



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

Estudio de las células y paneles de una instalación fotovoltaica

Autor:

Martín Álvarez, Sergio

Tutor:

Buey Cuesta, José Julio

Departamento:

Tecnología Electrónica

Valladolid, junio 2019.



1. RESUMEN Y PALABRAS CLAVE.

En el presente documento se va a analizar la actualidad de la energía fotovoltaica, haciendo hincapié en los materiales que prevalecen como elemento constructivo en los dispositivos fotovoltaicos y el estudio de las diversas tecnologías de célula existentes. Para ello, se va a analizar la gran variedad de semiconductores empleados en esta metodología energética, estudiando las eficiencias y diversos métodos de fabricación para la construcción de dispositivos fotovoltaicos. En la misma línea de progreso, se va a analizar la corriente investigadora en este ámbito y así poder tener un conocimiento global del futuro esperado de este método de obtención de energía. Por último, se concluirá con la implementación de tres programas de simulación, de células, paneles e instalaciones fotovoltaicas, pudiendo observar su comportamiento ante diferentes entornos ambientales y ubicaciones, además del seguimiento de la potencia que es capaz de otorgar cada dispositivo ante tales condiciones de simulación.

Palabras clave: células, tecnología de célula, panel, instalación, simulación.



2. TABLAS DE CONTENIDO

2.1. INDICE

1. RESUMEN Y PALABRAS CLAVE.....	3
2. TABLAS DE CONTENIDO.....	5
2.1. INDICE.....	5
2.2. INDICE DE FIGURAS.....	9
3. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	11
4. ESTADO DEL ARTE DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	13
4.1. ENERGÍA SOLAR Y SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	13
4.2. LA CÉLULA SOLAR.....	16
4.2.1. INTRODUCCIÓN.....	16
4.2.2. TEORÍA DE SEMICONDUCTORES Y FUNCIONAMIENTO.....	16
4.2.3. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA CÉLULA SOLAR.....	19
4.2.4. CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LA CÉLULA SOLAR.....	20
4.2.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA CÉLULA SOLAR.....	21
4.2.5.1. Curva I-V de la célula solar.....	21
4.2.5.2. Curva P-V de la célula solar.....	22
4.2.6. MODIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA CÉLULA SOLAR.....	22
4.2.6.1. Influencia de la temperatura.....	22
4.2.6.2. Influencia de la irradiancia.....	23
4.2.7. FORMAS DE ASOCIACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES.....	24
4.2.7.1. Asociación de células en paralelo.....	24
4.2.7.2. Asociación de células en serie.....	24
4.2.8. FABRICACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES.....	25
4.2.9. CLASIFICACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES.....	26
4.2.9.1. Clasificación según la estructura interna de la célula.....	26
4.2.9.2. Clasificación según la composición de la célula.....	27
4.2.9.3. Clasificación según la aplicación de la célula.....	29
4.3. TECNOLOGÍAS DE CÉLULA EMPLEADAS EN LA ACTUALIDAD.....	30
4.3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS ALCANZADOS.....	30
4.3.2. SILICIO CRISTALINO.....	30
4.3.2.1. Introducción.....	30

4.3.2.2.	Silicio monocristalino	30
4.3.2.3.	Silicio policristalino.....	31
4.3.3.	CÉLULAS DE PELÍCULA DELGADA.....	32
4.3.3.1.	Introducción.....	32
4.3.3.2.	Células GaAs (Arseniuro de galio)	33
4.3.3.3.	Células CdTe (Teluro de cadmio)	33
4.3.3.4.	Células de silicio amorfo.....	35
4.3.3.5.	Células CIS y CIGS	36
4.3.4.	COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ACTUALES	38
4.4.	INVESTIGACIONES EN TECNOLOGÍAS DE CÉLULAS	39
4.4.1.	INTRODUCCIÓN Y RAMAS DE INVESTIGACIÓN	39
4.4.2.	CÉLULAS ORGÁNICAS.....	39
4.4.2.1.	Introducción.....	39
4.4.2.2.	Evolución de las células orgánicas	40
4.4.2.2.1.	Introducción.....	40
4.4.2.2.2.	Células orgánicas de una sola capa	40
4.4.2.2.3.	Células orgánicas bicapa.....	41
4.4.2.2.4.	Concepto de heterounión en volumen o BHJ.....	41
4.4.2.2.5.	Concepto e innovaciones de la capa activa	42
4.4.2.3.	Funcionamiento de las células orgánicas	43
4.4.2.4.	Compuestos orgánicos empleados.....	44
4.4.2.5.	Células Grätzel (TiO ₂)	45
4.4.2.6.	Células basadas en aceptores no-fullerenos (NFAs)	47
4.4.2.7.	Aplicaciones.....	47
4.4.3.	CÉLULAS DE PEROVSKITA (PSC)	48
4.4.3.1.	Introducción.....	48
4.4.3.2.	Perovskitas híbridas.....	49
4.4.3.3.	Diferentes técnicas de deposición de perovskita	50
4.4.3.4.	Perovskitas estables aplicando cloruro de amonio (NH ₄ Cl).....	50
4.4.4.	KESTERITA (Cu ₂ ZnSnS ₄).....	51
4.5.	APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	52
4.5.1.	INTRODUCCIÓN.....	52
4.5.2.	APLICACIONES AISLADAS	52



4.5.2.1.	Introducción.....	52
4.5.2.2.	Aplicaciones espaciales.....	52
4.5.2.3.	Aplicaciones terrestres	53
4.5.3.	APLICACIONES CONECTADAS A RED	53
4.5.3.1.	Introducción.....	53
4.5.3.2.	Centrales fotovoltaicas y huertos solares.....	53
4.5.3.3.	Edificios fotovoltaicos	54
4.5.4.	APLICACIONES NOVEDOSAS DE VANGUARDIA	55
4.5.4.1.	Introducción.....	55
4.5.4.2.	Carretera solar en Francia	55
4.5.4.3.	Carril bici solar en Holanda (SolaRoad).....	55
4.5.4.4.	Células solares basadas en la bacteria de E.coli.....	56
4.5.4.5.	ECOCAT. Ferry marítimo eléctrico.....	56
5.	SIMULACIÓN DE CÉLULA, PANEL E INSTALACIÓN.....	57
5.1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	57
5.2.	MODELOS DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	58
5.2.1.	MODELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE ABELLA	58
5.2.2.	MODELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE WAGNER.....	60
5.2.3.	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA SERIE	61
5.3.	PROGRAMAS EMPLEADOS.....	63
5.3.1.	MATLAB	63
5.3.2.	MATLAB-SIMULINK	63
5.3.3.	METEONORM	64
5.3.3.1.	Primer paso.....	64
5.3.3.2.	Segundo paso.....	65
5.3.3.3.	Tercer paso	65
5.3.3.4.	Cuarto paso	66
5.3.3.5.	Quinto paso.....	67
5.3.3.6.	Sexto paso	67
5.4.	SIMULACIÓN DE CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	68
5.4.1.	INTRODUCCIÓN.....	68
5.4.2.	ESTRUCTURA Y EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA.....	68
5.4.2.1.	Código de Matlab	68

5.4.2.2. Implementación en Simulink.....	74
5.4.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	76
5.4.4. CONCLUSIONES	78
5.5. SIMULACIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO	79
5.5.1. INTRODUCCIÓN.....	79
5.5.2. ESTRUCTURA Y EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA.....	80
5.5.2.1. Código de Matlab	80
5.5.2.2. Implementación en Simulink.....	84
5.5.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN	85
5.5.4. CONCLUSIONES	87
5.6. SIMULACIÓN DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA	88
5.6.1. INTRODUCCIÓN.....	88
5.6.2. ESTRUCTURA Y EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA.....	89
5.6.2.1. Código de Matlab	89
5.6.2.2. Implementación en Simulink.....	92
5.6.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN	92
5.6.4. CONCLUSIONES	95
6. CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO	97
7. BIBLIOGRAFÍA	99



2.2. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico de una instalación fotovoltaica.....	15
Figura 2. Estructura típica de una célula fotovoltaica.	16
Figura 3. Corriente total generada por la célula solar.	18
Figura 4. Diferentes pérdidas energéticas para la fotogeneración de corriente.	19
Figura 5. Corriente total generada por una célula solar en función de Voc e Isc.	20
Figura 6. Ecuación de la corriente generada por la célula con efectos de Rs y Rp.	20
Figura 7. Circuito equivalente de la célula con un diodo.....	21
Figura 8. Circuito equivalente de la célula con dos diodos.	21
Figura 9. Curva I-V de la célula solar.....	21
Figura 10. Curva P-V de la célula solar.	22
Figura 11. Influencia de la temperatura en las curvas características.	23
Figura 12. Influencia de la irradiancia en las curvas características.	23
Figura 13. Asociación serie y paralelo de células.	24
Figura 14. Dispositivo formado por dos células en cascada.	29
Figura 15. Técnica Czochralski.....	31
Figura 16. Horno Siemens.	32
Figura 17. Estructura y composición de la célula HIT.....	36
Figura 18. Estructura interna de una célula CIGS con sustrato de vidrio.	37
Figura 19. Cuadro comparativo de las tecnologías de célula estudiadas.....	38
Figura 20. Estructura de la célula solar orgánica de una capa.	40
Figura 21. Estructura de la célula solar orgánica bicapa.	41
Figura 22. Proceso de funcionamiento de la célula orgánica.....	43
Figura 23. Estructura interna de una célula Grätzel.....	46
Figura 24. Electrodo TiO ₂ -CuO.	47
Figura 25. Prendas de ropa que integran células orgánicas.	48
Figura 26. Estructura atómica de una perovskita híbrida ABX ₃	49
Figura 27. Técnicas de deposición de perovskita sobre las células fotovoltaicas. ...	50
Figura 28. Estabilidad de la célula de perovskita después de 600 horas.	51
Figura 29. Huerto solar Topaz, situado en California.	54
Figura 30. Gama de las tejas solares de Tesla.	54
Figura 31. Catamarán ECOCAT, totalmente eléctrico.....	56
Figura 32. Aproximación de la potencia ideal según Abella.....	58
Figura 33. Cálculo de la temperatura de célula.	58
Figura 34. Aproximación de la Isc según Abella.....	59
Figura 35. Aproximación de la Voc según Abella.	59
Figura 36. Circuito equivalente de la célula según Wagner.....	60
Figura 37. Cálculo de la Rpv según Wagner.....	60
Figura 38. Aproximaciones de Wagner.	61
Figura 39. Cálculo de las características según Wagner.....	61
Figura 40. Cálculo de la resistencia serie Rs.	62

Figura 41. Primer paso para la adquisición de datos de Meteonorm.	64
Figura 42. Segundo paso para la adquisición de datos de Meteonorm.	65
Figura 43. Tercer paso para la adquisición de datos de Meteonorm.....	66
Figura 44. Cuarto paso para la adquisición de datos de Meteonorm.	67
Figura 45. Quinto paso para la adquisición de datos de Meteonorm.	67
Figura 46. Estructura del script principal de la simulación de una célula.	69
Figura 47. Menú para la introducción de parámetros en STC de la célula.....	70
Figura 48. Menú para la introducción de las entradas del sistema.	71
Figura 49. Asignación de los valores característicos a las entradas de Simulink.	72
Figura 50. Modelo matemático implementado en Simulink.	74
Figura 51. Implementación del modelo de simulación en Simulink.....	75
Figura 52. Bloque de Simulink denominado célula solar.....	75
Figura 53. Datasheet de la célula solar C60 de Sunpower.....	76
Figura 54. Menú para la introducción de parámetros de célula y entradas.....	77
Figura 55. Resultados de la simulación de la célula de Sunpower.	77
Figura 56. Curvas características de la célula simulada.	78
Figura 57. Transcripción de entradas a nivel de célula.....	83
Figura 58. Bloque de Simulink denominado Panel Fotovoltaico.	84
Figura 59. Modelo del panel fotovoltaico en Simulink.	85
Figura 60. Datasheet del panel I-106/12 de Isofoton.	85
Figura 61. Menú para la introducción de parámetros del panel y entradas.....	86
Figura 62. Resultados de la simulación del panel de Isofoton.....	86
Figura 63. Curvas características del panel simulado.....	87
Figura 64. Menñu para indicar la unidad de tiempo.	90
Figura 65. Selección del fichero de datos a cargar en la simulación.....	90
Figura 66. Bloque de Simulink denominado Instalación Fotovoltaica.	92
Figura 67. Selección para la simulación de una instalación fotovoltaica.	93
Figura 68. Seguimiento de la temperatura ambiente utilizada en la simulación.....	93
Figura 69. Seguimiento de la irradiancia utilizada en la simulación.....	94
Figura 70. Seguimiento de la potencia ideal aproximada por hora.....	94
Figura 71. Seguimiento de la potencia ideal simulada por hora.....	94
Figura 72. Seguimiento de la potencia real simulada por hora.....	95



3. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La energía solar fotovoltaica se considera hoy en día una de las formas de extracción energética más limpia y con más futuro en el panorama actual y en un futuro próximo. Esta metodología se ha desarrollado con un gran crecimiento en la última década, debido a que su fuente principal de energía es el sol, fuente ilimitada. Además, la fabricación de dispositivos solares fotovoltaicos se ha ido abaratando a medida que se iban desarrollando nuevos y mejores métodos de desarrollo para su obtención masificada. En un futuro próximo, se espera que las energías renovables acaben con las energías fósiles que están actualmente dominando el mercado energético, ya que están contribuyendo de forma nefasta al calentamiento global presente en nuestras vidas, de forma más intensa a medida que discurren los años.

Gracias a grandes asociaciones que se oponen a las energías fósiles que aportan estos altos niveles de contaminación a nivel mundial, las personas se están concienciando de los terribles efectos que pueden suceder si se sigue con esta filosofía energética. Es por ello, que gobiernos y personas influyentes en nuestra sociedad están empezando a promover las energías renovables y sobre todo la fotovoltaica. Es tal la movilización de los últimos años, que según las previsiones de la AIE, la electricidad que proviene del sector fotovoltaico puede llegar a suponer hasta un 15% del total de la demanda energética a nivel mundial en el año 2050. Cabe destacar, que aunque el futuro de esta tecnología sea prometedor, su desarrollo eficaz depende de otros factores, tales como los legislativos, reglamentarios o económicos. Es por ello, que la investigación en este sector no debe cesar y debe seguir en busca de mejoras cualitativas para obtener dispositivos eficientes, económicos, altamente estables y fiables para la gran mayoría de la población mundial.

Una vez situado el panorama actual y las previsiones de futuro de la energía solar fotovoltaica, paso a describir brevemente los objetivos a cumplir en el presente trabajo.

El objetivo de este proyecto es analizar las tecnologías actuales de célula que se están empleando en el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos con el fin de conseguir altas eficiencias a precios competitivos. Para ello se analizarán los materiales empleados actualmente para dicha fabricación y las investigaciones que se están desarrollando para mejorar estos dispositivos. Además, se desarrollarán tres programas para la posible simulación de células, paneles e instalaciones fotovoltaicas ante entornos climáticos cambiantes, con posibilidad de observar las curvas I-V y P-V del dispositivo que se quiera simular. Además se obtendrá la máxima potencia que es capaz de aportar la célula, el panel o instalación ante dichas condiciones ambientales, bajo un modelo de simulación.



4. ESTADO DEL ARTE DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

4.1. ENERGÍA SOLAR Y SISTEMA FOTOVOLTAICO

La energía solar fotovoltaica es una fuente de corriente continua, la cual utiliza materiales semiconductores en la construcción de las células solares para que de esta forma, cuando el sol incide sobre la superficie de las mismas, los fotones del haz de luz incidente sean capaces de generar la circulación de corriente eléctrica a través de estos dispositivos. Esta metodología consiste en la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica, la cual ocurre en el elemento básico de una instalación solar fotovoltaica, la célula solar.

Esta conversión energética se denomina efecto fotovoltaico, y es la capacidad que tienen algunos materiales para absorber los fotones de la luz solar. Seguidamente, estos fotones excitan los electrones que forman el material absorbedor y mediante la movilidad de los mismos se produce el flujo de corriente eléctrica, que posteriormente se aprovechará para abastecer a dispositivos y aplicaciones que requieran de este tipo de energía.

Esta forma de obtención de energía presenta ventajas e inconvenientes en el ámbito económico, infraestructural, técnico y social.

Ventajas:

- Es respetuosa con el medio ambiente.
- No produce residuos contaminantes cuando el ciclo de vida de la instalación llega a su fin.
- Emplea una fuente de energía renovable, ya que el Sol es un método infinito de abastecimiento energético sin degradación.
- Las instalaciones fotovoltaicas se pueden situar en cualquier entorno en el cual se garantice una mínima incidencia solar sin grandes impactos sociales.
- Operan a la temperatura ambiente.
- El mantenimiento de las instalaciones solares es mínimo ya que existen pocos elementos móviles.
- El ciclo de vida de los elementos empleados en las instalaciones es relativamente alto, pudiendo llegar hasta los 20 o 25 años de operación.
- Los costes económicos actuales de la energía solar fotovoltaica son asequibles y fácilmente abordables por la mayoría de las personas e instituciones públicas.

Desventajas:

- Las instalaciones fotovoltaicas son totalmente dependientes de la irradiancia solar.
- Aumento del coste de la instalación al tener que emplear baterías de energía para satisfacer la demanda energética en momentos en los que la irradiancia solar no esté disponible.
- La irradiancia solar no es uniforme en toda la geografía mundial, habiendo zonas más favorables a la instalación de este tipo de forma de obtención energética, y otras que no lo son tanto.
- La eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos actualmente se encuentra entorno al 15%-20%.
- La inversión inicial para poder implementar una instalación fotovoltaica completa es elevada.
- Cuanta mayor sea la energía que se quiere obtener a partir de esta tecnología, el área cubierto por los paneles solares de la instalación fotovoltaica aumenta.

Para poderse llevar a cabo la extracción de energía mediante este método de obtención de la misma, se necesita la disposición de una instalación fotovoltaica completa, denominado *sistema fotovoltaico*.

La energía solar está preparada para un amplio abanico de aplicaciones en las cuales se necesita la electricidad como medio de funcionamiento energético. Dentro de este gran panorama de posibilidades se encuentran dos grandes grupos de aplicaciones, aquellas que no están conectadas a la red eléctrica urbana, denominados los *sistemas autónomos*, y por otro lado, los que sí que se encuentran conectados a la red, denominados *sistemas conectados a red*.

Una de las principales características de la energía solar fotovoltaica es que, como ya he citado anteriormente, depende primordialmente de la presencia solar que haya en el lugar en el que se disponga la instalación. La irradiancia del sol sobre la superficie de los paneles de la instalación fotovoltaica genera una corriente proporcional a este parámetro. Es por ello, que en aplicaciones nocturnas, tal como la iluminación, se debe disponer de un sistema de almacenamiento de la energía que se haya producido durante el periodo diurno y no se haya consumido.

Además, como bien se sabe, existen dispositivos que trabajan mediante energía continua y energía alterna, por lo que la instalación solar debe aportar energía fiable y eficiente para ambos tipos de elementos eléctrico-electrónicos. Para ello, en la instalación se debe establecer un *regulador* y un *inversor* respectivamente.

Entonces, cualquier instalación fotovoltaica que se desee implementar en cualquier ámbito, debe integrar al menos, los siguientes componentes:

- **Generador fotovoltaico:** dispositivo encargado en la transformación de energía solar en energía eléctrica. Este elemento generador suele formarse por paneles o asociación de paneles, que a su vez, cada panel se forma a partir de la asociación de células fotovoltaicas, las cuales, son el elemento básico de la tecnología fotovoltaica.
- **Batería:** elemento indispensable de la instalación fotovoltaica, que se va a encargar de almacenar la energía que se ha producido durante el día y poder emplearla en el periodo nocturno o en momentos en los cuales, las condiciones meteorológicas o ambientales no sean las idóneas para producirse el efecto fotovoltaico de forma eficiente.
- **Regulador de carga:** componente que protege a la batería de posibles sobrecargas y que abastece de energía continua fiable a la posible carga que emplee este tipo de abastecimiento energético.
- **Inversor:** dispositivo de potencia que va a transformar la energía continua obtenida de los paneles en energía alterna. Elemento que se encarga entonces de la conversión energética CC-CA.
- **Carga:** las diferentes aplicaciones y dispositivos a los que se tiene que abastecer energéticamente con la instalación fotovoltaica.

