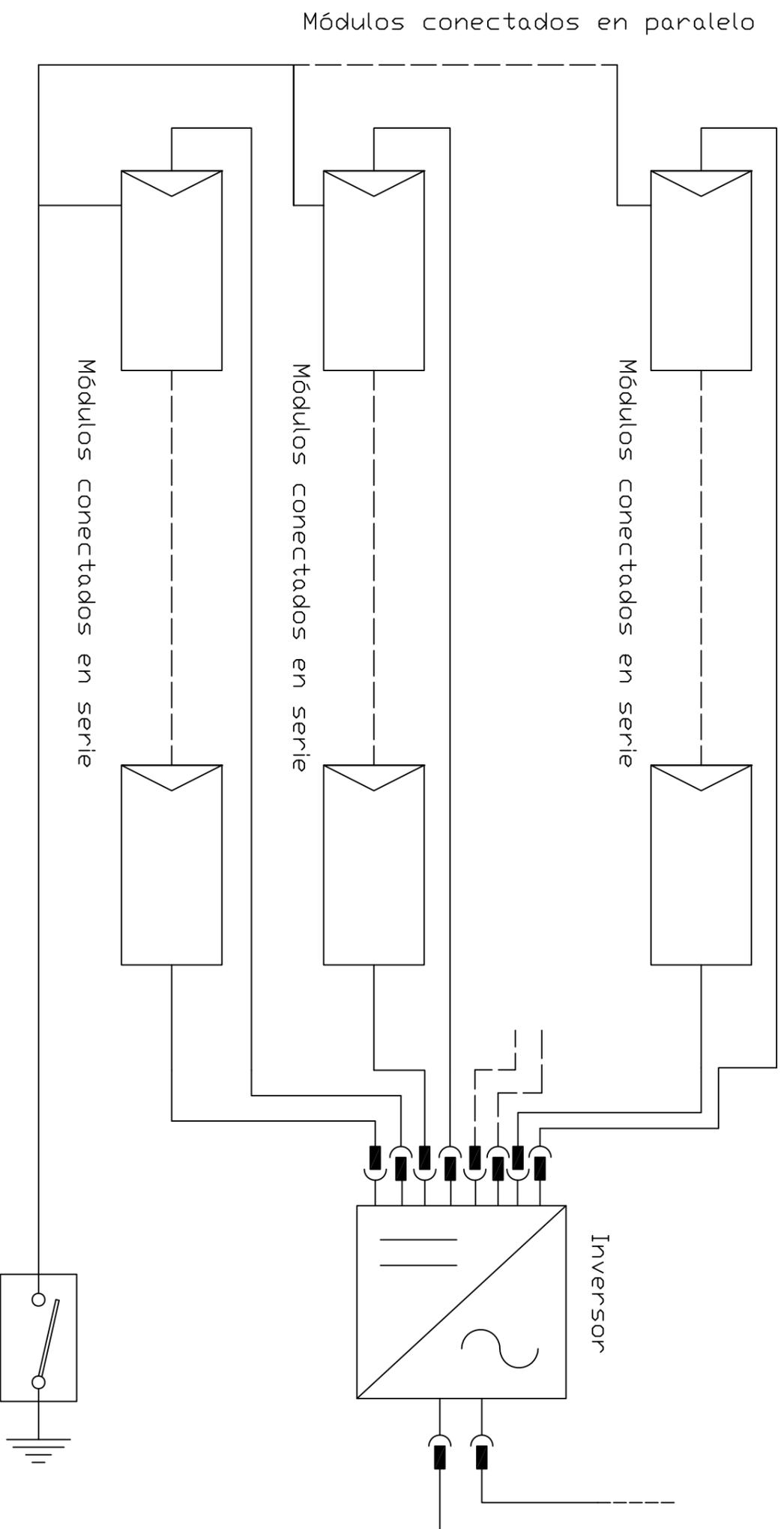
6. PLANOS	91
6.1. PLANO DE DETALLE PANEL BP 7185 S	93
6.2. PLANO DE CONEXIÓN ENTRE MÓDULOS	94