En la figura [1] se muestra el esquema básico de un sistema fotovoltaico completo sin conexión a la red eléctrica.

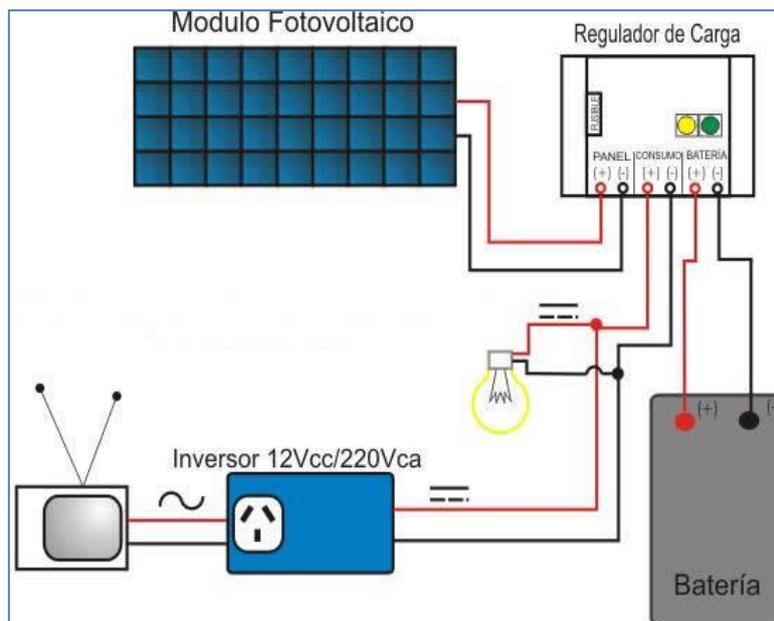


Figura 1. Esquema básico de una instalación fotovoltaica.

4.2. LA CÉLULA SOLAR

4.2.1. INTRODUCCIÓN

La célula solar es el elemento principal y básico que forma parte de una instalación fotovoltaica. Este dispositivo es el encargado de la generación de la energía eléctrica a partir de los fotones solares incidentes en su superficie. Esto se consigue gracias al efecto fotovoltaico, el cual consiste en la generación de corriente eléctrica a partir de la descolocación de los electrones del material semiconductor que conforma la célula.

Este básico dispositivo se comporta, ante esta situación, como un diodo, el cual es un componente electrónico con una unión P-N, que permite la conducción eléctrica en un único sentido. La parte N de la célula es la que se encuentra expuesta a la luz solar, y la parte P de la unión es la situada en el lado opuesto, en la oscuridad. Es por ello, que la zona N del dispositivo no es opaca y permite el paso de la luz del Sol, la estructura de esta zona es entonces, en forma de peine metálico. En cambio, la zona P de la célula se encuentra totalmente recubierta por metal ya que en ella no incide ningún tipo de fuente luminosa.

La estructura típica de este dispositivo se puede apreciar en la figura [2], la cual se muestra a continuación.

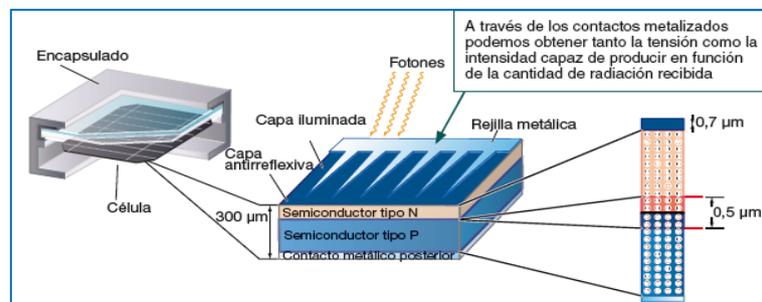


Figura 2. Estructura típica de una célula fotovoltaica.

4.2.2. TEORÍA DE SEMICONDUCTORES Y FUNCIONAMIENTO

Una vez introducido el concepto de célula solar, es importante entender el funcionamiento interno que poseen estos dispositivos. Para ello, se va a explicar brevemente la teoría de semiconductores, que como bien se sabe, las células solares fotovoltaicas están compuestas por este tipo de material.

Todos los materiales están formados por un conjunto de átomos, siendo los sólidos, aquellos que poseen una mayor cantidad en su composición. Debido a esta cantidad de átomos que presenta cada elemento sólido, los niveles de energía que lo forman constituyen unas bandas continuas de energía. De este modo es como



surge el concepto de *modelo de bandas de energía*. Es por ello, que a partir de ahora, cualquier sólido se va a poder representar por las diferentes bandas de energía que lo constituyen y dicho número de bandas va a depender de la cantidad de electrones que abarque el material que sea objeto de estudio.

Un sólido, según el *modelo de bandas de energía*, van a constituirse por tres diferentes bandas. La primera de ellas es la *banda de valencia*, la cual va a estar completamente ocupada por los electrones de los átomos que forma el material. La segunda franja de energía es la *banda de conducción*, la cual va a estar parcialmente o completamente vacía de estos electrones. Y por último, cada material sólido va a presentar la *banda prohibida*, la cual sirve de separación entre las dos bandas anteriormente citadas.

Esta última banda, la *banda prohibida*, va a ser la que va a definir las características eléctricas del material. Ya que estas propiedades van a depender única y exclusivamente de la posición relativa entre la *banda de conducción* y la *banda de valencia*. Teniendo en cuenta la anchura de esta *banda prohibida*, todos los sólidos se pueden clasificar eléctricamente en tres grandes subgrupos: conductores, semiconductores o aislantes.

Como los materiales que componen las células fotovoltaicas son los semiconductores, la explicación que realice a continuación será basándome en dichos materiales de interés.

La anchura de la *banda prohibida* nos va a aportar la idea de la cantidad de energía que es necesaria aplicar al material para que un electrón promocione desde la *banda de valencia* a la *banda de conducción* y así conseguir un movimiento de los electrones del material generando una corriente eléctrica. Esta energía, en los semiconductores va a ser relativamente baja, ($E_g < 5\text{eV}$), de tal manera que los electrones van a promocionar entre bandas de forma relativamente fácil y sin un aporte excesivo de energía.

Entonces, al aportar una energía superior al ancho de banda prohibida del material, se va a conseguir una generación de corriente, pero que a su vez va a ser aleatoria y sin dirección fija aparente. Por este fenómeno, los materiales semiconductores se van a dopar y de esta forma poder tener control sobre la magnitud y dirección de la intensidad generada.

En primer lugar, un semiconductor dopado con átomos de fósforo, material que posee un electrón de valencia más que el silicio, se va a necesitar una pequeña aportación energética para que ese electrón excedente se libere y promocione a la *banda de conducción*. Al liberarse este electrón, la carga positiva se queda asociada a la red cristalina del material semiconductor original. Como resultado, mediante este proceso se ha obtenido un semiconductor de tipo n, caracterizado

por una densidad de electrones superior a la de huecos y por ser el electrón el portador mayoritario de energía.

En segundo lugar, un semiconductor dopado con átomos de boro, material con un electrón de valencia menos que el silicio, va a tener como resultado un semiconductor de tipo p. Este tipo de semiconductor va a presentar una densidad de huecos mayor a la de electrones y la red cristalina va a poseer una carga negativa asociada, siendo el portador mayoritario de energía, los huecos.

Uniendo estos dos cristales anteriormente explicados, uno de tipo n con otro de tipo p, se consigue crear un desequilibrio ocasionado por la diferente concentración de electrones y huecos que existe en cada cristal. Para reestablecer el equilibrio se produce la difusión de portadores mayoritarios, es decir los electrones circulan desde el cristal n al cristal p y los huecos desde el cristal p al cristal n, situación en la que la corriente es nula. Seguidamente, para conseguir la circulación de corriente a través de esta unión p-n es necesario romper el equilibrio y reducir el valor del potencial termodinámico del material semiconductor. Para obtener esta situación, la unión p-n se debe polarizar mediante una diferencia de tensión de tal forma que el cristal p adquiera un potencial positivo con respecto al lado n, de esta forma el semiconductor estará polarizado en directa.

Consiguiendo esta configuración, el material formado por los dos tipos de semiconductores, se va a conseguir la circulación de una corriente neta que será totalmente aprovechable, entrando dicha corriente por la zona p del semiconductor y saliendo por la zona n del mismo.

Entonces, gracias al efecto fotovoltaico, descubierto por Albert Einstein, se va a obtener una corriente generada por la incidencia de los fotones de la luz solar sobre la superficie formada por el cristal semiconductor anteriormente explicado. Esta intensidad se va a denominar fotocorriente o corriente fotogenerada, pero que se va a ver contrarrestada por la corriente de oscuridad, debido a los procesos internos de recombinación indeseada de portadores de energía. Teniendo en cuenta esto, la corriente neta o total generada a partir de la célula solar se corresponde con la fórmula descrita en la figura [3] que se muestra a continuación.

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$

Figura 3. Corriente total generada por la célula solar.

A su vez, esta corriente fotogenerada va a depender de la frecuencia de los fotones incidentes, pudiendo estos clasificarse en dos grandes grupos. Un fotón se considera poco energético si su energía es menor a la energía del ancho de banda de la *banda prohibida*, y por tanto no será aprovechable para la generación de corriente y se contabiliza como pérdida de no absorción. Por otro lado, si el fotón posee una energía superior a la energía del ancho de banda de la *banda prohibida*,

puede ser capaz de contribuir en la generación de corriente. Pero no todos los fotones incidentes con la energía adecuada son absorbidos por el material semiconductor, ya que hay algunos de ellos que son absorbidos pero se recombinan en el interior de la célula, estos constituyen las pérdidas de recombinación. Otro tipo son aquellos que poseen mucha energía pero atraviesan totalmente el cristal semiconductor sin interactuar, los cuales constituyen las pérdidas de transmisión. Por último, debido a la diferencia entre los índices de refracción del aire y el dispositivo fotovoltaico provoca las pérdidas por reflexión.

Todos estos tipos de fotones y pérdidas contabilizadas mencionadas anteriormente se recogen en la figura [4] mostrada a continuación.

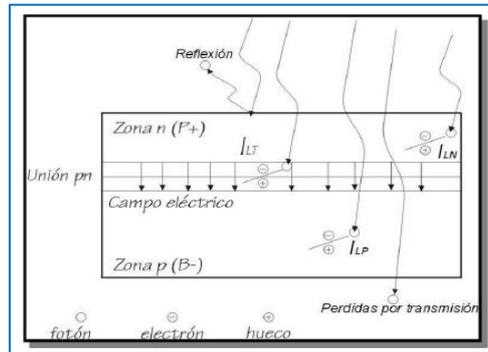


Figura 4. Diferentes pérdidas energéticas para la fotogeneración de corriente.

4.2.3. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA CÉLULA SOLAR

Una vez entendido el funcionamiento y las consideraciones físicas que rigen el comportamiento de la célula fotovoltaica, se van a describir cada uno de sus parámetros fundamentales.

- Corriente fotogenerada o fotocorriente (I_L): es la intensidad que se produce cuando la irradiación solar incide sobre la zona N de la célula fotovoltaica.
- Corriente de oscuridad (I_D): intensidad que posee sentido opuesto a la corriente fotogenerada y es debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se produce en el interior del material semiconductor de la célula fotovoltaica.
- Corriente neta (I): suma algebraica de la fotocorriente y la corriente de oscuridad.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): la máxima tensión que puede aparecer en los terminales de la célula. Este término se obtiene cuando la célula fotovoltaica no es conectada a ninguna carga externa.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): máximo valor de corriente que puede circular por la célula. Este término es obtenido cuando los terminales de la célula se encuentran cortocircuitados.

- Potencia máxima (PM): producto de la corriente máxima que puede circular por la carga y la tensión máxima que puede darse en los terminales de la célula.
- Factor de forma (FF): relación que hay entre la potencia máxima real que se puede entregar a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}).

4.2.4. CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LA CÉLULA SOLAR

Una vez conocidos los parámetros fundamentales de la célula, se reescribirá la fórmula que representa la corriente generada por dicha célula, de tal forma que se pueda incluir en esta nueva ecuación los parámetros de tensión de circuito abierto (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}). En la figura [5] se puede observar dicha ecuación.

$$I = I_{sc} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{e \cdot (V_{oc} - V)}{m \cdot k \cdot T_c}\right) \right]$$

Figura 5. Corriente total generada por una célula solar en función de V_{oc} e I_{sc} .

Al obtener esta ecuación, cabe destacar que será necesario obtener un circuito eléctrico equivalente para poder analizar el comportamiento del conjunto que forma la célula fotovoltaica.

En primer lugar, la corriente fotogenerada o fotocorriente se representará mediante un generador de corriente, mientras que la intensidad de oscuridad se representará en el esquema eléctrico mediante un diodo. Por otro lado, cabe destacar que se debe incluir una resistencia serie en el circuito que represente la resistencia debida a los contactos metálicos del semiconductor y a la malla metálica que envuelve la célula fotovoltaica. Además, también se debe incluir una resistencia paralelo para tener en cuenta y representar las posibles fugas de corriente que pueden darse en los bordes de la célula, los posibles cortocircuitos metálicos y la recombinación favorecida en las fronteras de grano del cristal. Incluyendo estas resistencias en la ecuación de la figura [5], se obtendrá la siguiente ecuación que se ve representada en la figura [6].

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

Figura 6. Ecuación de la corriente generada por la célula con efectos de R_s y R_p .

Una vez considerados todos los anteriores y posibles efectos, en la actualidad existen dos circuitos eléctricos equivalentes de la célula fotovoltaica. El primero de ellos es el más típico y fácil de simular en cualquier entorno software por su fácil implementación. Este modelo solamente incluye un diodo representando la

corriente de oscuridad anteriormente explicada. Dicho circuito equivalente se muestra a continuación en la figura [7].

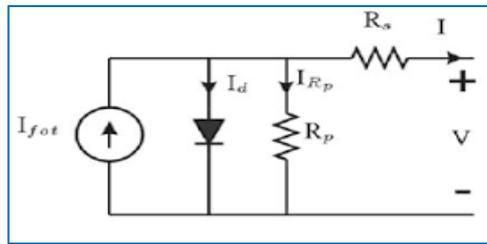


Figura 7. Circuito equivalente de la célula con un diodo.

Por último, en la figura [8], se mostrará el segundo posible circuito equivalente de la célula, en el cual se utilizan dos diodos para simular la corriente de oscuridad.

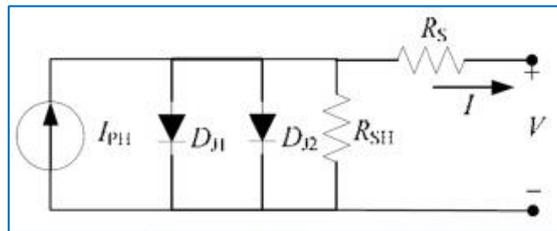


Figura 8. Circuito equivalente de la célula con dos diodos.

4.2.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA CÉLULA SOLAR

Para caracterizar cada célula fotovoltaica, existen dos curvas representativas de su comportamiento ante diferentes condiciones ambientales y diferentes puntos de funcionamiento, que son la curva I-V y la curva P-V.

4.2.5.1. Curva I-V de la célula solar

En esta gráfica lo que se va a representar es la corriente de la célula en el eje Y de la gráfica y la tensión de los terminales de la célula en el eje X. Se corresponderá con el funcionamiento de la célula entregando corriente a una carga bajo tensión positiva, es decir, corresponde con el funcionamiento del dispositivo como generador de energía. Esta curva se observa en la figura [9].

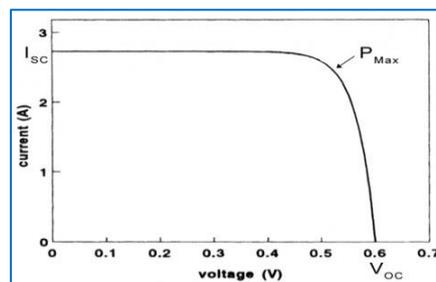


Figura 9. Curva I-V de la célula solar.

4.2.5.2. Curva P-V de la célula solar

En esta curva característica de la célula solar se va a representar la potencia generada por el dispositivo en función de la tensión de célula que exista en cada momento. Esta gráfica se va a mostrar a continuación en la figura [10].

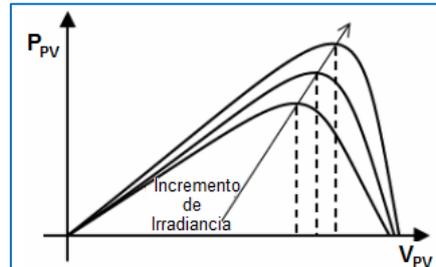


Figura 10. Curva P-V de la célula solar.

4.2.6. MODIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LA CÉLULA SOLAR

Para comprender correctamente el funcionamiento de la célula solar fotovoltaica, se debe tener en cuenta el efecto de la irradiancia solar sobre la superficie de la misma y la temperatura ambiental en la que se encuentre ubicada la célula, ya que influye sobre la temperatura de operación.

4.2.6.1. Influencia de la temperatura

Debido al aumento de la temperatura, se va a conseguir un incremento de la fotocorriente de la célula, ya que la *banda prohibida* de la célula se va a estrechar y a su vez, hace que fotones menos energéticos sean absorbidos por el dispositivo y por tanto, pasen a ser aprovechables para generar esta corriente. Dependiendo de la tecnología de célula esta influencia de la temperatura va a ser más abrupta o ligera.

Además, la temperatura va a influir en la tensión de célula, siendo esta influencia más notable que la anterior. La tensión de circuito abierto (V_{oc}) de una célula de silicio va a decrecer 2.3mV por cada grado centígrado que aumenta la temperatura.

Otro parámetro que se va a ver afectado por la temperatura es el factor de forma (FF), el cual se va a ver decrementado, aunque no va a ser muy notable a temperaturas inferiores a los 200°C.

Por último, sobre el rendimiento energético de la célula solar también va a tener influencia la temperatura, viéndose reducido entre 0.4-0.6 puntos porcentuales por cada grado centígrado que aumente la temperatura de funcionamiento del dispositivo.

En la figura [11] se muestran graficados los efectos de la temperatura sobre las curvas I-V y P-V de la célula solar anteriormente explicadas.

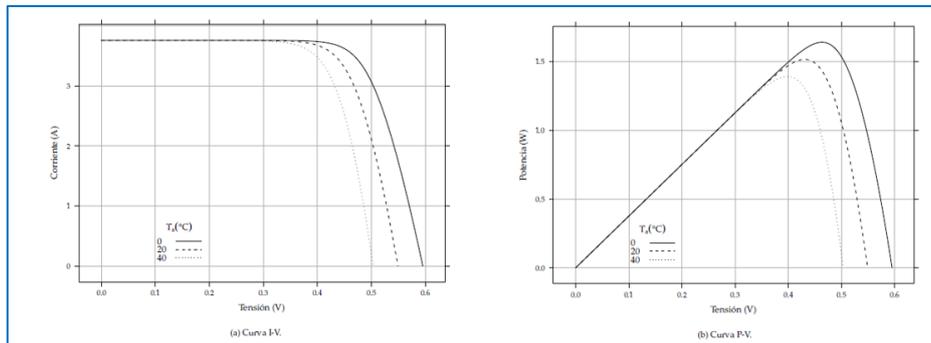


Figura 11. Influencia de la temperatura en las curvas características.

4.2.6.2. Influencia de la irradiancia

Como bien se ha explicado anteriormente, la fotocorriente de las célula solar es directamente proporcional a la intensidad de la radiación solar incidente en la superficie de las mismas. Gracias a esta proporcionalidad se puede plantear que si la corriente fotogenerada al nivel definido como la unidad ($1 \text{ Sol} = 100 \text{ mW/cm}^2$) es I_{L1} , la fotocorriente generada a un nivel de iluminación X veces superior es $I_L = X \cdot I_{L1}$.

Además, si V_{oc1} es la tensión en circuito abierto de una célula solar a 1 Sol de irradiancia, la tensión a X soles será $V_{oc} = V_{oc1} + m \cdot kT / e \cdot \ln(X)$.

Observando de esta manera, que al aumentar la intensidad de la iluminación incidente en la célula solar, aumenta la tensión en circuito abierto y la corriente fotogenerada, despreciando una pequeña disminución del factor de forma de la célula (FF), el rendimiento del dispositivo aumentará acorde al crecimiento de la irradiancia sobre la superficie fotosensible del dispositivo fotovoltaico hasta unos límites fijados por las resistencias serie y paralelo.

En la figura [12] se muestran graficados los efectos de la irradiancia sobre las curvas I-V y P-V de la célula.

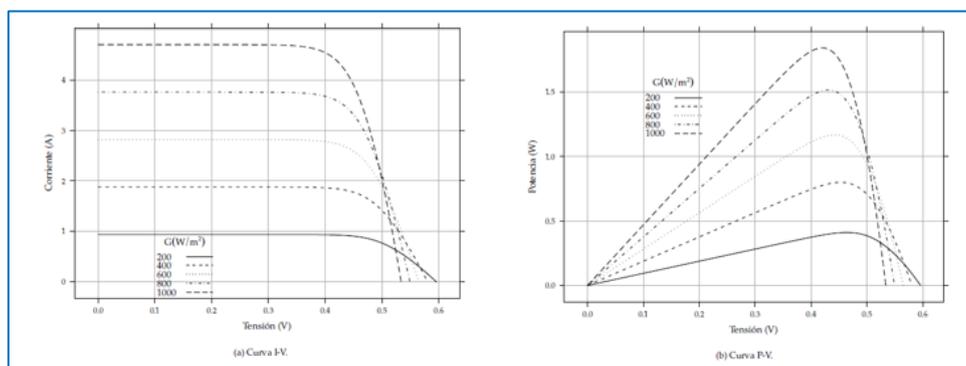


Figura 12. Influencia de la irradiancia en las curvas características.

4.2.7. FORMAS DE ASOCIACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES

Una vez parametrizada y estudiada la célula solar, cabe decir que los elementos fotovoltaicos que se observan en cualquier instalación están formados por varias células y se denominan paneles solares. Por tanto, un módulo solar es el elemento formado por varias células conectadas eléctricamente, encapsuladas y situadas en un marco o soporte metálico. Estos paneles son los que se encuentran disponibles en el mercado fotovoltaico y se ofertan indicando la tensión a la que trabajan, siendo valores típicos los 6V, 12V o 24V.

Para constituir los denominados paneles o módulos fotovoltaicos, las células solares se asocian entre ellas en paralelo o en serie, teniendo efectos distintos en las características finales del módulo formado.

4.2.7.1. Asociación de células en paralelo

Cuando las células fotovoltaicas se asocian en paralelo para formar un panel o módulo solar, la célula equivalente de dicha asociación va a poseer una corriente mayor, siendo la suma de las corrientes características generadas por cada una de las células que lo componen. Por otro lado, la tensión total será la característica de una de ellas.

4.2.7.2. Asociación de células en serie

Sin embargo, cuando las células fotovoltaicas se asocian en serie para formar un panel o módulo solar (array), la célula equivalente de dicha asociación va a poseer una tensión mayor, siendo la suma de las tensiones aportadas por cada una de las células que lo componen. Por otro lado, la corriente total se limitará a la intensidad de la célula que sea capaz de aportar la menor corriente.

En la figura [13] se muestra el resultado de los dos posibles tipos de asociación de célula para conformar un panel o modulo fotovoltaico.

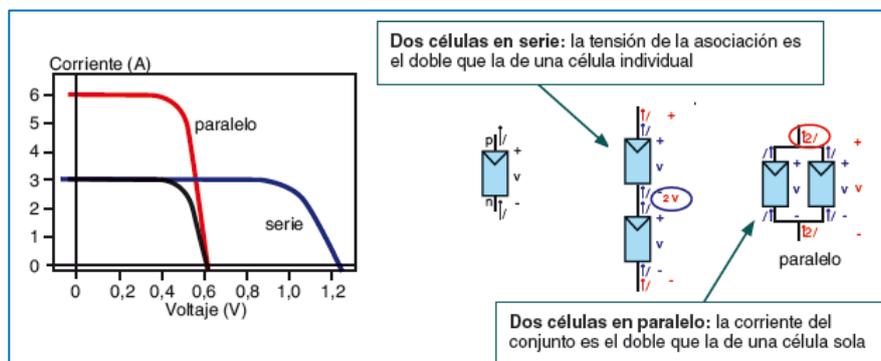


Figura 13. Asociación serie y paralelo de células.



4.2.8. FABRICACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES

Existen numerosas tecnologías de fabricación de dispositivos fotovoltaicos que persiguen mejorar la eficiencia de la célula, abaratar coste o la combinación de ambos aspectos. De forma independiente de cual sea la tecnología empleada, en todos y cada uno de ellos se realizan los pasos que se van a explicar brevemente a continuación.

1. Elección del sustrato

Para la conformación de una célula fotovoltaica de silicio, este material debe poseer una pureza de *grado solar* o superior, y de esta manera obtener una alta eficiencia y las óptimas condiciones eléctricas en nuestro dispositivo.

Una vez escogido este silicio con el grado de pureza citado, se corta en láminas cuadradas de dimensiones estándar (15cm x 15cm) con un espesor de 200 μm , se pule y posteriormente se limpia químicamente para eliminar impurezas indeseadas.

2. Texturizado de la superficie frontal para reducir la reflexión de la luz

Para evitar un incremento de las pérdidas por reflexión que ocurre en todas las células solares, la oblea se somete a un proceso denominado *texturización*, el cual consiste en aplicar un ataque químico selectivo que deja la superficie fotosensible con una estructura de pirámides de diferentes tamaños. Esas formas específicas son las que permiten reducir dichas pérdidas por reflexión de los fotones incidentes.

3. Formación del emisor mediante difusión de átomos de fósforo

La célula solar, como ya se ha explicado, es una unión de dos zonas, denominadas *base* y *emisor*, en las que se presentan impurezas negativas en el emisor y positivas en la base. Este proceso se denomina dopado.

En la base se aplican impurezas de boro que aportan huecos y se realiza en el proceso de obtención del sustrato. Mientras que para formar el emisor de la célula solar se aplican impurezas de fósforo, de tal manera que se suministran electrones. Este proceso se realiza en hornos de alta temperatura (800-900°C) en los cuales se sitúa el sustrato y se hace circular un gas (PSG) que contiene fósforo, haciendo de esta manera que dicho compuesto se adhiera a la superficie texturizada de la célula, formando así el emisor de la misma.

4. Depósito de capas antirreflejantes y formación del contacto frontal

Después de la formación del emisor, se pasa a la formación de capas antirreflejantes para reducir aún más la reflexión frontal que se da lugar en las células. Para ello, se depositan capas muy finas de materiales como el SiO_2 o el

SiN_x, que actúan como capas antirreflejantes y se depositan por medio de técnicas fisicoquímicas, denominadas generalmente CVD.

Una vez formadas estas capas, se pasa a la fabricación del contacto frontal de la célula sobre el emisor de la misma mediante técnicas de serigrafía.

5. Contacto trasero

Por último, y para concluir el proceso de fabricación de la célula solar fotovoltaica se implementa el contacto trasero del dispositivo. Para ello se cubre toda la superficie de la parte trasera de la célula mediante una pasta metálica y se somete a un calentamiento a altas temperaturas para que el metal del contacto se adhiera firmemente al silicio o material de la célula.

4.2.9. CLASIFICACIÓN DE LAS CÉLULAS SOLARES

En la actualidad, existe una gran variedad de materiales destinados a la fabricación de células solares, diferentes tecnologías de fabricación y diferentes aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. Es por ello, que es necesario clasificar las células solares para poder abarcar y tener una visión general del panorama actual de la solar fotovoltaica.

A continuación se van a tomar diferentes perspectivas de clasificación.

4.2.9.1. Clasificación según la estructura interna de la célula

Dependiendo de la disposición de la red cristalina de los materiales que se emplean en la fabricación de células solares, se puede realizar la siguiente clasificación de las mismas:

- Células monocristalinas

Son aquellas células que están formadas por materiales monocristalinos, los cuales se forman a partir de una semilla que posee una red cristalina definida. Una vez constituido este material monocristalino se corta en obleas y se dopa mediante difusiones, para así obtener una unión p-n que pueda actuar como semiconductor. Este tipo de células se caracteriza por poseer una elevada eficiencia energética, pero obtenidas mediante un costoso y lento proceso de fabricación.

- Células multicristalinas

Estas células poseen una estructura multicristalina y poseen una eficiencia energética inferior a las células anteriores. Pero el coste de fabricación de las mismas es menor y se obtienen de una forma más rápida. La estructura interna de



los materiales de este tipo de células está conformada por infinidad de granos o cristales de gran tamaño y su orientación es aleatoria.

- Células policristalinas

El concepto de células multicristalinas y policristalinas se ha estado utilizando indistintamente. La diferencia entre ambas es el tamaño de los cristales presentes en la estructura interna del material que forma la célula, ya que los granos de las células policristalinas poseen un tamaño menor, entorno a la micra. Mientras que el tamaño de grano de las células multicristalinas se encuentra entorno al centímetro.

- Células híbridas

Actualmente, muchas células están formadas a partir de sustratos o capas monocristalinas, a los que posteriormente se les añade una capa de otro material policristalino. A este tipo de células se las denomina híbridas y se realizan mediante diversos materiales para favorecer las características eléctricas y económicas del conjunto.

- Células amorfas

Hoy en día, el único material que se ha empleado en este estado es el silicio. Esta disposición de la estructura interna del material que conforma la célula solar no sigue ningún patrón de ordenación atómico y se emplea para abaratar aún más el coste de fabricación de las células. Como punto negativo, estas células presentan un decremento notable en su eficiencia durante los primeros meses de operación.

4.2.9.2. Clasificación según la composición de la célula

A lo largo de los años, las mejoras tecnológicas han ido apareciendo sucesivamente y gracias a ello se han conseguido crear dispositivos complejos y muy sofisticados. En el sector de la fotovoltaica, uno de los mayores avances hasta la fecha ha sido el uso de diferentes materiales para formar un único elemento semiconductor. Basándome en ese aspecto se puede realizar la siguiente clasificación:

- Células basadas en homouniones

La unión p-n de estas células se realizan sobre un único material, añadiendo dopantes para poder generarla. La mayoría de las células de silicio empleadas en la actualidad están formadas por este tipo de unión.

- Células basadas en heterouniones

En estas células, los materiales empleados a ambos lados de la unión p-n son completamente distintos, de diferente naturaleza y provenientes a través de distintas tecnologías de fabricación. Es común combinar materiales policristalinos con materiales de película delgada.

Además, es común encontrarse con células en las que pueden coexistir diversas uniones p-n. En base a este aspecto, se pueden clasificar las células de la siguiente forma:

- Células de unión simple

En estas células solares solo existe una unión p-n en el material semiconductor que las forma.

- Células multi-unión

El dispositivo se forma a base de varias uniones p-n superpuestas, las cuales pueden formar parte de una única célula o corresponder a distintas células situadas en una misma estructura.

A su vez, dependiendo del número de dispositivos que formen una misma estructura solar, se puede realizar la siguiente clasificación:

- Dispositivos monocélula

En estos elementos solo se emplea una única célula en la misma estructura. Se suele recurrir a materiales que posean una gran anchura de respuesta espectral y con un valor de ancho de banda prohibida adecuado para aprovechar un mayor rango del espectro solar.

- Dispositivos tándem o en cascada

Estos dispositivos se caracterizan por emplear dos o más células en una misma estructura. De esta forma se consigue un mayor aprovechamiento del rango espectral solar. Cada célula que forma esta estructura está especializada para obtener energía de un tramo diferente del rango total del espectro del Sol, siendo transparente al resto de tramos. Con estos dispositivos se ha conseguido aumentar significativamente la eficiencia de la conversión energética de las células tradicionales.

En la figura [14] se puede observar un dispositivo solar en cascada.

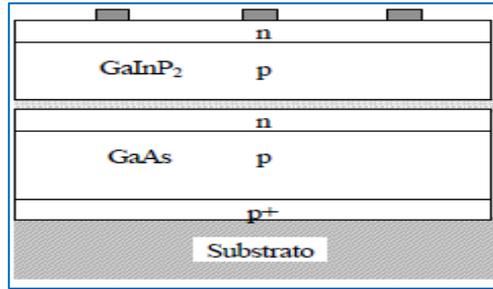


Figura 14. Dispositivo formado por dos células en cascada.

4.2.9.3. Clasificación según la aplicación de la célula

Debido al tipo de aplicación que debe satisfacer la célula solar, el diseño de las mismas y sus estructuras presentan una gran diversidad en su aspecto y tamaño. En base a esto se puede realizar la clasificación que se desarrolla a continuación en este apartado.

- Células para aplicaciones terrestres sin almacenamiento

Este tipo de célula empleado en la inmensa mayoría de las aplicaciones terrestres, reciben y transforman la luz solar directamente, sin ningún elemento añadido de almacenamiento o empleado en el aumento de la incidencia solar.

- Células para aplicaciones terrestres con almacenamiento

Las células destinadas a este tipo de aplicaciones se emplean en instalaciones en las cuales se busca aumentar el rendimiento de la conversión energética. Para ello se emplean dispositivos complementarios a las células como pueden ser los concentradores solares o mecanismos que buscan en todo momento el punto de máxima potencia. Con la implementación de estos elementos, aumenta notablemente el número de fotones incidentes en la superficie de las células solares y se aumenta notablemente la corriente fotogenerada.

- Células para aplicaciones espaciales

En el espacio, debido a las diferentes condiciones meteorológicas que existen con respecto a la Tierra, como puede ser el espectro solar, temperatura... la tecnología de célula que se emplea es mucho más sofisticada y preparada, sin preocuparse por el aspecto económico.

4.3. TECNOLOGÍAS DE CÉLULA EMPLEADAS EN LA ACTUALIDAD

4.3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS ALCANZADOS

Existe una gran variedad de tecnologías de célula empleadas en la energía solar fotovoltaica. Actualmente se están desarrollando tecnologías experimentales que pueden alcanzar hasta prácticamente un 50% de eficiencia en la conversión de energía solar en energía eléctrica, aunque estas tecnologías se encuentran aún en fase de investigación y se hablará de ellas más adelante en este documento. Las células con nuevos materiales están siendo investigadas para mejorar las prestaciones, la cuota de mercado y la sostenibilidad de estos sistemas de transformación energética. Pero hoy en día, todavía se sigue apostando en la mayoría de los casos por tecnologías tradicionales como son las células de silicio cristalino o las células de GaAs, aunque poco a poco van apareciendo más células que utilizan la tecnología de película delgada.

4.3.2. SILICIO CRISTALINO

4.3.2.1. Introducción

Actualmente, más del 85% de la producción mundial de módulos y células solares están constituidas por silicio monocristalino o policristalino. Esto es debido a que en los últimos años ha sido el material más desarrollado, estudiado e investigado en el ámbito de la fotovoltaica y de la industria de los semiconductores. Como consecuencia de esto, las herramientas para su producción a gran escala también han sido hábilmente desarrolladas desde hace años, arraigándose así fuertemente como primera fuente de material para la industria solar fotovoltaica.

Por otro lado, cabe destacar que el silicio presenta una gran desventaja con respecto a otros materiales para la misma práctica, y es que la banda prohibida de este material es indirecta, esto quiere decir que el coeficiente de absorción de fotones de la radiación solar es mucho menor que cualquier semiconductor que posea un coeficiente de absorción directo. Esta deficiencia se traduce en que el grosor de material va a tener que ser más elevado para poder absorber tanta energía como para poder superar la banda prohibida y así obtener la generación de fotocorriente.

4.3.2.2. Silicio monocristalino

En la actualidad, un significativo porcentaje de los módulos fotovoltaicos, en los que se emplea silicio como material semiconductor en las células solares que lo

componen, están formados por silicio monocristalino. Esto es debido a que presentan una alta eficiencia energética, entre el 20-25%.

Estas células de silicio monocristalino se obtienen mediante un método de fabricación denominado Czochralski, el cual consiste en la toma de una semilla de silicio monocristalino con una prefijada orientación cristalina. El lingote de silicio se introduce en un crisol y se calienta hasta llegar a los 1450°C, temperatura a la cual funde y la masa de silicio se va extrayendo, obteniendo así silicio monocristalino con orientación idéntica a la de la semilla.

En la figura [15] se muestra el dispositivo que se emplea en el proceso de fabricación de células monocristalinas.

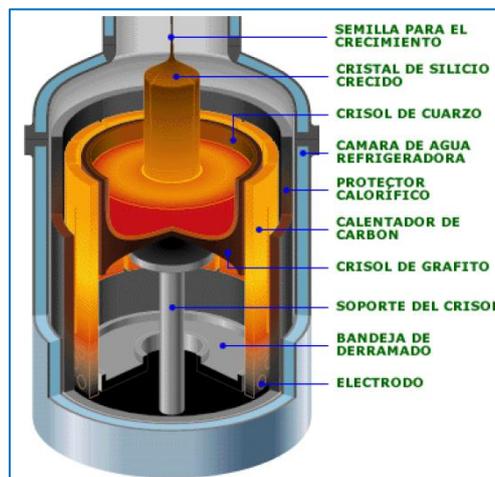


Figura 15. Técnica Czochralski.

Gracias a este proceso de fabricación se consigue un silicio monocristalino con una pureza óptima para su uso en fotovoltaica (99.9999999% [9N]).

Una vez obtenido este silicio monocristalino a través de esta técnica de fabricación, se aplican los dopantes pertinentes y se forman los contactos característicos para formar la célula de silicio monocristalino, la cual se caracteriza por ser rígida y con un gran espesor.

4.3.2.3. Silicio policristalino

Las células de silicio policristalino, como bien se ha expuesto antes, están compuestas por varios cristales que poseen diferente orientación. Como consecuencia de esto, la estructura final del silicio policristalino no es uniforme y en estas células se aprecian a simple vista la variedad de cristales que las forman. Esta tecnología se emplea actualmente en la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas a nivel mundial. En gran parte se debe a que el coste de fabricación es mucho menor que las células compuestas de silicio monocristalino. Además, la eficiencia que poseen no difiere tanto del rendimiento de las células formadas por

silicio monocristalino, ya que se encuentra alrededor del 16% actualmente, con unas perspectivas futuras de poder alcanzar hasta rendimientos del 22%.

El silicio policristalino generalmente se obtiene mediante el método Siemens, el cual consiste en calentar los lingotes brutos de silicio a una temperatura de 1150°C y exponiendo este material al triclorosilano, gas que se descompone depositando silicio adicional en la masa inicial del mismo material. Debido a este proceso de fabricación, los bloques de silicio resultantes presentan distintos cristales con diferentes orientaciones. En la figura [16] se puede observar el horno utilizado para la obtención de silicio policristalino mediante este método.

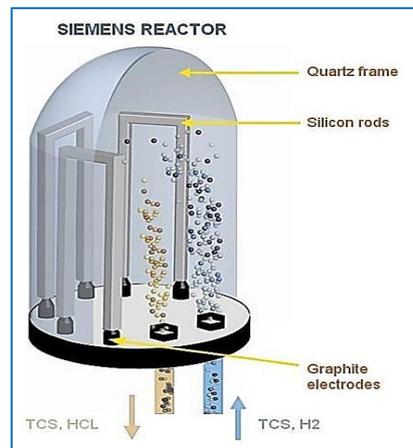


Figura 16. Horno Siemens.

Como desventaja, las células formadas con silicio policristalino, al tener una eficiencia inferior, será necesario emplear una mayor área para poder obtener la misma cantidad de energía producida mediante células de silicio monocristalino. Por último, cabe destacar que los paneles de silicio policristalino son fácilmente reconocibles ya que siempre poseen un tono azulado y que las células de este tipo son totalmente rectangulares, a diferencia de las monocristalinas que poseían las esquinas recortadas.