Todas las dimensiones en mm con una tolerancia de +/-3mm



Dibuxat:	Jordi Pallejà	Escola	UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
		S/E	Panel FV BP7185S



Dibuixat: Jordi Pallès

Escala
S/E

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Conexiones módulos



Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática

Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico

7. Anexo 4: Cálculos matemáticos curva I-V

Autor: Jordi Pallejà Cabré

Director: Jordi Garcia Amorós

Universitat Rovira i Virgili

Setiembre 2012

Índice Anexo 4

7. ANEXO 4: CÁLCULOS MATEMÁTICOS CURVA I-V	95
7.1. CÁLCULO MATEMÁTICO DE LA CURVA I-V EN UNA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA	97
7.2. CÁLCULO MATEMÁTICO DE LA CURVA I-V EN UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO.....	100
7.3. OBTENCIÓN DE LA CURVA I-V	100
7.3.1. <i>Modelo de Green</i>	100

7.1. Cálculo matemático de la curva I-V en una célula solar fotovoltaica

La iluminación de una célula añade una corriente fotogenerada a la característica I-V de modo que:

$$I = I_0 \left[e^{\left(\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] - I_L$$

Ecuación (1.6): Corriente fotogenerada por la iluminación de una célula

Dónde:

I_L = corriente fotogenerada

I_0 = corriente de saturación

V = voltaje aplicado

q = Valor carga electrón ($q=1.6021733 \times 10^{-19}$ C)

k = cte de Boltzman ($k= 1.380658 \times 10^{-23}$ J/K)

T = temperatura absoluta

m = factor idealidad, varía entre 1 y 2

$\frac{k \cdot T}{q} = v_t =$ potencial térmico

Los parámetros usados para caracterizar la salida de las células solares ideales, para una irradiancia dada, una temperatura de operación y una determinada área son:

Corriente de cortocircuito, I_{sc} , la corriente máxima a voltaje zero. Idealmente si $V=0$, $I_{sc}=I_L$, I_{sc} es directamente proporcional a la luz disponible.

Voltaje de circuito abierto, V_{oc} , máximo voltaje a corriente cero. V_{oc} aumenta logarítmicamente con la irradiancia incidente y disminuye con la temperatura.

Punto de máxima potencia, P_m , donde el producto $I_m \times V_m$ alcanza su valor máximo.

El factor de forma, FF , es una medida de calidad de la unión i de la resistencia en serie de la célula.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Ecuación (2.6): Factor de forma

Dónde:

FF = factor de forma

$V_m \cdot I_m = P_m$ =punto de máxima potencia

I_{sc} = corriente de cortocircuito (I_{max})

V_{oc} = voltaje a circuito abierto (V_{max})

La incidencia de la luz suele tener el efecto de desplazar la curva I-V hacia abajo, en el cuarto cuadrante. No obstante, por acuerdo se suele representar en el primer cuadrante mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right]$$

Ecuación (3.6): Incidencia de la luz en el primer cuadrante

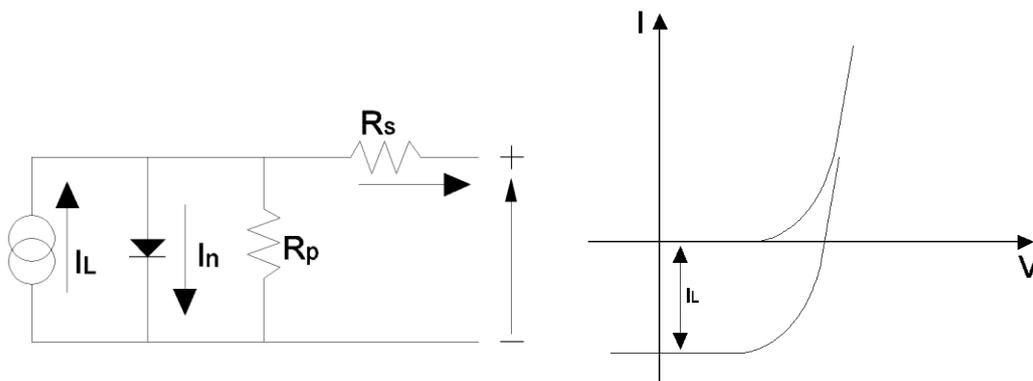


Figura (6.1). Circuito equivalente de una célula solar y el efecto de la incidencia de la luz en la característica I-V de la unión p-n