4.3.3. CÉLULAS DE PELÍCULA DELGADA

4.3.3.1. Introducción

Debido al gran espesor que es necesario para conformar células solares de silicio, surgió la investigación de materiales que necesitaran una capa fina de material y poder reducir de esta manera el coste de producción de nuevas células solares. Además se buscaba el aporte de nuevos materiales que consiguieran dotar a la célula solar fotovoltaica de una cierta flexibilidad. Gracias a esas investigaciones han surgido diferentes células basadas en diversos materiales semiconductores.



4.3.3.2. Células GaAs (Arseniuro de galio)

El arseniuro de galio es un compuesto semiconductor que posee un coeficiente de absorción directo y bastante elevado, por lo que el espesor de la célula de este material no va a ser tan elevado como el de las células de silicio. Su estructura cristalina es similar a la del diamante y a la del silicio cristalino, por lo que presenta un buen rendimiento energético. Este compuesto se puede obtener mediante diversas técnicas de fabricación, pero la más común es emplear un horno en el cual se introducen ambos compuestos. De esta forma, al evaporarse a una temperatura menor el arsénico, se adhiere al galio y forma el componente policristalino que se va a emplear para formar este tipo de células.

Las células que están compuestas por este material son capaces de alcanzar eficiencias del 30%, mediante dispositivos con un espesor en torno a 1-2 μ m. Además, los semiconductores III-V, grupo al que pertenecen tanto el arsénico como el galio, permiten unificarse obteniendo aleaciones eficientes. De este modo permiten la variabilidad del ancho de la banda prohibida y mediante un sutil ajuste de la unión fotovoltaica se pueden obtener unas eficiencias energéticas aún mayores. Por ejemplo, una aleación GaAs/GaSb obtuvo una eficiencia del 35.6% al implementar una célula solar con este material compuesto por esta unión.

Como desventaja, los sustratos que se utilizan en esta tecnología son aquellos en los que se emplea el germanio monocristalino (Ge) como componente principal y es un material caro, al igual que el proceso de crecimiento de la capa epitaxial. Estos factores influyen negativamente en el coste total de estas células y por ello, en aplicaciones terrestres aún se sigue apostando por otras tecnologías que nos aportan una eficiencia menor pero el coste de fabricación y de adquisición es también más económico.

Esta alta eficiencia y las altas prestaciones estabilizadas que reportan este tipo de células resultan atractivas para la solar fotovoltaica y se han empleado estos últimos años en aplicaciones espaciales, como puede ser la alimentación de satélites o estaciones espaciales. Cabe resaltar que su eficiencia es elevada y poseen una gran estabilidad y que en las condiciones espaciales tienen una óptima respuesta a los factores ambientales y condiciones de funcionamiento a las que son sometidas.

4.3.3.3. Células CdTe (Teluro de cadmio)

Por otro lado, existe otro tipo de células de película delgada, que son las células solares de Teluro de Cadmio (CdTe). Estos dispositivos se consiguen a partir de un sustrato con una capa conductora transparente, generalmente de óxido de estaño. Sobre esta capa, posteriormente, se coloca una capa conductora de CdS mediante un proceso de deposición químico denominado CBD. Superponiendo después una

capa absorbente conductora de CdTe, empleando para ello la electrodeposición (CSS). El proceso que permite la separación y diferenciación entre una y otra capa se lleva a cabo mediante un proceso de vacío que ronda los 700°C.

Esta tecnología, junto con las células de silicio amorfo y las CIGS, que se expondrán a continuación, son los materiales de célula más novedosos que se encuentran hoy en día en el mercado. Esta fuerte presencia en el ámbito fotovoltaico mundial se debe a que mediante las células de CdTe se consiguen eficiencias energéticas del 17-18%, pudiéndose alcanzar en un futuro cercano, unos rendimientos cercanos al 22-23%, dado que en investigaciones actuales sobre este material ya se están consiguiendo números cercanos a estas altas prestaciones.

Esta tecnología se considera una de las punteras de la gran gama de tecnologías de capa fina, ya que el espesor característico de una de estas células es de solamente unas pocas micras (2µm aproximadamente), además se trata de un material flexible, pudiéndose adaptar a cualquier superficie en la que se quiera instalar el módulo fotovoltaico formado por células de este material. Por otro lado, las células solares de CdTe tienen un barato coste, ya que se producen de forma rápida y sencilla sin necesidad de grandes y sofisticadas herramientas de producción. También, cabe destacar que debido a que el CdTe posee un bajo coeficiente de temperatura, en ambientes reales de trabajo, la eficiencia de estas células aumenta considerablemente.

Como aspecto también positivo, las células de CdTe se pueden hacer a partir de películas delgadas policristalinas sobre sustratos de vidrio, evitando el uso de los costosos sustratos monocristalinos como ocurre en las células GaAs. A mayores, una de las ventajas que posee el uso de sustratos vidriosos, es que la iluminación de la células fotovoltaica se produce a través de este mismo sustrato y no desde la cara superior de la célula, convirtiéndose así esta cara de la célula en la ventana visible y transparente por la que se va a iluminar y hacer incidir los fotones solares. Sumándose a esto, el contacto frontal característico de una célula fotovoltaica de CdTe se realiza mediante un óxido conductor transparente (TCO), como puede ser el ITO (óxido de indio y estaño). De esta forma, se evita una rejilla de contactos metálicos opacos que impide la incidencia total de la luz solar en la célula. Este contacto debe poseer una conductividad eléctrica al igual que si fueran los típicos hechos de metal. A este enfoque constructivo del sustrato se le denomina *superestrato*.

Por último, en investigaciones actuales se están obteniendo resultados alentadores a la hora de emplear estas células fotovoltaicas CdTe en sustratos plásticos flexibles y fabricar dispositivos de poliamida fina sobre sustratos en láminas metálicas flexibles.



4.3.3.4. Células de silicio amorfo

Además de las células de película delgada anteriormente explicadas, también surgen las células basadas en silicio amorfo.

Las células de silicio amorfo están caracterizadas por emplear como materia principal el silicio, con la salvedad de que este silicio no tiene una estructura cristalina definida y que por ello la eficiencia de estas células solares es menor a las que están formadas por silicio cristalino. Este rendimiento energético de estas células solares se encuentra entorno al 7-8% actualmente, pero mezclando esta tecnología con otras diferentes se puede alcanzar eficiencias cercanas al 22%, según investigaciones actuales.

El silicio amorfo ofrece la posibilidad de elaborar células solares a un coste de fabricación muy barato. Este tipo de silicio muestra diferentes propiedades físicas con respecto a los silicios cristalinos, como es el coeficiente de absorción, ya que el de una célula de silicio amorfo es más de diez veces mayor a $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, lo que hace que este material sea más adecuado para aplicaciones de película delgada.

Un aspecto importante del silicio amorfo es que debido a su estructura cristalina desordenada, hay enlaces colgantes sin ninguna unión con átomos cercanos de su estructura, estos enlaces colgantes fijan el nivel de Fermi y evitan el dopaje del material que se quisiera hacer posteriormente. Para evitar este efecto, en las células de silicio amorfo se adhiere hidrógeno, sustancia que pasiva estos enlaces colgantes. Es por ello, que el material de silicio amorfo se conoce también como a-Si:H (silicio amorfo hidrogenado). Estas aleaciones son especialmente útiles en dispositivos multiunión, debido al incremento de la eficiencia de captación solar. En investigaciones actuales, un dispositivo de una única unión de silicio amorfo puede poseer una eficiencia entorno al 10% y un dispositivo multiunión un rendimiento cercano al 13%, siempre y cuando el silicio amorfo sea combinado con composiciones de silicio monocristalino.

Como desventaja de esta tecnología, cabe destacar que presenta una gran inestabilidad, lo que hace que presente un gran deterioro en su estructura a largo plazo bajo la incidencia de una iluminación ligera y constante. Este deterioro es ocasionado por el reordenamiento de enlaces colgantes que presenta en su estructura atómica. A menudo, este reordenamiento también afecta a los átomos de hidrogeno que se han añadido al material para pasivarlo. Debido a estos anteriores efectos, los paneles solares de silicio amorfo pueden sufrir una pérdida del 2% en su eficiencia energética en las primeras 100 horas de exposición solar.

A modo de conclusión, se puede decir que la tecnología del silicio amorfo hidrogenado es de bajo coste para aplicaciones que requieran una tecnología de capa delgada y células flexibles para adaptarse a cualquier superficie.

Como curiosidad y aspecto novedoso, el silicio amorfo es un material que actualmente se está mezclando con otras tecnologías de células solares para poder adquirir eficiencias más elevadas. En este ámbito aparecen las células HIT, las cuales consisten en una deposición de silicio amorfo hidrogenado sobre células monocristalinas. Esto aporta como resultado una célula solar compuesta con una capacidad de absorción mayor, reduciendo la reflectividad y como consecuencia obteniendo eficiencias o rendimientos energéticos próximos al 21%. En la figura [17] se puede observar el esquema estructural de una célula HIT.

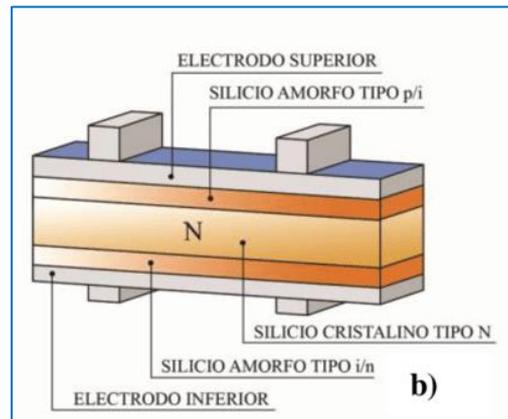


Figura 17. Estructura y composición de la célula HIT.

4.3.3.5. Células CIS y CIGS

Las células solares CIS están formadas por una capa delgada ultrafina de CuInSe_2 sobre una lámina de vidrio o de metal flexible. Este tipo de célula puede alcanzar eficiencias de alrededor del 14% con una durabilidad muy similar a las células de silicio. Estos dispositivos también están basados en la tecnología de película delgada y el coste, en comparación con otras tecnologías, es relativamente bajo. Estas células CIS poseen una energía de banda prohibida de 1.04eV , la cual es más baja que la separación de banda para obtener una eficiencia óptima según el límite de Shockley-Queisser, el cual designa la máxima eficiencia teórica que se puede obtener de una célula fotovoltaica basada en una unión p-n.

Por otro lado, una nueva corriente investigadora sobre este tipo de tecnología de película delgada descubrió que añadiendo Galio a esta composición y obteniendo el compuesto $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$, la eficiencia de las células solares aumentaba y presentaba mejores prestaciones, surgiendo de este modo la tecnología CIGS.

La tecnología de célula CIGS, es considerada como la vía fotovoltaica con mayor potencial y mejor futuro en el amplio abanico de tecnologías de película delgada. Estas células poseen la estructura cristalina de la calcopirita. Gracias a la adición del Galio, la energía de la banda prohibida aumenta hasta los 1.7eV , incrementando así la eficiencia óptima alcanzable.

Esta tecnología tiene la ventaja de que el compuesto $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ puede ser depositado sobre sustratos flexibles dando lugar a células ultraligeras y muy flexibles que se pueden adaptar a cualquier forma. Otro aspecto a tener en cuenta es que al quedar granulada dicha aleación, se crea un campo eléctrico entre el espacio de las bandas prohibidas de los materiales semiconductores que conduce a los electrones hacia la unión p-n, aumentando así su eficiencia. Además, a diferencia de las células de silicio amorfo y de telurio de cadmio (CdTe), las células CIGS presentan la misma disposición del sustrato que las células GaAs, es decir, estas células también se verán iluminadas a través de la superficie superior, tal y como se puede observar en la figura [18], la cual representa la estructura interna de una célula de tecnología CIGS con sustrato de vidrio.

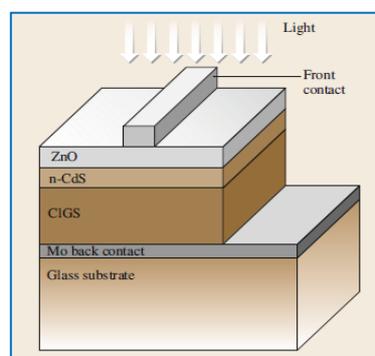


Figura 18. Estructura interna de una célula CIGS con sustrato de vidrio.

En cuanto a las técnicas de fabricación de células solares CIGS, se pretende separar el proceso de deposición del proceso de formación de la aleación característica de esta tecnología. Así, de esta manera, poder emplear procesos baratos y potencialmente de alto rendimiento.

Por otro lado, las células solares CIGS se han desarrollado rápidamente en cuanto a producción en masa y han tenido una gran acogida por las factorías del sector, ofreciendo los productores de estas células, eficiencias entorno al 14%. Por poner un ejemplo, Avancis, una gran empresa alemana del sector fotovoltaico produce paneles solares con células de tecnología CIGS de 140W de potencia real generada a partir de un panel de una superficie de 1.05m^2 y Solar Frontier, empresa nipona del sector solar cuyo CEO es Hiroshi Watanabe, ha conseguido ofertar paneles solares de esta misma tecnología que aportan 170W de potencia a través de una superficie de 1.228m^2 .

Por el contrario, al igual que en las células de telurio de cadmio (CdTe), existen unas grandes existencias mundiales de los materiales necesarios para conformar las células de esta tecnología, ya que para fabricar estas células solo se necesitan algunos gramos de dichos materiales, pero aun así no parecen suficientes para abastecer el gran auge que está teniendo esta tecnología en el sector fotovoltaico.

Además, la extracción del indio necesario en la fabricación de estas células no es barato, ya que no se obtiene indirectamente al obtener otros materiales en procesos mineros. Es por ello que el futuro precio de las células solares de esta tecnología pueda ser totalmente dependiente del precio de suministro y extracción del indio, contribuyendo este casi a la mitad del coste total.

Debido a este problema en el coste de extracción de los materiales que componen las células CIGS, se está empezando a investigar a cerca de nuevos materiales absorbentes. Y así, poder competir con esta tecnología de capa delgada. Uno de los materiales que se está empezando a estudiar son las *Kesteritas* (CZTS).

4.3.4. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ACTUALES

En este apartado del presente proyecto, se va a realizar un cuadro comparativo de cada una de las tecnologías de célula empleadas en la actualidad y que han sido explicadas con anterioridad. Esta tabla comparativa se puede observar en la figura [19], la cual se va a mostrar a continuación.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Silicio monocristalino	Eficiencias elevadas Alto pureza del silicio Gran estabilidad	Lento proceso de fabricación Gran espesor de célula Tecnología de alto coste
Silicio policristalino	Tecnología de coste medio Ágil proceso de fabricación Espesor ligeramente inferior	Eficiencias menores Silicio con menor pureza Mayor área necesaria
Arseniuro de galio (GaAs)	Alto coeficiente de absorción Espesor muy reducido Altas eficiencias	Elevado coste de materiales Elevado coste de fabricación
Teluro de cadmio (CdTe)	Flexibilidad Espesor muy reducido Menor coste total	Menores eficiencias El cadmio es tóxico
Silicio amorfo	Dispositivos ligeros Bajo coste de fabricación Flexibilidad	Eficiencias reducidas Estabilidad muy reducida
CIS y CIGS	Flexibilidad Elevada durabilidad Dispositivos ligeros	Menores eficiencias Escasez de materiales Alto coste

Figura 19. Cuadro comparativo de las tecnologías de célula estudiadas.



4.4. INVESTIGACIONES EN TECNOLOGÍAS DE CÉLULAS

4.4.1. INTRODUCCIÓN Y RAMAS DE INVESTIGACIÓN

Hoy en día, la energía solar fotovoltaica está en auge no solo en cuanto a su creciente implementación en la sociedad como método de obtención de electricidad, sino que también muchos y notables investigadores están trabajando a cerca de encontrar nuevos materiales, compuestos y técnicas de fabricación que consigan mejorar las actuales eficiencias energéticas y los costes competitivos que ya existen en este sector. Es por ello, que en este apartado se mencionarán algunos de las investigaciones y tratamientos que se están desempeñando en la actualidad para cubrir estas necesidades.

4.4.2. CÉLULAS ORGÁNICAS

4.4.2.1. Introducción

A nivel mundial, en el ámbito de la energía solar fotovoltaica, las tecnologías empleadas en la fabricación de células y paneles solares se han basado en conseguir dispositivos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente generando energía limpia. En estos últimos años, la energía solar fotovoltaica se está empleando de múltiples maneras para conseguir una gran variedad de tecnologías disponibles para su aplicación en diferentes instalaciones. Varios estudios demuestran que en la última década, la demanda de la energía solar fotovoltaica utilizada para abastecer de energía a las viviendas domésticas y fábricas está creciendo a pasos agigantados. Es por ello que la investigación, búsqueda y estudio de fuentes renovables como la fotovoltaica han surgido para sustituir a las energías basadas en combustibles fósiles, dañinas para el medio ambiente. Este amplio estudio e investigación en fuentes de energías renovables han dado como resultado, entre otros, una gran evolución de las células solares fotovoltaicas inorgánicas, pero desafortunadamente, este tipo de tecnología solar no es fácil de fabricar a gran escala, es por ello que su coste de fabricación ha impedido el uso, tal y como requiere, de esta tecnología en la demanda mundial de energía actualmente. Como medida y alternativa a esta tecnología solar inorgánica, estos últimos años, se está investigando a cerca de materiales orgánicos que puedan emplearse en la fabricación de células solares. Actualmente esta vía de investigación está en fase de laboratorio, pero se prevé una obtención de células solares orgánicas que ofrezcan grandes ventajas en aspectos económicos, ambientales y tecnológicos. Teniendo por lo tanto, un gran compromiso entre la flexibilidad, eficiencia, escalabilidad y transparencia. Todo ello ofrecido por la célula solar basada en la tecnología de célula orgánica.

4.4.2.2. Evolución de las células orgánicas

4.4.2.2.1. Introducción

A finales del siglo XX se descubrió que los polímeros no eran aislantes y que poseían ciertas características y propiedades conductoras. Este descubrimiento hallado por los químicos Hideki Shirakawa, Alan MacDiarmid y el físico Alan Heeger significó una gran revolución en la tecnología electrónica, surgiendo producto que van desde las pantallas AMOLED, hasta el ámbito de la energía fotovoltaica. Los polímeros semiconductores serán la base material en la que se sustentará la energía fotovoltaica de carácter orgánico.

Un polímero semiconductor es una macromolécula que presenta diferentes monómeros en su estructura, y que a diferencia de un polímero convencional, estas unidades son altamente conjugables, presentando en su estructura electrones de orbitales π , lo que permite tener cadenas de monómeros con una alta densidad electrónica deslocalizada, aportando de esta manera al material propiedades electrónicas únicas, comparables a los semiconductores inorgánicos.

A partir de este material semiconductor (polímeros semiconductores) se empezaron a realizar diferentes prototipos basados en esta tecnología, dando lugar a las primeras células solares fotovoltaicas de carácter orgánico.

4.4.2.2.2. Células orgánicas de una sola capa

Inicialmente, el primer modelo que se desarrolló de una célula solar fotovoltaica orgánica fue la CSO. Esta célula consistía únicamente en una capa de polímero conjugado situada entre dos electrodos metálicos que daban lugar a un campo eléctrico. Debido a que los polímeros conjugados poseen una pequeña constante dieléctrica, la primera fotoexcitación no libera electrones ni huecos, sino que se forma un excitón (par de enlaces entre electrón y hueco), que al entrar en contacto con el cátodo de la célula solar, mediante el efecto Schottky, este excitón se disocia generando portadores de carga libre, los cuales se dirigen hacia sus respectivos electrodos, generando de esta manera la corriente eléctrica. Debido a que los excitones poseen unas decenas de eV, la eficiencia de conversión energética (PCE) se limitaba a un 0,1%. En la figura [20] se muestra la estructura de la célula orgánica de una sola capa.

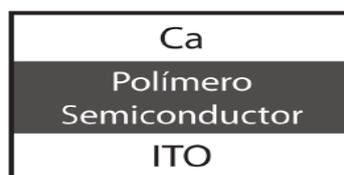


Figura 20. Estructura de la célula solar orgánica de una capa.