Para cada punto de la curva I-V, el producto de la corriente y el voltaje representan la potencia de salida en las condiciones de la operación. Como ya hemos visto anteriormente las células solares presentan una resistencia serie y una resistencia paralelo asociadas que reducen el factor forma. La resistencia serie, R_s , es debida principalmente a la resistencia del volumen del material, a las interconexiones y a la resistencia entre los contactos metálicos y el semiconductor. La resistencia paralelo, R_p , es debida a la no idealidad de la unión p-n y a las impurezas cerca de la unión. Con la presencia de ambas resistencias, serie y paralelo, la curva I-V de una célula solar está dada por:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot v_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Ecuación (4.6): Incidencia de la luz en función de Rp y Rs

Siendo: $v_t = \frac{k \cdot T}{q}$

Dónde:

I_L = corriente fotogenerada [A]

I_0 = corriente de saturación [A]

R_s = resistencia serie [Ω]

R_p = resistencia en paralelo [Ω]

v_t = voltaje térmico

T = temperatura del dispositivo [K]

Se puede considerar que tanto una célula solar, como un módulo, como un generador FV pueden caracterizarse por una ecuación como la (núm. La anterior) donde para cada caso los parámetros I_L , I_0 , m , R_s y R_p serán diferentes, aunque existe una relación entre ellos y el número de elementos en serie, N_s y en paralelo N_p .

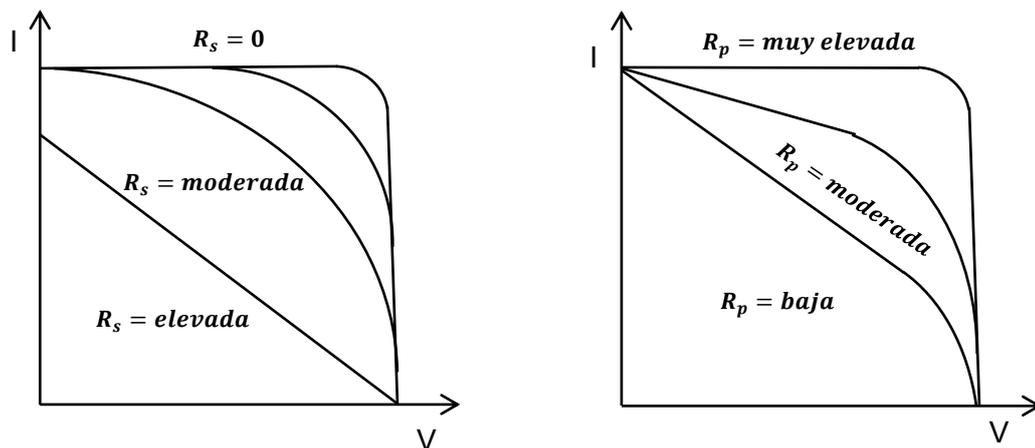


Figura (6.2). Influencia de la variación de la resistencia serie, R_s , y la resistencia paralelo R_p , en la curva I-V de una célula solar.

7.2. Cálculo matemático de la curva I-V en un panel solar fotovoltaico

Como hemos visto en el apartado anterior, la función que describe la curva I-V tanto en una célula como en un módulo es la siguiente:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot v_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Ecuación (5.6): Incidencia de la luz en función de Rp y Rs

Donde I_L , I_0 , m , R_s y R_p son parámetros característicos para el módulo en cuestión.

Si consideramos que el módulo fotovoltaico está formado por N_s células conectadas en serie y N_p en paralelo y suponemos que todas son idénticas, la ecuación que describe la curva I-V es la siguiente;

$$I = N_p \left(I_L - I_0 \left(e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{\frac{N_s + N_p}{m \cdot v_t}} \right)} - 1 \right) \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Ecuación (6.6): Incidencia de la luz en función de Rp, Rs y el número de células en serie y paralelo

Es recomendable trabajar con la primera ecuación.