4.4.2.2.3. Células orgánicas bicapa

Debido a los bajos rendimientos obtenidos en el anterior tipo de célula orgánica surgió este nuevo concepto en el que se emplean dos materiales con diferentes afinidades electrónicas y de potenciales de ionización distintos. Esta alternativa se emplea para aumentar el espectro solar aprovechable y así aumentar la eficiencia energética ofrecida por la célula solar.

Al formar la unión de dos materiales se favorece la disociación del excitón en electrones, los cuales serán aceptados por el material que posea una mayor afinidad electrónica (material aceptor), y en huecos, los cuales se moverán a través del material que posea un potencial de ionización menor (material donador). Gracias a esto, se fomenta entonces la circulación de corriente eléctrica tal y como se mencionó en el proceso de funcionamiento de las células orgánicas (CSO).

Cabe destacar que estas células bicapa poseen una eficiencia mayor que las células orgánicas de una sola capa, pero no se consiguen rendimientos energéticos tan elevados. Esto es debido a que el excitón fotogenerado, cuando la luz incide sobre la superficie de la célula y excita los electrones del semiconductor, se disocia dentro de una longitud de difusión en el rango de la interface donador/aceptor, de aproximadamente 10nm, y al fabricarse estas células, la distancia entre capas es superior a esta medida. Debido a esa distancia, la eficiencia energética de la célula orgánica bicapa no supera el 3%.

En la figura [21] se puede observar la estructura de la célula orgánica bicapa.

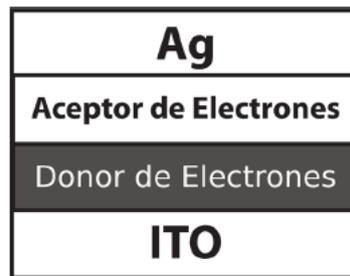


Figura 21. Estructura de la célula solar orgánica bicapa.

4.4.2.2.4. Concepto de heterounión en volumen o BHJ

Después de los dos tipos de células orgánicas explicados anteriormente surgió un nuevo concepto de célula orgánica para paliar los inconvenientes que presentaban las predecesoras versiones que emplean esta tecnología de carácter orgánico. En esta nueva célula toma fuerza el concepto de la heterounión en volumen.

Estas nuevas células orgánicas estaban compuestas por una película delgada de aproximadamente 100nm que actúa como capa activa de la célula, y esta capa fina

está compuesta por una mezcla homogénea de un donador (polímero semiconductor altamente conjugado) y un aceptor de electrones, el cual, generalmente se trata de algún material derivado del fullereno (derivado a su vez del carbono). De esta forma, en cualquier punto de la película delgada que forma la capa activa existe una mezcla donador/aceptor, aumentando las interfaces entre los dos materiales, disminuyendo la distancia entre ellos y favoreciendo como resultado la disociación del excitón fotogenerado. Gracias a ello, la eficiencia en estas células puede ser mayor que el rendimiento obtenido de las anteriores, llegando a conseguir eficiencias del 8.3%, empleando una capa activa formada por P3HT (donador) y el derivado del fullereno PCBM (aceptor).

4.4.2.2.5. *Concepto e innovaciones de la capa activa*

Una vez vistas las versiones de células solares orgánicas que se desarrollaron inicialmente, cabe destacar que el principal aspecto que influye en su funcionamiento es una buena composición de la capa activa, parte principal de las células orgánicas. En los últimos años, se está estudiando de forma detallada para poder conseguir que los niveles energéticos de los polímeros empleados en las células fotovoltaicas orgánicas se encuentren lo más cerca posible, y de este modo conseguir rendimientos energéticos mayores.

De este modo, cabe hacer una amplia referencia a los tipos de materiales que la conforman (donadores y aceptores), y sus respectivas características que deben poseer para constituir la capa activa de una célula orgánica.

- Donadores: serán aquellos polímeros capaces de aportar electrones a la capa activa. Estos donadores de electrones son aquellos que absorben la mayor cantidad posible de radiación proveniente del Sol, excitando de esta manera los electrones empleados en la generación de corriente.

Ya que la conjugación de los electrones π se puede dar fácilmente, se observa que al aumentarla, los orbitales de los polímeros están cada vez más cerca entre sí, formando una estructura de bandas muy similar a la observada en los semiconductores inorgánicos. Esta estructura de bandas que se forma en los polímeros está caracterizada también por un ancho de banda prohibida (E_g) entre la “banda de valencia”, llamada HOMO (*High Occupied Molecular Orbital*) y la “banda de conducción”, llamada LUMO (*Low Unoccupied Molecular Orbital*).

Para que los polímeros semiconductores puedan actuar como polímeros de tipo donador en la capa activa de las células solares orgánicas, deben presentar las siguientes propiedades enunciadas a continuación:

- Poseer una alta conductividad.
- Altas movilidades de los huecos generados ($0.05\text{-}0.1\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$).

- No ser de carácter radiactivo.
- Poseer una diferencia energética entre HOMO y LUMO, banda prohibida (E_g) óptima que garantice la mayor absorción posible de la radiación solar (menor de 2eV).
- Presentar un coeficiente de absorción alto (mayor de 10^5 cm^{-1}).
- Tener una alta solubilidad en solventes volátiles para facilitar la formación de la película.

Actualmente, el donador de electrones que domina en el ámbito de las células solares orgánicas es el P3HT.

- Aceptores: además de los materiales donadores de electrones, en la capa activa se requiere de un material aceptor que sea capaz de acoger esos electrones. La conversión de la luz solar en corriente eléctrica necesita presentar el fenómeno de la transferencia de los electrones del donador al material aceptor. Es por ello, que los materiales que se emplean como polímero aceptor de la capa activa de una célula solar orgánica debe evitar la recombinación del excitón fotogenerado en la capa activa de la célula.

Cumpliendo con las condiciones explicadas, el PCBM (derivado del fullereno) es el polímero aceptor más empleado en esta tecnología. Esto se debe a que presenta una alta conductividad eléctrica, y sus niveles de energía HOMO y LUMO se ajustan a los del aceptor P3HT correctamente.

4.4.2.3. Funcionamiento de las células orgánicas

Para entender el funcionamiento de las células solares orgánicas, en la figura [22] se muestra el proceso por el que se rigen.

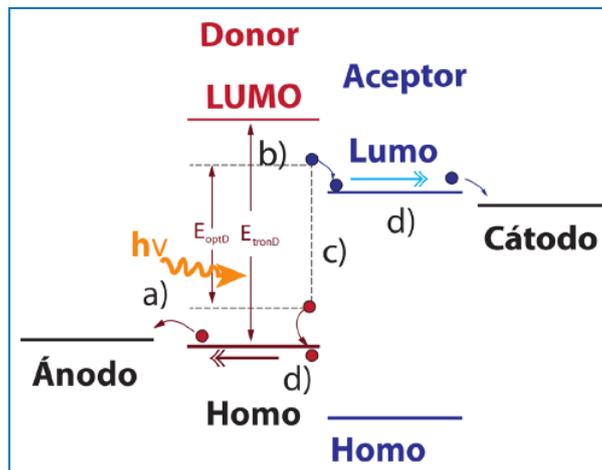


Figura 22. Proceso de funcionamiento de la célula orgánica.

En la figura anterior, en primer lugar (a), se puede ver el proceso de absorción de fotones por parte de la capa activa, causante de una transición electrónica entre las “banda” HOMO y LUMO del material donador de electrones. A causa de esta transición se genera un sistema de pares electrón-hueco, llamados excitones (b). Estos excitones se trasladan hasta la interface con el material aceptor donde se disocian generando portadores de carga libre (c), los cuales se desplazan a través de cada material implicado en la célula, hasta llegar a los contactos eléctricos (d).

Cabe destacar, que para la consecución de la separación de la carga es necesario aplicar un campo eléctrico, este campo se consigue por medio de la asimetría de la energía de ionización de los electrodos. Esta asimetría explica por qué el flujo de electrones va desde el electrodo con una menor energía de ionización, hasta el cátodo, el cual posee una mayor energía de ionización (polarización directa).

Por otro lado, las células orgánicas tienen el inconveniente de que muchos de los excitones generados en su estructura se pierden por recombinación, ya sea porque no alcanzan la interface o porque la alcanzan pero en ella se produzca recombinación entre huecos y electrones debido a su proximidad y no consigan difundirse en sus respectivos materiales.

4.4.2.4. Compuestos orgánicos empleados

Los compuestos orgánicos son aquellos que están formados principalmente por átomos de carbono (C) y átomos de hidrógeno (H). Además, estos compuestos pueden presentar en su estructura, átomos de nitrógeno (N), oxígeno (O) e incluso átomos de azufre (S), entre otros. Los enlaces de carbono se unen por medio de enlaces covalentes que pueden ser de dos tipos, sigma (σ) o pi (π). Los enlaces sigma son uniones sencillas entre un par de electrones de carbono. Sin embargo, en los enlaces pi pueden ser dobles o triples. Es por ello, que los enlaces pi y sigma presentan características estructurales y electrónicas diferentes. Una prueba de ello es la deslocalización de los electrones en la estructura conjugada y que aporta al material propiedades optoelectrónicas muy interesantes en el ámbito de la fotovoltaica.

Por otro lado, los compuestos orgánicos que solamente presentan en su estructura uniones o enlaces sigma son totalmente incoloros. Mientras que aquellos que presentan enlaces pi se caracterizan por poseer una gran colorimetría, la cual se ve intensificada si los enlaces del material se presentan conjugados. Un ejemplo es el *licopeno*, responsable del color rojo de los tomates, el cual, presenta en su estructura 11 dobles enlaces pi conjugados.

Cabe destacar, que los compuestos que contienen enlaces pi conjugados poseen generalmente un peso molecular reducido y con unas propiedades de gran interés a la hora de emplearse en la construcción o fabricación de elementos fotovoltaicos.



Una gran ventaja que presentan los materiales orgánicos es la versatilidad con la que se pueden realizar modificaciones estructurales, que permiten amoldar las propiedades que se deseen y que interese según la aplicación que se quiera satisfacer con alguno de sus derivados.

Hasta el momento, los materiales orgánicos se están empleando para formar películas delgadas y para ser depositadas en diferentes tipos de sustratos. Actualmente, el método más económico, sencillo y rápido de fabricar películas orgánicas compuestas por diferentes moléculas y polímeros es la técnica de centrifugación.

4.4.2.5. Células Grätzel (TiO₂)

Este tipo de células también son conocidas como células solares sensibilizadas por colorante, las cuales transforman la energía lumínica del sol en energía eléctrica, a través del principio fotoelectroquímico. Este fenómeno consiste en un proceso similar al que se da lugar en las plantas llamado fotosíntesis. La eficiencia energética que nos aporta este tipo de célula es totalmente dependiente de los materiales que lo forman. Es decir, se basan en la sensitivación de un material semiconductor por medio de un colorante, el cual es capaz de acoger un gran rango del espectro solar y así aumentar la incidencia de los fotones en su superficie.

La célula Grätzel está constituida por un foto-electrodo y un electrodo que se encuentra en contacto con un electrolito redox. El electrodo expuesto a la radiación solar es una película delgada de un semiconductor, generalmente TiO₂, el cual se unifica a una superficie vidriosa recubierta por el colorante ya mencionado. Por otro lado, el electrodo próximo al electrolito redox (generalmente un compuesto en estado líquido, como puede ser el yoduro/triyoduro) está formado por un sustrato conductor.

El funcionamiento de este tipo de célula se puede resumir en tres etapas brevemente:

- Inicialmente se va a producir una interacción entre el sol y la sustancia colorante de las células que se encuentra en la superficie fotosensible, en la cual penetrarán los fotones del Sol.
- Seguidamente se dará lugar a una interacción interna entre esa sustancia colorante, que recubre la célula, con el semiconductor de la misma.
- Por último, los electrones circulan y son recolectados en la célula para cerrar el circuito y dar lugar a la circulación de la corriente eléctrica.

En la figura [23] se muestra el esquema interno de una célula Grätzel.

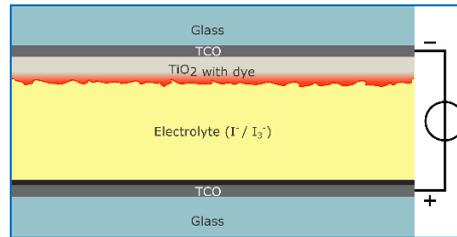


Figura 23. Estructura interna de una célula Grätzel.

En la anterior figura se puede observar cómo estas células están formadas por una capa mesoporosa compuesta por una red de nanopartículas de TiO_2 . Dichas partículas se han agregado para conseguir una gran conductividad eléctrica. Posteriormente, adherida a esta superficie nanocristalina, se encuentra la monocapa de colorante, que, cuando se produce en ella la fotoexcitación, un electrón se inyecta en la banda de conducción del óxido. Por último, el colorante vuelve a su estado inicial mediante la donación de un electrón por parte del electrolito, devolviendo a la célula a su estado de reposo.

Gracias a las composición explicada a cerca de la célula Grätzel se han conseguido alcanzar eficiencias de transformación energética superiores al 10%. Hoy en día se están investigando nuevos materiales para formar estas células y conseguir eficiencias mayores. En estos últimos años se pretende sustituir los electrolitos líquidos por materiales transportadores de carga sólidos. De este modo se consigue aumentar la compacidad del dispositivo y su estabilidad, además de la eficiencia energética.

Por otro lado, también se pretende modificar el electrodo fotosensible, que generalmente es de TiO_2 . Para alcanzar este objetivo, se requiere la sensibilización del mismo, también, aplicando colorantes. Un ejemplo de ello es el procedimiento seguido por Vanessa C. Martínez, Alcides López y Mónica M. Gómez en su artículo académico, titulado *Celdas Solares Sensibilizadas por colorante basadas en TiO_2 modificado con CuO* . En este documento, que data del año 2016, lo que se ha conseguido es mejorar las prestaciones que ofrece el compuesto TiO_2 sin modificar, aplicando una pulverización de CuO sobre el electrodo de este material. Gracias a este procedimiento obtuvieron como resultado, que las películas de $\text{TiO}_2\text{-CuO}$ modificadas, con una composición del 0.33% de CuO , presentaban una eficiencia de conversión energética fotón-electrón del 57% y una eficiencia solar del 2%, mejorando un 5% y un 0.3% respectivamente las marcas obtenidas en la situación en la que el electrodo de trabajo solo está compuesto por TiO_2 .

A continuación en la figura [24] se muestra una tabla comparativa de los resultados de la investigación citada anteriormente, en la que aparecen diferentes niveles de CuO sobre el electrodo de trabajo de TiO_2 . En ella se puede observar, que cuando la composición es del 0.33% de CuO y 99.67% de TiO_2 , el resultado obtenido es óptimo.

Muestra % p/p CuO	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
TiO ₂ (0 %)	3,52	0,80	0,69	1,7
TiO ₂ -CuO (0,17 %)	3,75	0,77	0,72	1,8
TiO ₂ - CuO (0,33 %)	4,20	0,75	0,65	2,0
TiO ₂ - CuO (0,67 %)	3,60	0,79	0,72	1,6
TiO ₂ - CuO (1,00 %)	1,67	0,81	0,72	1,0
TiO ₂ - CuO (1,33 %)	1,64	0,82	0,59	0,8
TiO ₂ - CuO (1,67 %)	1,68	0,84	0,81	0,8

Figura 24. Electrodo TiO₂-CuO.

4.4.2.6. Células basadas en aceptores no-fullerenos (NFAs)

En los últimos años, están cobrando importancia aquellas células orgánicas que poseen aceptores basados en materiales que no derivan del fullereno (material obtenido de la derivación del carbono).

Este tipo de aceptores se caracterizan por tener un gran equilibrio entre estabilidad, eficiencia energética y el coste de su fabricación. Por estas razones, en un futuro no muy lejano, se espera que cobre una mayor importancia y juegue un papel importante en el mercado fotovoltaico.

Además de esto, este material empleado en los aceptores de las células orgánicas presenta unas idóneas características fisicoquímicas fácilmente controlables, las cuales contribuyen favorablemente a una más amplia y eficaz absorción de luz solar, y consecuentemente a una eficiente generación de corriente eléctrica.

Por último, cabe destacar que un material muy popular en esta nueva rama de la fotovoltaica orgánica, es el ITIC y sus correspondientes derivados. Este material está en fase de prueba y los resultados que se están obteniendo son realmente alentadores, ya que las eficiencias obtenidas son bastante más elevadas que las obtenidas por medio de una célula orgánica convencional. En la actualidad este rendimiento energético ya alcanza valores cercanos al 13%, pudiéndose aumentar esta cifra en los años próximos.

4.4.2.7. Aplicaciones

En la actualidad, las células y paneles solares orgánicos presentan un precio económico y poseen un peso ultraligero, debido a los materiales que las conforman. Los puntos negativos y los cuales no permiten a esta tecnología de célula prosperar e implantarse como una tecnología puntera, son el rendimiento energético y la durabilidad que poseen actualmente, muy inferior a otras tecnologías de célula ya fijas en el mercado fotovoltaico.

Sin embargo, en la actualidad, las aplicaciones en las cuales no se requiere de una elevada potencia, el uso de este tipo de células puede ser una gran opción, gracias a su bajo coste. Es por ello, que hoy en día, estas células solamente se emplean en este tipo de aplicaciones específicas, como puede ser la integración de la energía fotovoltaica en elementos electrónicos inteligentes o en ropa futurista como la gama de chaquetas y anoraks que ha sacado la marca textil *Tommy Hilfiger*.

En la figura [25] se puede observar la gama de chaquetas en las que se integra tecnología solar que ha ofertado, de forma exclusiva y en edición limitada, la firma de ropa citada anteriormente.



Figura 25. Prendas de ropa que integran células orgánicas.

4.4.3. CÉLULAS DE PEROVSKITA (PSC)

4.4.3.1. Introducción

Como posible alternativa a las células de silicio tradicionales, ha surgido una nueva tecnología de célula, que ya fue descubierta hace varios años, pero que se ha retomado mediante diversas investigaciones. Esta nueva tecnología de célula se basa en la aplicación de perovskita (CaTiO_3) en los dispositivos fotovoltaicos. Este material, se caracteriza por poseer una eficiencia de conversión energética elevada y un menor coste de fabricación con respecto a otro tipo de tecnología. Actualmente, la investigación en torno a este material se basa en la obtención de *perovskitas híbridas*, las cuales se explicarán en el siguiente apartado de este documento.

Como inconveniente, las *perovskitas* poseen plomo (Pb) en su composición atómica, material altamente tóxico. Es por ello, que la fabricación, distribución y reciclaje de este tipo de dispositivos aún no se ha regulado y por ahora, puede presentar una gran toxicidad para el medio ambiente y las personas que interactúen con ellos. Además, la *perovskita* es inestable y sufre una gran degradación ante una larga exposición a la radiación ultravioleta.

4.4.3.2. Perovskitas híbridas

Como bien se ha mencionado anteriormente, las investigaciones actuales acerca de la *perovskita* como material constructivo de células fotovoltaicas, se centran en las *perovskitas híbridas*, las cuales ofrecen una eficiencia y estabilidad esperanzadora.

Las *perovskitas híbridas* se caracterizan por poseer una constitución atómica del tipo ABX_3 , donde el catión A está situado en una ubicación cubico-octaédrica, el catión B en una situación octaédrica y X siendo el átomo de carbono, nitrógeno, oxígeno o un halógeno. En la figura [26] se puede observar la estructura de una *perovskita híbrida* que se corresponde con el tipo de constitución atómica explicada.

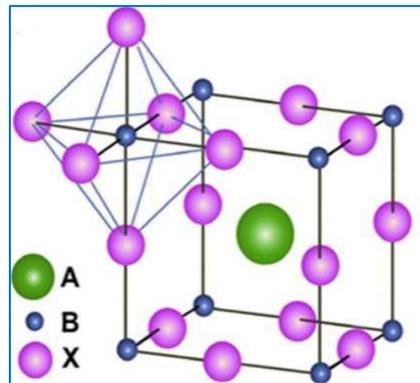


Figura 26. Estructura atómica de una *perovskita híbrida* ABX_3 .