7.3. Obtención de la curva I-V

Existen varios modelos matemáticos para la obtención de la curva I-V. A continuación describiremos un modelo acorde con las ecuaciones que hemos utilizado hasta el momento, el modelo de Green.

7.3.1. Modelo de Green.

El modelo de Green permite calcular la curva característica I-V de un dispositivo fotovoltaico a partir de los datos suministrados por el fabricante que típicamente son: I_{sc} , V_{oc} y el factor de forma FF ($FF = I_m \cdot V_m / I_{sc} \cdot V_{oc}$)

1. Si en la ecuación de una exponencial simplificada se considera que:

$$e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot v_t}\right)} \gg 1$$

Ecuación (7.6) La exponencial de la curva I-V

2. En cortocircuito ($I=I_{sc}$) se obtiene el mayor valor de la corriente de generación y como $I_L \gg I_0$ se puede aproximar: $I_L=I_{sc}$. Se obtien:

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot v_t}\right)}$$

Ecuación (8.6) Incidencia de la luz en cortocircuito

3. En la condición de circuito abierto $I=0$ y $V=V_{oc}$, se puede obtener una expresión para lo:

$$I_0 = I_{sc} \cdot e^{\left(-\frac{V_{oc}}{m \cdot v_t}\right)}$$

Ecuación (9.6) Incidencia de la luz en circuito abierto 1

O equivalente

$$V_{oc} = m \cdot v_t \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$$

Ecuación (10.6) Incidencia de la luz en circuito abierto 2

4. Con lo que:

$$I = I_{sc} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{V-V_{oc}+I \cdot R_s}{m \cdot v_t}\right)}\right]$$

Ecuación (11.6) Incidencia de la luz según modelo de Green

Considerando que en el punto de máxima potencia, en la que el producto $P_m=V_m \cdot I_m$ alcanza su valor máximo, la derivada de la potencia respecto de la tensión es nula.

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{V=V_m} = 0$$

Se puede obtener:

$$V_m = V_{oc} - m \cdot v_t \cdot \ln\left(\frac{V_m}{m \cdot v_t} + 1\right)$$

Ecuación (12.6) Voltaje máximo

Si consideramos $m=1$ (valor aproximadamente válido para células de silicio monocristalino), el único parámetro a determinar es R_s . Valor que se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1}$$

Ecuación (13.6) Factor de forma máximo para un dispositivo ideal

Donde FF_0 es el valor máximo del FF para el dispositivo ideal, es decir, para $R_s=0$ y $R_p=(\infty)$. Se pueden definir unos valores normalizados:

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{m \cdot v_t} \quad r_s = R_s \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \quad r_p = R_p \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}}$$

Ecuaciones (14.6), (15.6), (16.6) valores normalizados de voltaje a circuito abierto, resistencia serie y resistencia paralelo

Si consideramos únicamente la influencia de la r_s en el dispositivo, entonces el valor de R_s puede obtenerse de la expresión:

$$FF = FF_0 \cdot \left(1 - R_s \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}}\right) \quad \text{Donde} \quad R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_0}\right) \cdot \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}}\right)$$

Ecuación (17.6) Factor de forma

Ecuación (18.6) Resistencia serie

Una ecuación obtenida de modo empírico, equivalente a la ecuación anterior es:

$$FF = FF_0 \cdot \left(1 - 1.1 \cdot R_s \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}}\right) + \frac{1}{5.4} \left(R_s \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}}\right)^2$$

Ecuación (19.6) Factor de forma obtenido de forma empírica 1

**Expresiones válidas para $v_{oc}>10$ y $r_s<0.4$*

Si también se considera el efecto de la r_p :

$$FF = FF_0 \cdot \left(1 - \frac{v_{oc} + 0.7}{v_{oc}}\right) \cdot \frac{FF_0}{r_p}$$

Ecuación (19.6) Factor de forma obtenido de forma empírica 2

** Expresión válida para $v_{oc}>10$ y $r_s<2.5$*