Específicamente, las *perovskitas híbridas* se caracterizan por poseer en su estructura átomos de diferente naturaleza. Por ejemplo, el catión A es reemplazado generalmente por cationes orgánicos como formamidino o el metilamonio. Y a su vez, el catión B lo componen iones de plomo, estaño, germanio o cobre, compuestos inorgánicos.

Actualmente, las *perovskitas híbridas* que se están empleando en la actualidad, para aumentar el rendimiento energético, son la *perovskita* $CH_3NH_3PbI_3$ ($MAPbI_3$) y la *perovskita* $CHN_2H_4PbI_3$ ($FAPbI_3$). Pero presentan el inconveniente de que se degradan rápidamente ante entornos y ambientes húmedos. Es por ello, que los cationes orgánicos (MA^+ y FA^+) se están empezando a sustituir por iones de cesio inorgánicos y así aumentar la estabilidad y la eficiencia del conjunto, llegando a obtener un 10% de rendimiento energético.

Para finalizar, se ha observado y demostrado que el compuesto $FAPbI_3$ presenta alguna ventaja con respecto a la *perovskita* $MAPbI_3$, ya que la primera presenta una mayor movilidad de portadores y un ancho de banda de 1.43 eV, permitiendo así una mejor absorción de los fotones incidentes.

4.4.3.3. Diferentes técnicas de deposición de perovskita

Para poder conformar una célula fotovoltaica que implemente este novedoso material, se debe adherir la perovskita mediante un recubrimiento de rotación, por inmersión o empleando diferentes técnicas de evaporación al vacío.

Además, para poder obtener células solares de perovskita con un gran rendimiento energético y alta estabilidad, se debe tener control sobre la morfología y estructura cristalina del compuesto final adherido en la célula fotovoltaica.

En la figura [27] se puede observar una clasificación de las diferentes formas de deposición que se pueden emplear para poder obtener una célula de perovskita.



Figura 27. Técnicas de deposición de perovskita sobre las células fotovoltaicas.

4.4.3.4. Perovskitas estables aplicando cloruro de amonio (NH₄Cl)

En el artículo titulado “Highly stable hole-conductor-free perovskite solar cells based upon ammonium chloride and a carbon electrode” de Beibei Zong, Wuyou Fu, Zu-an Guo, Shaowei Wang, Liwen Huang, Bo Zhang, Hari Bala, Jianliang Cao, Xiadong Wang, Guang Sun y Zhanying Zhang, se habla de una técnica para mejorar la estabilidad de las células solares de perovskita. Las perovskitas empleadas en las células solares juegan un papel muy importante en la conversión energética y en la estabilidad, la cual es otro de los aspectos importantes y que en la actualidad es el gran inconveniente que presentan los dispositivos solares de perovskita.

Por ello, en esta investigación se pretende encontrar un compuesto, que mediante su aplicación sobre las células de perovskita, se consiga mejorar la estabilidad de dichos dispositivos. Este compuesto estudiado es el cloruro de amonio (NH₄Cl), el cual permite obtener una perovskita final de una elevada calidad.

La cantidad de cloruro de amonio que se debía aplicar fue determinada por medio de prueba error ajustes matemáticos previos.

Determinaron que para conseguir la célula óptima de perovskita, se debía aplicar un porcentaje del 80% de este compuesto. De esta forma consiguieron aumentar la corriente de cortocircuito, el factor de forma (FF) y el rendimiento de potencia (PCE) de la célula fotovoltaica de esta tecnología. Además, la estabilidad del dispositivo seguía siendo adecuada, incluso después de su funcionamiento durante 576 horas.

En la figura [28] se pueden observar los resultados favorables obtenidos en las 600 horas de ensayo que se dedicaron a observar el funcionamiento de estas células de perovskita después de tal proceso de fabricación.

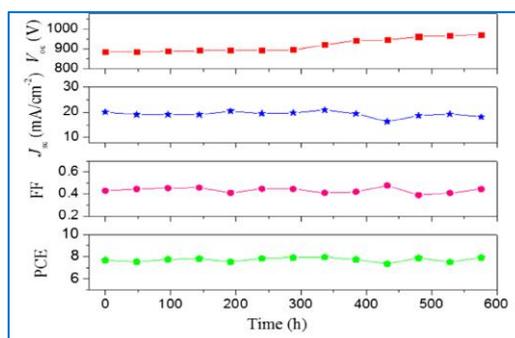


Figura 28. Estabilidad de la célula de perovskita después de 600 horas.

4.4.4. KESTERITA ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$)

Este material es un novedoso compuesto cuaternario que responde a la fórmula química de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ y cuyos materiales que lo componen no son tóxicos y abundan en la superficie terrestre.

Se están empezando a fabricar las primeras células de este material como posible tecnología sustitutiva de las células CIGS, ya que el indio, material que las compone, es tóxico y caro.

Las kesteritas son materiales semiconductores constituidos por compuestos químicos, tales como el cobre, el estaño, el selenio o el zinc. Estos materiales se pueden emplear como absorbentes ópticos en las células solares y conseguir unas eficiencias relativamente altas, de entorno al 12.6% (composición de células en tándem). Este material posee un gran futuro en el sector de la energía solar fotovoltaica, debido a que no presenta materiales tóxicos ni dañinos para el medio ambiente, y que además se encuentra en abundancia en la faz de la Tierra. Además, la kesterita cuenta con la ventaja de tener unas atractivas características en el sector de la fotovoltaica e idóneas para obtener elevadas eficiencias energéticas con algún que otro cambio en su composición.

4.5. APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

4.5.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tecnología solar fotovoltaica ha cobrado una gran importancia a nivel europeo y mundial con respecto a otras fuentes de energía renovables, gracias a la fuerte investigación, recursos y aportaciones económicas percibidas por los estados a nivel mundial.

Hoy en día, a pesar de existir una gran variedad de tecnologías de célula, la gran mayoría de instalaciones solares se ve dominada por el silicio, tanto policristalino como monocristalino, alcanzando un 93-94% del mercado total de la energía solar.

Dichas instalaciones de energía solar fotovoltaica se pueden clasificar en función de la aplicación a la que estén destinadas, pudiendo diferenciarse entre aplicaciones autónomas, conectadas a red y aquellas aplicaciones que resulten más novedosas con un futuro prometedor o se empleen en situaciones puntuales.

4.5.2. APLICACIONES AISLADAS

4.5.2.1. Introducción

Este tipo de instalaciones se encargan de producir electricidad sin ningún tipo de conexión a la red eléctrica, con el fin de aportar energía a la instalación que demanda dicho abastecimiento. Dentro de este tipo de instalaciones se puede subdividir en dos grandes bloques de aplicación.

4.5.2.2. Aplicaciones espaciales

En dichas aplicaciones, lo que se consigue por medio de la energía solar fotovoltaica es dotar de electricidad a los elementos espaciales, como pueden ser los satélites, supercomputadores situados en las estaciones espaciales o cualquier dispositivo que requiera electricidad. Gracias a este ámbito, la energía solar fotovoltaica que se conocen hoy en día se hizo posible, debido a que en primera instancia, esta tecnología se desarrolló para este tipo de misiones espaciales.

En este tipo de aplicación es preferible utilizar células solares de GaAs (Arseniuro de Galio), debido a que se degradan más lentamente que el silicio y no necesitan un continuo mantenimiento. Incluso, se está empezando a emplear este tipo de células con varias capas de material y así conseguir células solares más eficientes. Hoy en día, para mejorar sus características eléctricas, se emplean otros materiales como germanio o fósforo de indio y así capturar más energía.



En la actualidad, en el espacio, al tener un diferente espectro de radiación solar (AM1.5G) y empleando el tipo de células citado anteriormente con múltiples uniones, se pueden conseguir eficiencias del 38.8% con iluminación no concentrada y entorno a un 46% con luz concentrada.

4.5.2.3. Aplicaciones terrestres

En las instalaciones fotovoltaicas que se desarrollan en la Tierra cabe destacar que el ámbito y la finalidad de las mismas es muy variado y hay infinidad de situaciones en las que se puede emplear la energía solar fotovoltaica para poder abastecer dichos sistemas de energía eléctrica. Algunas de las instalaciones que pueden necesitar la energía solar fotovoltaica pueden ser el sector de las telecomunicaciones, las zonas rurales y aisladas que necesiten una fuente eléctrica viable, los diferentes tipos de señalización de carreteras, el alumbrado público, las pequeñas instalaciones que se dediquen al bombeo de agua y pequeños aparatos de consumo propio como puede ser una calculadora, algún juguete electrónico o prendas de ropa.

En este tipo de instalaciones lo que se pretende es utilizar una tecnología de célula que nos aporte el mayor rendimiento posible en un área de extensión muy pequeña. Es por ello que en la mayoría de las aplicaciones terrestres en las que el consumo energético no es elevado, se está apostando por el silicio policristalino, amorfo o tecnologías de película delgada.

4.5.3. APLICACIONES CONECTADAS A RED

4.5.3.1. Introducción

En este tipo de instalaciones, el productor no utiliza dicha energía generada, sino que la vende al organismo encargado de la gestión de la energía del país o región en la que se encuentre dicha instalación. Cabe distinguir entre dos grandes bloques en cuanto a generación eléctrica. Por un lado, las centrales y huertos solares, y por otro, los edificios que integran tecnología fotovoltaica para su autoconsumo y venta del excedente energético.

4.5.3.2. Centrales fotovoltaicas y huertos solares

Estas extensiones de superficie son aquellos recintos en los que se concentra un número determinado de instalaciones fotovoltaicas, a su vez constituidas por un número determinado de módulos o paneles fotovoltaicos, los cuales pertenecen a diferentes propietarios. Esta disposición tiene como fin, vender la energía generada a la institución gubernamental gestora de la energía del determinado territorio en el que se encuentre.

El parque solar del Desierto de Tengger, es considerado una de las extensiones solares fotovoltaicas más grandes del planeta, la cual es capaz de suministrar 1.500MW de energía totalmente aprovechable. Esta planta solar cubre un área de 1200 km² y está situado en Zhongwei, provincia de Ningxia, China.

Por otro lado, el huerto solar Topaz, situado en California, es uno de los más grandes del mundo. Esta gran planta solar se caracteriza porque utiliza paneles solares fotovoltaicos con células de telurio de cadmio. Esta instalación cuenta con 25 km² de extensión, 550 MW de potencia instalada generada a partir de nueve millones de módulos fotovoltaicos. En la figura [29] se puede observar una vista aérea de la gran extensión que abarca este huerto solar de Estados Unidos.



Figura 29. Huerto solar Topaz, situado en California.

4.5.3.3. Edificios fotovoltaicos

El rápido crecimiento de la energía solar fotovoltaica en los últimos años y la gran evolución en los productos de este tipo ha permitido el uso de los módulos fotovoltaicos como material constructivo en los cerramientos, cubiertas, fachadas y demás elementos de una edificación. Es por ello, que la integración arquitectónica venidera consiste en combinar los materiales como elemento estructural y como productor de electricidad. Un ejemplo de esta integración pueden ser las tejas que han sido desarrolladas por la compañía californiana Tesla. Estas tejas, con una estética tradicional, incluyen unos dispositivos solares que sirven como abastecimiento energético a la vivienda. La empresa americana ofrece cuatro modelos tradicionales de tejas, en los cuales se incluye el diseño toscano, con textura, teja lisa o incluso se atreven con la pizarra (figura [30]).



Figura 30. Gama de las tejas solares de Tesla.



4.5.4. APLICACIONES NOVEDOSAS DE VANGUARDIA

4.5.4.1. Introducción

En cuanto aplicaciones novedosas y que no se centren tanto en la generación en masa de energía eléctrica, existen diversos proyectos e instalaciones que se han desarrollado o se tienen intención de llevar a cabo para paliar la demanda energética necesaria en cada situación. A continuación se describe algún ejemplo de este tipo de instalación.

4.5.4.2. Carretera solar en Francia

En Francia se encuentra la primera carretera solar, desarrollada en el año 2016. Esta calzada consta de un kilómetro, formada por 2280 paneles fotovoltaicos, destinados a la producción de energía eléctrica. Cabe destacar que al estar situados los paneles sobre el asfalto, el ángulo de incidencia solar no va a ser el óptimo para la captación de la luz y como resultado, no se va a obtener el mejor rendimiento.

Además las carreteras pueden sufrir diferentes deterioros a lo largo del tiempo debido a la rodadura continua de los vehículos. Teniendo en cuenta también, que se pueden ensuciar debido al polvo que se levanta en las carreteras o debido a las precipitaciones que se pueden dar, esas células solares pueden verse cubiertas y no dejar paso a la luz solar para la generación de energía. Es por ello, que en este proyecto se han obtenido resultados poco alentadores. Al día, se han llegado a conseguir una media de 409KWh, insuficientes para abastecer de energía a ciudades, pero si que puede servir para alimentar a los semáforos y señales de tráfico o a las luminarias públicas durante todo el año.

4.5.4.3. Carril bici solar en Holanda (SolaRoad)

Otro ejemplo de aplicación novedosa en la cual se utilice la fotovoltaica como fuente de energía puede ser el carril bici de 70 metros de largo establecido en Holanda, proyecto denominado SolaRoad. Este proyecto se puso en marcha en el año 2015 y cabe destacar que los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios ya que se ha logrado en un periodo de seis meses, unos 3000KWh, los cuales podrían utilizarse y abastecer de forma íntegra una vivienda unifilar durante un año. En este carril bici existen células fotovoltaicas incrustadas en módulos de hormigón de 2,5 a 3,5 metros, cubiertas por una doble capa de vidrio templado de un centímetro de grosor que actúa como protección. Al gobierno holandés, este proyecto le ha costado una cantidad cercana a los 3 millones de euros.

4.5.4.4. Células solares basadas en la bacteria de E.coli

Hoy en día se están investigando diferentes alternativas al silicio, las cuales prometen disminuir los costes de la fotovoltaica y emplear menos material para conseguir una igual o superior eficiencia. Si se disminuyen los costes, se puede llegar a un estado en el que la energía solar se encuentre en prácticamente todas las superficies que nos rodean y así poder obtener energía eléctrica de forma sencilla y económica.

Sin embargo, estos módulos o paneles fotovoltaicos podrían tener soluciones aún más curiosas, como las que investiga la Universidad de Columbia Británica (Canadá) con una bacteria relacionada con los trastornos digestivos, la llamada bacteria E.coli.

Estas investigaciones con organismos vivos para generar electricidad se basan en tintes que usan las bacterias en los procesos de fotosíntesis. Como inconveniente, la extracción de esos tintes suele ser costoso y tóxico, pero si se consigue, resulta muy atractivo en el ámbito de la fotovoltaica.

En el estudio en la universidad estadounidense se ha observado que las bacterias están programadas genéticamente, recubiertas de un material semiconductor y de una superficie de cristal. Estas bacterias son capaces de producir electricidad incluso en condiciones de luminosidad muy reducidas, lo cual es un aspecto muy beneficioso para la obtención de energía mediante dispositivos fotovoltaicos.

4.5.4.5. ECOCAT. Ferry marítimo eléctrico.

En julio de 2018, la compañía naval Metaltec Naval presentó oficialmente el ECOCAT, el primer catamarán de pasajeros electro-solar de Europa, el cual permite el transporte de hasta 120 personas sin la necesidad de emplear combustibles fósiles, evitando de esta manera al 100% las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Este barco cuenta con un sistema de propulsión totalmente eléctrico que no requiere de motores auxiliares que brinda una autonomía de navegación de ocho horas sin recargas gracias a las alas solares retráctiles y desplegadas que posee.

En la figura [31] se puede observar el catamarán de pasajeros de la gama ECOBOAT.



Figura 31. Catamarán ECOCAT, totalmente eléctrico.



5. SIMULACIÓN DE CÉLULA, PANEL E INSTALACIÓN.

5.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En esta parte del presente documento se van a desarrollar tres programas independientes, pero los tres con una gran relación con la energía solar fotovoltaica. Estos programas se van a desarrollar para realizar una simulación de los diferentes componentes que conforman la primera parte de una instalación fotovoltaica. Esta parte, se refiere a las células y paneles de energía continua de la instalación. Con ello, se va a conseguir obtener información de la potencia máxima ideal y real que son capaces de entregar cada una de las células o asociación de células (paneles) que se quiere simular.

Para cumplir este objetivo me he centrado en la parte básica de la instalación fotovoltaica, que además es el aspecto fundamental estudiado en este documento, la célula solar. Y después se va a ir extrapolando a panel, incluyendo el tipo de asociación de células mediante las variables N_p y N_s , las cuales significan número de células en paralelo y número de células en serie que conforman un panel respectivamente. Por último, añadiendo el número de paneles, se consigue obtener información de una instalación fotovoltaica completa con irradiancias y temperaturas reales de cualquier ciudad de la faz de la tierra.

Como bien he mencionado anteriormente, el estudio de simulación que he llevado a cabo ha sido a nivel de célula, ya que es el elemento básico y se ha decidido así para partir de la base de una instalación. Sabiendo que si se ha modelado correctamente el funcionamiento de una célula, extrapolar posteriormente al funcionamiento de un panel, o incluso una instalación, es relativamente sencillo haciendo uso de las variables anteriormente citadas.

Inicialmente, el fabricante de las células solares nos aporta los valores característicos de una célula solar en condiciones estándar (STC: $T_c=25^\circ\text{C}$ y $G=1000\text{W}/\text{m}^2$). Estos parámetros ofrecidos por el fabricante son la tensión en circuito abierto (V_{oc} (STC)), corriente de cortocircuito (I_{sc} (STC)), potencia máxima (P_m (STC)), tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp} (STC)) y corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp} (STC)).

Estos parámetros ofrecidos por el fabricante van a variar con la temperatura ambiente en la que se encuentre el dispositivo y la irradiancia incidente en el mismo. Es por ello, que para una correcta simulación se requiere tener en cuenta estas variaciones. Para este ámbito, diferentes autores han realizado investigaciones y empleado diferentes aproximaciones para la correcta simulación de estos efectos.

5.2. MODELOS DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

A continuación se presentan brevemente los estudios desempeñados por dos autores diferentes que se han dedicado a la aproximación de estos efectos y la influencia que presentan en el funcionamiento de la célula fotovoltaica.

5.2.1. MODELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE ABELLA

Según este autor, la potencia máxima de un generador fotovoltaico ideal, P_m , para cada valor concreto de irradiancia, G , y temperatura ambiente, T_a , se puede obtener a partir del valor de la potencia en condiciones estándar y los valores de estas variables externas. La relación obtenida se puede observar a continuación en la figura [32].

$$P_m = P_m^* \frac{G}{G^*} [1 - \partial(T_c - T_c^*)]$$

Figura 32. Aproximación de la potencia ideal según Abella.

Además, la temperatura ambiente, T_a , no es la misma que la temperatura de célula, T_c , pero sí que están relacionadas mediante la expresión que se muestra a continuación en la figura [33].

$$T_c = T_a + \frac{TONC - 20}{800} G$$

Figura 33. Cálculo de la temperatura de célula.

Donde

- G es la irradiancia global incidente en la superficie del dispositivo solar.
- T_c es la temperatura de célula
- T_a es la temperatura ambiente
- P_m es la máxima potencia para ese instante de G y T_a concreto
- P_m^* es la potencia nominal en condiciones estándar STC
- $TONC$ es la temperatura nominal de operación del dispositivo
- ∂ es el coeficiente de variación con la temperatura de la potencia.

Por otro lado, los parámetros de la célula en condiciones estándar ofrecidos por el fabricante también son dependientes de las condiciones ambientales en las que se

encuentren, como bien se ha dicho anteriormente. Es por ello que este modelo también se precisa una aproximación a la variación presente en la corriente de cortocircuito (I_{sc}^*) y la tensión de circuito abierto (V_{oc}^*).

Estas ecuaciones, en las que se obtiene la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la tensión de circuito abierto (V_{oc}) dependientes de la temperatura y la irradiancia se observan a continuación en las figuras [34] y [35] respectivamente.

$$I_{sc} = \frac{G}{G^*} I_{sc}^* + \alpha (T_c - T_c^*)$$

Figura 34. Aproximación de la I_{sc} según Abella.

$$V_{oc} = V_{oc}^* + m v_t \ln\left(\frac{G}{G^*}\right) - \beta (T_c - T_c^*)$$

Figura 35. Aproximación de la V_{oc} según Abella.

Donde

- m es la constante de idealidad del diodo
- V_t es el potencial térmico
- α es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito
- β es el coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto

Este modelo de aproximación de los parámetros característicos de la célula fotovoltaica es muy preciso ya que tiene en cuenta las dos influencias ambientales, la irradiancia, como la temperatura ambiente, para cada uno de los factores aportados por el fabricante del dispositivo.

El problema viene a la hora de implementar el modelo de simulación de la célula mediante la ecuación descrita en la figura [6] de este documento. Al tener una gran precisión y tener en cuenta todos los factores posibles externos para observar la influencia en los parámetros, el coste computacional es elevado y por tanto, el tiempo de simulación se demora demasiado.

Buscando otro modelo que calcule la variación de los parámetros debido a la irradiancia, G , y a la temperatura ambiente, T_a , encontré el modelo de Andreas Wagner, el cual se describe a continuación.

5.2.2. MODELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO DE WAGNER

Andreas Wagner lo que realiza en su artículo en el que expone su estudio acerca del generador fotovoltaico, es una alternativa al modelo eléctrico convencional de una célula fotovoltaica. En su modelo inicialmente calcula una resistencia serie que la denomina R_{pv} y que se trata de una resistencia fotoeléctrica ficticia para simplificar el circuito de la célula referenciado en la figura [7] de este documento.

El circuito equivalente de la célula solar de Wagner es el mostrado a continuación en la figura [36], en el cual se basará para hacer los cálculos de las variaciones de los parámetros explicados.

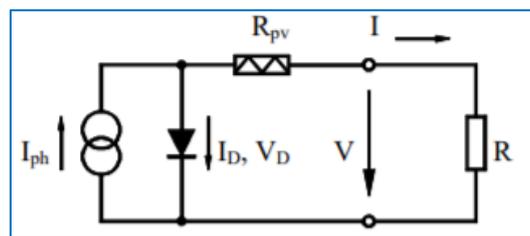


Figura 36. Circuito equivalente de la célula según Wagner.

Una vez obtenido este circuito equivalente de la célula fotovoltaica, lo que hace este autor es calcular la resistencia R_{pv} mediante las ecuaciones observadas a continuación en la figura [37].

$$k = (-5.411, \quad 6.450, \quad 3.417, \quad -4.422)$$

$$M = \frac{V_{oc}^*}{I_{sc}^*} \left(k_1 \frac{I_{pm}^* V_{pm}^*}{I_{sc}^* V_{oc}^*} + k_2 \frac{V_{pm}^*}{V_{oc}^*} + k_3 \frac{I_{pm}^*}{I_{sc}^*} + k_4 \right)$$

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}^*}{I_{pm}^*} + \frac{V_{pm}^*}{I_{pm}^*} \left(1 - \frac{I_{sc}^*}{I_{pm}^*} \right)$$

Figura 37. Cálculo de la R_{pv} según Wagner.

Donde todas las variables que aparecen con el superíndice “*” son aquellas aportadas por el fabricante en condiciones estándar de funcionamiento.

Entonces, una vez obtenida esta resistencia ficticia, R_{pv} , se realizan las aproximaciones, mostradas en la figura [38], en las corrientes y tensiones características de la célula, para posteriormente poder calcular las variaciones en los parámetros que nos interesan para la correcta simulación de la célula fotovoltaica.

$$V_t = -(M + R_{pv})I_{sc}^* \quad I_o = I_{sc}^* e^{\frac{-V_{oc}^*}{V_t}} \quad I_{ph} = I_{sc}^*$$

Figura 38. Aproximaciones de Wagner.

Donde

- I_o es la corriente saturación del diodo
- I_{ph} es la corriente fotogenerada por la célula solar

Posteriormente, con estos parámetros aproximados y calculados, de la célula solar, siguiendo el modelo eléctrico de la célula según Wagner, se va a poder aproximar el valor de la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp}) y la corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}), afectados por la irradiancia incidente, G , y la temperatura ambiente, T_a , en un momento dado.

Este cálculo se muestra a continuación en la figura [39].

$$I_{sc} = I_{sc}^* \frac{G}{G^*} \quad I_{mp} = I_{mp}^* \frac{G}{G^*}$$

$$V_{mp} = \frac{V_{mp}}{1 + \beta(T_c^* - T_c)} + V_t T_c \frac{\text{Log}\left(\frac{G}{G^*}\right)}{T_c^*} + I_{mp}^* R_{pv} \left(\frac{G}{G^*} - 1\right)$$

$$V_{oc} = V_{oc}^* \frac{V_{mp}}{V_{mp}^*}$$

Figura 39. Cálculo de las características según Wagner.

Una vez desarrollado el modelo planteado por Wagner, he llegado a la conclusión que aunque sea un método más sofisticado en cuanto a visualización global del concepto de funcionamiento de la célula solar, es un método que aproxima las variaciones en las características del dispositivo de una forma muy concisa y con unos resultados muy eficientes. Por otro lado, el coste computacional de este modelo de simulación no es tan elevado y el tiempo de simulación es adecuado para la visualización de los resultados que se quieren en todo momento. Por todo esto, los programas desarrollados a continuación en este documento se han basado en el modelo de Wagner.

5.2.3. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA SERIE

Otro aspecto importante es la propia simulación del funcionamiento de la célula, ya que hasta aquí solo se han calculado los parámetros característicos del dispositivo, añadiendo el efecto que hay sobre ellos debido a la irradiancia y la temperatura ambiente.

Entonces para la simulación de la célula, la idea principal es implementar la ecuación de funcionamiento de la célula fotovoltaica en un programa de simulación, estableciendo un barrido de tensión y poder así observar el completo funcionamiento de los dispositivos a simular.

Por último, en la ecuación de funcionamiento de la célula fotovoltaica aparecen dos variables que no se han nombrado hasta ahora, ya que no nos las aportan el fabricante, ni ninguno de los modelos planteados anteriormente las cita. Estas variables son la resistencia paralelo, R_p o R_{sh} , y la resistencia serie, R_s . La primera de ellas es una variable que no influye demasiado en el comportamiento de la célula, por lo que para la simulación se va a establecer un valor elevado y de esta forma se evita que intervenga demasiado en los cálculos simulados.

Por otro lado, sí que es importante tener en cuenta la resistencia serie, que en diversos artículos y estudios la calculan de la forma observada en la figura [40].

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad FF_0 = \frac{\frac{V_{oc} * q}{TcK} - \ln\left(\frac{V_{oc} * q}{TcK} + 0.72\right)}{\frac{V_{oc} * q}{TcK} + 1}$$

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

Figura 40. Cálculo de la resistencia serie R_s .

Donde

- FF es el factor de forma de la célula solar
- q es la carga del electrón (1.602e-19 C)
- FF_0 es el factor de forma para el dispositivo ideal ($R_s=0$)
- K es la constante de Boltzmann (1.38e-23 J/K)

Además todos los parámetros de célula que aparecen con el superíndice “*” son aquellos que han sido aportados por el fabricante y que han sido obtenidos mediante las condiciones estándar STC ($T_c=25^\circ\text{C}$ y $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

De esta forma la resistencia serie también será dependiente de la temperatura ambiente y de la irradiancia solar en cada instante de tiempo, obteniendo así un resultado real y conciso para el valor de esta resistencia en mi modelo de simulación.



5.3. PROGRAMAS EMPLEADOS

Una vez explicado el principio de funcionamiento y los modelos de simulación que se van a emplear en este ejercicio del presente documento cabe destacar y hacer hincapié en los programas y software de simulación que se han empleado para cumplir los objetivos de este trabajo fin de grado.

5.3.1. MATLAB

En primer lugar, el programa en el que se ha implementado el modelo de simulación de la célula fotovoltaica ha sido en Matlab, programa que se basa en un entorno de cálculo técnico de altas prestaciones para el cálculo numérico y visualización, que integra:

- Análisis numérico
- Cálculo matricial
- Procesamiento de señales
- Representación gráfica de señales

Este programa presenta una interfaz gráfica de operación muy intuitiva, la cual permite una programación estructurada gracias a las funciones o scripts que el usuario puede programar para conformar un programa global, claro y preciso.

En este entorno numérico se programarán diferentes algoritmos de optimización, búsqueda de punto de máxima potencia o se tratará el aspecto de la adquisición de datos para obtener las entradas del sistema de simulación planteado anteriormente.

5.3.2. MATLAB-SIMULINK

Simulink es una herramienta adicional de Matlab, que permite la programación basada en bloques de cualquier modelo de simulación planteado anteriormente. En este entorno será donde se programe el modelo completo de la célula solar y así obtener el comportamiento adecuado de dicho dispositivo. Las entradas y los parámetros característicos de la célula se calcularán con anterioridad en el entorno de Matlab, y se pasarán como entrada a este modelo de simulación planteado en esta otra herramienta software, ya que es más visual. Además se puede obtener un gran resultado mediante la interacción estructurada Matlab-Simulink.

5.3.3. METEONORM

Meteonorm es un programa que sirve para la adquisición de datos climatológicos de cualquier punto en el que se encuentra una estación meteorológica o presente una interpolación de estas características medioambientales. En este caso, los parámetros que me interesa obtener es la temperatura ambiente y la irradiancia de cualquier lugar durante un año, minuto a minuto u hora a hora. Una vez obtenido los datos del lugar seleccionado, en el formato deseado, se guardan los datos y se genera un Excel en el que están contenidos. Posteriormente, estos datos que ya han sido exportados del programa Meteonorm, se deben pasar al entorno de Matlab, para que de esta manera sean procesados y utilizados en el modelo de simulación.

Para obtener una idea más global del funcionamiento de esta tarea de adquisición de datos y su posterior uso, se va a describir brevemente el proceso llevado a cabo desde la selección de los datos hasta su importación a Matlab.

5.3.3.1. Primer paso

Una vez se ha abierto el programa Meteonorm, el primer desplegable que aparece es el denominado *Sitio*, en el cual se debe buscar la ciudad o estación meteorológica que se desee y seleccionarla. De esta forma ya se ha fijado la ciudad de la que se van a obtener los datos climatológicos.

En la figura [41] se muestra el primer paso a seguir para la obtención de los datos que se quieren obtener de la base de datos de Meteonorm.

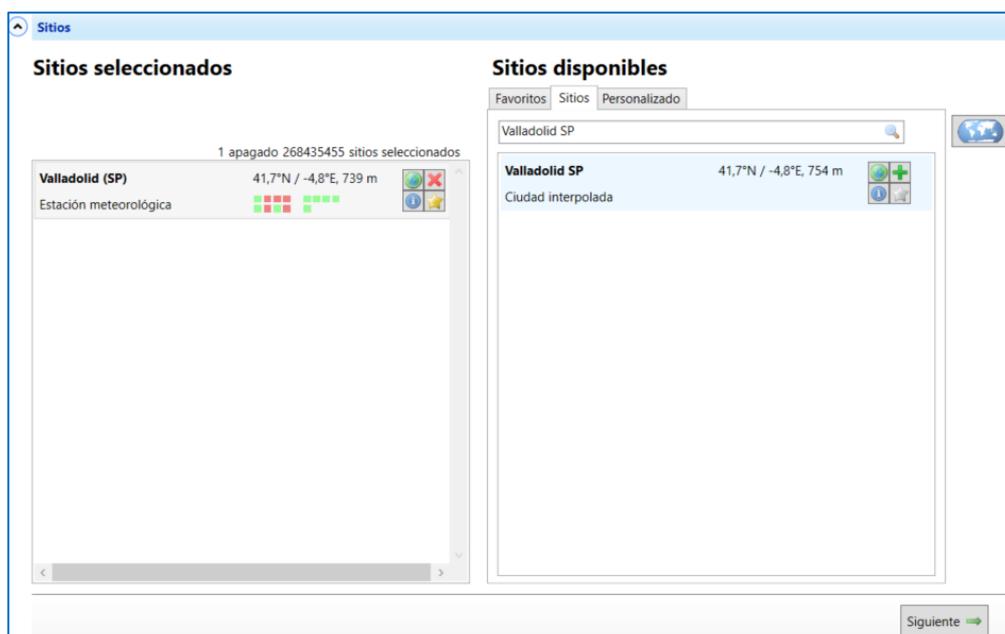


Figura 41. Primer paso para la adquisición de datos de Meteonorm.

5.3.3.2. Segundo paso

Posteriormente, se deben establecer las modificaciones deseadas, la turbiedad atmosférica, el horizonte, el albedo, la orientación de la superficie... en el segundo desplegable denominado *Modificaciones*. En mi caso, en este apartado lo dejaré por defecto ya que la variación sobre los parámetros que deseo obtener no es relevante. En la figura [42] se observa la ventana ofrecida por este desplegable.

The screenshot shows the 'Modificaciones' window with the following details:

- General:** 'Corrección de la medición de la radiación global' with two radio buttons: 'Utiliza data de radiación global corregido (excluyendo efecto de horizor)' (selected) and 'Utiliza data de radiación global original (incluyendo efectos de horizont)'. A note below states: 'Solo aplicable para estaciones meteo con horizonte alto.'
- Sitio específico:** 'Orientación de la superficie' with 'Azimut' and 'Inclinación' both set to 0. Includes a diagram of a surface orientation.
- Albedo:** 'Automático' (selected) with a value of 0,15 and a slider.
- Horizonte:** 'Ninguno' (selected) and 'Preconfigurado'. Includes an 'Editar horizonte...' button.
- Turbiedad atmosférica:** 'Interpol.' (selected), 'Estación aeronet más cercana', and 'Preconfigurado'. Includes an 'Editar turbiedad...' button.
- Data import:** 'Valores mensuales...' (selected) and 'Valores diarios/por hora...'.
- Buttons:** 'Deshacer' (undo) and 'Siguiente' (next).

Figura 42. Segundo paso para la adquisición de datos de Meteonorm.

5.3.3.3. Tercer paso

Una vez realizado el paso anterior, en el tercer desplegable denominado *Datos* ofrecido por el programa, se debe elegir el periodo de tiempo del que se quieren extraer los datos climáticos. Además, en esta opción existe una opción denominada *Configuraciones avanzadas*, en la cual se va a elegir el modelo de irradiancia que se quiere, hora a hora o minuto a minuto. En la figura [43] se muestra la interfaz del programa para elegir el modelo de irradiancia deseado.

^
v
Datos

Datos

Dataset

Utiliza meteonorm 7 climate data

Utiliza data importada

Periodo de radiación

1991–2010

1981–1990

Futuro

Escenario del ipcc para periodos en el

B1

A1B

A2

2020

Periodo de temperatura

2000–2009

1961–1990

Futuro

← Deshacer
● Configuraciones avanzadas
Reiniciación
Siguiente →

Modelo irradiancia

Hora (defecto)

Minuto (aguiar & collares-pereira)

Minuto (skartveit & olseth)

Radiacion cielo despejado

10 años

Variaciones mensuales

Modelo de la radiación difusa

Perez (por defecto)

Boland/Ridley/Lauret (BRL)

Modelo temperatura

Estándar (hora)

Val. Extremos 10 años (hora)

Temperatura cielo despejado

Modelo irrad. incl.

Perez (por defecto)

Hay

Gueymard

Skartveit & Olseth

First random seed

Automático

Sistema del tiempo

Legal (default)

Solar

Temperatura - valores extremos 10 años

Extremas

Pro-medias (valor de partida)

Mínimo mensual

Máximo mensual

Mínimos anuales

Máximos anuales

Verano/invierno

Periodo de verano

Pro-medias (valor de partida)

Mínimo mensual

Máximo mensual

Periodo de invierno

Pro-medias (valor de partida)

Mínimo mensual

Máximo mensual

Radiación - valores mensuales extremos de 10 años

Extremas

Pro-medias (valor de partida)

Mínimo mensual

Máximo mensual

Mínimos anuales

Máximos anuales

Verano/invierno

Periodo de verano

Pro-medias (valor de partida)

Mínimo mensual

Máximo mensual

Periodo de invierno

Pro-medias (valor de partida)

Mínimo mensual

Máximo mensual

Ajustes específicos para formato output

PHPP / WaVE

Carga para calefacción

Constante de tiempo invierno: Temperaturas críticas: Interior °C Exterior °C

Temperatura media más baja por encima de horas para el criterio de confort

Refrigeración

Número de días cálidos: Temperatura crítica: Exterior °C

Límite de ventilación nocturnaria °C Humedad g/kg

Figura 43. Tercer paso para la adquisición de datos de Meteonorm.

5.3.3.4. Cuarto paso

Luego, en el cuarto desplegable se debe elegir el formato de los datos que se van a extraer del programa. En mi caso, como ya se ha explicado anteriormente, me interesa obtener un formato de datos en el que se recojan los valores de irradiancia, hora a hora o minuto a minuto. Para ello en este desplegable, *Formato*, se debe especificar la opción *Standard* de Meteonorm, si se quiere obtener los datos hora a hora, o si por el contrario, se desean obtener dichos datos minuto a minuto, se debe escoger la opción *Standard minute*. En la figura [44] se muestra el desplegable que contiene ambas opciones.

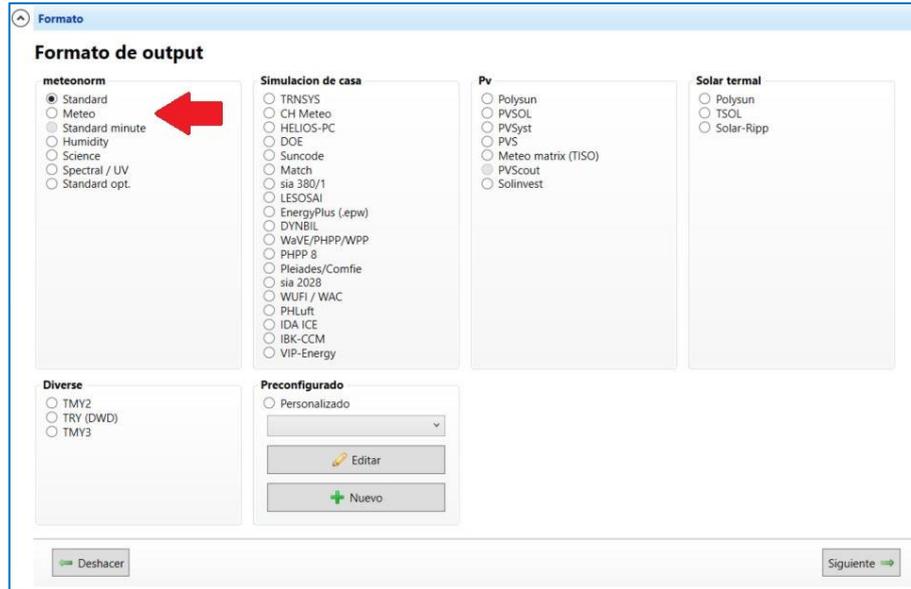


Figura 44. Cuarto paso para la adquisición de datos de Meteonorm.

5.3.3.5. Quinto paso

Cuando ya se han establecido las anteriores opciones, se debe seleccionar el último desplegable, denominado *Output*, que automáticamente va a calcular los datos de salida. Para almacenar y generar el fichero Excel con los datos que necesito, se deben guardar y seleccionar el método de visualización de los mismos mediante la interfaz mostrada a continuación en la figura [45].

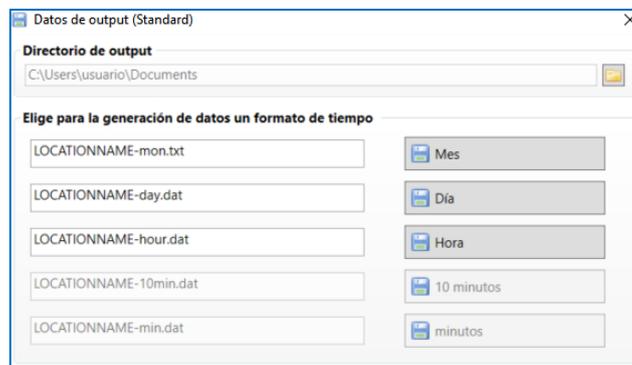


Figura 45. Quinto paso para la adquisición de datos de Meteonorm.

5.3.3.6. Sexto paso

Una vez generado el fichero Excel con los datos de irradiancia, el último paso que se debe dar es la importación de ese fichero a una variable .mat y así poder ser manejable con Matlab, entorno en el que se desarrollará el programa de simulación. Esta tarea de importación se va a conseguir mediante el comando propio de Matlab denominado *importdata*, el cual va a transcribir exactamente dicho fichero, sin ningún tipo de pérdida de datos, al entorno de Matlab.

5.4. SIMULACIÓN DE CÉLULA FOTOVOLTAICA

5.4.1. INTRODUCCIÓN

En este primer programa desarrollado, se trata de simular el comportamiento de una célula fotovoltaica ante diferentes valores de irradiancia y de temperatura ambiente. Para hacer un programa genérico y que sirva para cualquier célula que se encuentre en el mercado, se pide al usuario que introduzca los parámetros en condiciones estándar de la célula que nos aporta el fabricante. Una vez introducidos estos parámetros, se pide al usuario de nuevo, que teclee e introduzca la irradiancia G , y la temperatura ambiente, T_a , a la que se desea simular la célula fotovoltaica. Una vez introducidos estos parámetros, mediante el modelo de Wagner se calculan las variaciones de los parámetros en condiciones estándar y se simula la célula fotovoltaica mediante el uso de estas características modificadas. Por último, el sistema genera el valor de la potencia aproximada en esas determinadas condiciones según la aproximación de la potencia ideal de Abella ilustrada en la figura [32], la potencia ideal obtenida después de la simulación del funcionamiento de la celda fotovoltaica, obteniendo el punto de máxima potencia simulado, y por último, se obtiene la potencia real aportada por la célula bajo esas condiciones de temperatura e irradiancia.

Además, se representan las curvas I-V y P-V de la célula fotovoltaica para así poder visualizar también su comportamiento y obtener una completa monitorización del estado del dispositivo fotovoltaico.

5.4.2. ESTRUCTURA Y EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA

5.4.2.1. Código de Matlab

- **EjecucionCelula.m**

Es el script principal del proyecto para la simulación de una célula fotovoltaica. Mediante este ejecutable se va a organizar las demás funciones que conforman el proyecto y en el cual, cada una de esas funciones realiza una tarea determinada. Por decirlo de una manera, es el *main* del proyecto si se realiza un *simil* con un proyecto desarrollado en lenguaje C.

La estructura de este script principal simplemente va a consistir en la invocación de las diferentes funciones que conforman el proyecto de forma jerárquica y según el procedimiento estructurado de desarrollo del que se ha dotado al proyecto.

Mediante esta forma de programación, el proyecto es fácilmente legible e intuitivo a la hora de intentar observar el proceso de desarrollo que se ha llevado a cabo. En la figura [46] se va a observar la estructura de esta función principal del proyecto.



```

%% ----- %%
%% TRABAJO FIN DE GRADO %%
%% ESTUDIO DE LAS CÉLULAS Y PANELES DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA %%
%% %%
%% AUTOR: SERGIO MARTÍN ÁLVAREZ %%
%% TUTOR: JOSÉ JULIO BUEY CUESTA %%
%% %%
%% GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA %%
%% ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES - UNIVERSIDAD DE VALLADOLID %%
%% %%
%% CURSO ACADÉMICO 2018-2019 %%
%% ----- %%
%% PROGRAMA PRINCIPAL: EjecucionCelula: Programa principal del proyecto. %%
%% ----- %%
%% ----- %%
%%Se va al directorio donde esta el proyecto. (Medida de seguridad).
cd('C:\Users\usuario\Documents\vFinal Celula');
%%Se invoca a la función para parametrizar la célula.
[V_Max,I_Max,Voc_STC,Isc_STC,G_STC,TONC,delta,Rsh]=Parametros();
%%Se cargan los parametros en condiciones estandar en la estructura panel.
[celula]=cargaParamCelula(V_Max,I_Max,Voc_STC,Isc_STC,G_STC);
%%Se invoca a la función para introducir las entradas del sistema.
[G,Ta]=Irr_Temp();
%%-----%%
%%SE EJECUTA LA SIMULACIÓN PARA LOS DATOS SELECCIONADOS.
%%-----%%
%%Se busca inicialmente el modelo de Simulink que se quiere ejecutar.
find_system('Name','SimulacionCelula');
%%Se reserva memoria para los vectores y matrices.
Pot_Celula=zeros(1001,1);
Pmax_T=zeros(1001,1);
Pmax_R=zeros(1001,1);
%%Se calcula la temperatura de célula.
Tc=(Ta+273)+((TONC-20)/800)*G;
%%Calculamos los parametros de célula. (Wagner)
celula_gt=car_celula(G,Tc,celula);
%%Calculamos parametros para introducirlos en Simulink.
[Isc,Voc,Vmp,Imp]=cargaParamSimulink(celula_gt);
%%Se ejecuta el modelo de Simulink para cada par de entradas.
sim('SimulacionCelula');
%%Se busca el punto de máxima potencia de cada curva graficada. Funcion MMP.
[lim]=MMP(G,Pot_Celula);
%%Se rellenan los vectores de máximas potencias obtenidas.
[PotAprox_T,PotSim_R,PotSim_T,Vmax,Imax]=creaVect(G,Pmax_T(lim),Pmax_R(lim),Pot_Celula(lim),V_Celula(lim),I_Celula(lim));
%%Sacar las variables de interés por pantalla.
muestraPot(G,Ta,PotAprox_T,PotSim_T,PotSim_R,Vmax,Imax);
%%Guardamos el modelo de Simulink.
save_system('SimulacionCelula');
pause(0.5);

```

Figura 46. Estructura del script principal de la simulación de una célula.

- **Parametros.m**

Esta función es la primera a la que el script *EjecucionCelula* invoca y por tanto, se ejecuta. En esta función lo que se ha desarrollado es un menú, por medio del cual se introducen los parámetros en condiciones estándar de la célula. En este menú se da la opción de introducir el valor de la tensión en el punto de máxima potencia de la célula, la intensidad en el punto de máxima potencia, la tensión de circuito abierto, la intensidad de cortocircuito, la irradiancia, la temperatura nominal de operación (TONC) y el coeficiente de variación con la temperatura de la potencia (∂), todos ellos en condiciones estándar STC.

Esta función no recibe parámetros de entrada, y otorga como salida los parámetros de célula en condiciones estándar anteriormente citados.

El funcionamiento de *Parametros*, consiste en pedir al usuario que introduzca cada una de las características de célula, aportadas por el fabricante, por teclado. Ese valor se trata como *string* y automáticamente después se convierte a *double*. Además, en esta función se fija el valor de la resistencia paralelo a un valor elevado (415.405Ω) y así evitar posibles errores de simulación entorno a esta variable.

La interfaz gráfica del menú explicado en esta función es el que se muestra a continuación en la figura [47].

```
-----|
| PARAMETROS DE CÉLULA EN CONDICIONES ESTANDAR |
|-----|
TENSION MÁXIMA EN Pmax(STC) [V]: 0.574
INTENSIDAD MÁXIMA EN Pmax(STC) [A]: 6.1
TENSION DE CIRCUITO ABIERTO (STC) [V]: 0.682
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (STC) [A]: 6.54
IRRADIANCIA (STC) [W/m2]: 1000
TONC (STC) [°C]: 47
Delta [%/°C]: 0.0036
```

Figura 47. Menú para la introducción de parámetros en STC de la célula.

- **cargaParamCelula.m**

A continuación, una vez ejecutada la función *Parametros*, en el script principal del proyecto se pasa a invocar la función *cargaParamCelula*. La cual va a recibir como argumentos todos los valores tecleados por el usuario anteriormente, correspondientes a los parámetros de célula en condiciones estándar.

Con estos parámetros, esta función lo que va a hacer es conformar una variable tipo *struct* denominada *célula*, la cual va a contener todos estos parámetros en condiciones estándar, siendo esta variable tipo *struct* la salida de esta función. Esta estructura se empleará más adelante para la obtención de los parámetros de Wagner, tal y como se explicará más adelante.

- **Irr_Temp.m**

Posteriormente, la siguiente función que va a invocar el script principal de este primer programa para la simulación de una célula solar fotovoltaica es a la función *Irr_Temp*, la cual no va a recibir parámetros como argumentos de entrada y que simplemente va a servir como otro menú para la introducción de la irradiancia y la temperatura ambiente con la que se quiere simular la célula fotovoltaica.

El funcionamiento de *Irr_Temp*, consiste en pedir al usuario que introduzca cada una de las entradas del sistema por teclado, ese valor se trata como *string* y automáticamente después se convierte a *double*, valores que serán la salida de esta función y que posteriormente serán las entradas del sistema implementado en Simulink.

En la figura [48] mostrada a continuación se muestra la interfaz gráfica que se muestra por pantalla a la hora de introducir las entradas del sistema de simulación posterior.

```
|-----|  
|           |  
| INTODUCIR POR TECLADO LAS ENTRADAS |  
|-----|  
--> IRRADIANCIA [W/m2]: 890  
--> TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: 24
```

Figura 48. Menú para la introducción de las entradas del sistema.

- **Diversos comandos**

Después de introducir los parámetros en condiciones estándar de la célula y las entradas del sistema de simulación de la célula fotovoltaica implementado en Simulink, en el script principal se ejecutarán una serie de comandos por los motivos expuestos a continuación.

En primer lugar, se ejecuta el comando *find_system* con el nombre del modelo de Simulink para que encuentre la ubicación y la ruta a seguir para la posterior ejecución de dicho modelo.

En segundo lugar se va a realizar una reserva de memoria asignando ceros a los vectores donde se van a almacenar los resultados de la simulación. Esta reserva de memoria nos permitirá realizar una simulación más ágil y obteniendo una adecuada velocidad computacional.

Y para finalizar, se va a calcular la temperatura de célula en función del *TONC* y la temperatura ambiente, T_a , introducidos anteriormente por teclado.

- **Car_celula.m**

Mediante esta función se va a conseguir obtener los valores característicos de una célula fotovoltaica para una irradiancia, G , y una temperatura de célula, T_c , según el modelo de Wagner.

Esta función va a recibir como argumentos de entrada, la temperatura de célula, T_c , la irradiancia, G , y la variable *celula* del tipo *struct* que se conformó previamente por medio de la función *cargaParamCelula*. Por otro lado, va a devolver una variable denominada *celula_gt* de tipo *struct*, que va a contener los parámetros característicos de la célula ya modificados.

En esta función denominada *car_celula* se va a invocar a otra subfunción denominada *parW_celula*, la cual es una subrutina que determina los parámetros del modelo de Wagner de una célula (R_{pv} , V_t , I_0 , I_l), a partir de las características en condiciones estándar. Esta subrutina va a devolver los parámetros de Wagner a la función *car_celula* y de esta manera se obtendrán los valores característicos de la célula fotovoltaica (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp}) modificados y dependientes de la irradiancia y temperatura de célula que presenta este dispositivo en un determinado momento de simulación.

- **cargaParamSimulink.m**

Una vez hallados los nuevos valores de los parámetros característicos de la célula mediante el modelo de Wagner, la función denominada *cargaParamSimulink* va a asignar a cada variable, cada uno de los valores de los parámetros calculados e influenciados por la irradiancia, G , y temperatura de célula actual, T_c . Estas variables serán entradas del sistema de simulación implementado en Simulink, ya que son los parámetros que se han visto afectados por las condiciones ambientales actuales con las que se quiere simular el sistema.

Esta función recibe como argumento de entrada la variable *celula_gt*, conformada mediante la anterior función explicada, y emitirá como salida los valores (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp}), los cuales, a su vez serán las entradas del sistema de simulación de Simulink. En la figura [49] se observa la asignación que se realiza mediante la presente función.

```

% ESTUDIO DE LAS CÉLULAS Y PANELES DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA
%
% AUTOR: SERGIO MARTÍN ÁLVAREZ
% TUTOR: JOSÉ JULIO BUEY CUESTA
%
% GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA
% ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES - UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
%
% CURSO ACÁDEMICO 2018-2019
%
%-----%%
% FUNCIÓN: cargaParamSimulink: Función para calcular entradas a Simulink.
%-----%%
function [Isc,Voc,Vmp,Imp] = cargaParamSimulink(celula_gt)
%Se calculan los parametros que se meten como entrada a Simulink.
Isc=celula_gt.Isc;
Voc=celula_gt.Voc;
Vmp=celula_gt.Vmp;
Imp=celula_gt.Imp;
end

```

Figura 49. Asignación de los valores característicos a las entradas de Simulink.

- **Ejecución de la simulación**

Una vez calculados todos los parámetros e introducidas todas las entradas que requiere el modelo de simulación de la célula fotovoltaica implementado en Simulink, se pasa a ejecutar dicho modelo y al funcionamiento de la simulación, la cual se explicará en detalle en el siguiente apartado del presente documento.

Cabe destacar, que para proseguir con la explicación del código desarrollado en Matlab, es necesario, al menos, citar y explicar brevemente las salidas que se obtienen y se devuelven a Matlab en este sistema de simulación de Simulink.

Una vez ejecutada y finalizada la simulación de la célula, se van a obtener cinco vectores en los que se van a almacenar los valores de potencia ideal aproximada (variable P_{max_T}), potencia ideal simulada (variable Pot_Celula), tensión de célula simulada (variable V_Celula), corriente de célula simulada (variable I_Celula) y la potencia real simulada (variable P_{max_R}) de la célula solar que se quiere estudiar.



- **MMP.m**

Una vez ejecutada la simulación de la célula solar en el entorno de Simulink y obtenidas las variables de tipo vector como salida, en el script principal del proyecto se va a invocar la función *MMP*, función que se va a encargar de obtener el punto de máxima potencia de la célula simulada. Para conseguir este objetivo, se necesita pasar como argumento de entrada el vector *Pmax_T*, en el cual se almacenan cada una de las potencias obtenidas en la simulación correspondientes a cada uno de los mil puntos recogidos durante el barrido de tensión que se realiza en Simulink.

Entonces, esta función va a recorrer dicho vector en busca de la potencia mayor que se haya conseguido obtener, y almacena el índice del vector en el que se encuentra dicha potencia. Siendo este índice el argumento de salida de esta función, conformando así el algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia que se ha programado en Matlab.

- **creaVect.m**

Una vez obtenido el índice en el que se encuentra la máxima potencia simulada, se van a formar los vectores en los cuales se van a almacenar la potencia máxima ideal aproximada según la fórmula de Abella (*PotAprox_T*), la potencia máxima ideal simulada (*PotSim_T*), la tensión de célula en el punto de máxima potencia simulada (*Vmax*), la corriente de célula en el punto de máxima potencia simulada (*Imax*) y la potencia máxima real simulada (*PotSim_R*). Que será fácil localizar cada una de estas variables, debido al algoritmo *MMP* programado previamente y quedándose con el índice del vector donde se encuentra el máximo valor.

Por tanto, la salida de esta función va a ser cada uno de los vectores nombrados anteriormente y que posteriormente se sacaran por pantalla mediante la función explicada a continuación.

- **muestrPot.m**

Por último, una vez obtenido cada uno de los vectores en los que se encuentra el valor máximo de cada variable obtenida en el desarrollo de la simulación de la célula solar, solo queda mostrarlo por pantalla y contrastar los resultados obtenidos. Precisamente ese objetivo es el que va a satisfacer la última función invocada en el script principal de esta simulación, la función *muestraPot*.

Una vez terminada la ejecución del programa principal, el modelo de Simulink que ha sido ejecutado se va a guardar con el mismo nombre y se va a establecer un delay de medio segundo y se da por terminada la ejecución de la simulación de una célula solar fotovoltaica a elección del usuario.

5.4.2.2. Implementación en Simulink

Una vez programada la parte de Matlab se debe hacer inciso en la parte de Simulink, ya que desde el script principal de Matlab se simula este modelo cada vez que se quiere simular una célula fotovoltaica.

Como bien se ha explicado anteriormente, el modelo de simulación de la célula fotovoltaica se ha desarrollado en Simulink. Este sistema recibe como entradas, la irradiancia en condiciones estándar (G_{STC}), la irradiancia actual instantánea (G), la temperatura de célula (T_c), la tensión de circuito abierto en condiciones estándar (V_{oc_STC}), la tensión de circuito abierto (V_{oc}) calculada mediante el modelo de Wagner, la corriente de cortocircuito en condiciones estándar (I_{sc_STC}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}) calculada mediante el modelo de Wagner, la tensión de célula en el punto de máxima potencia en condiciones estándar (V_{Max}), la intensidad de célula en el punto de máxima potencia en condiciones estándar (I_{Max}) y el coeficiente de variación con la temperatura de la potencia dada por la célula (∂).

Una vez especificadas las entradas del sistema de simulación, cabe destacar, que se ha implementado el modelo de simulación mostrado a continuación en la figura [50].

Aproximación de la potencia ideal de una célula según Abella:

$$P_m = P_m^* \frac{G}{G^*} [1 - \partial(T_c - T_c^*)]$$

Cálculo del factor de forma ideal (FFo) y el factor de forma (FF):

$$FFO = \frac{\frac{V_{oc}^* q}{K T_c} - \ln\left(\frac{V_{oc}^* q}{K T_c} + 0.72\right)}{\frac{V_{oc}^* q}{K T_c} + 1} \quad FF = \frac{V_{mp}^* I_{mp}^*}{V_{oc}^* I_{sc}^*}$$

Cálculo de la resistencia serie del modelo de simulación de la célula:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FFO}\right) \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$$

Ecuación característica del funcionamiento de la célula fotovoltaica:

$$I_c = I_{sc} \left[1 - e^{\left(\frac{V_c - V_{oc} + I_c R_s}{m \frac{K T_c}{q}}\right)} \right] - \frac{V + I_c R_s}{R_p}$$

Figura 50. Modelo matemático implementado en Simulink.

Con las ecuaciones especificadas en la figura anterior, se observa que se puede modelar una célula solar en el entorno de Simulink, destacando que se debe realizar un barrido de la tensión de célula en la duración de la simulación.

Planteando lo anteriormente mencionado y establecido en la explicación previa, se obtiene el modelo basado en programación por bloques que se muestra en la figura [51].

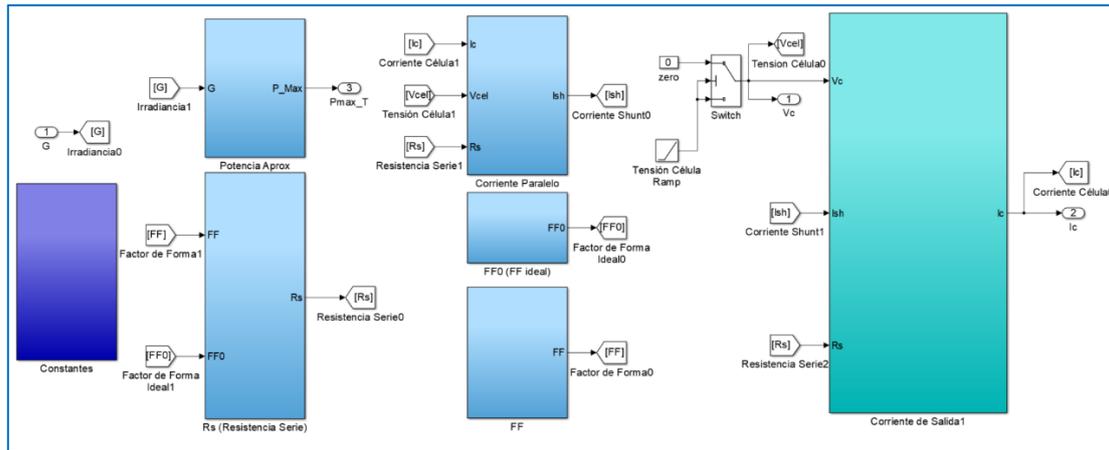


Figura 51. Implementación del modelo de simulación en Simulink.

Cada uno de los bloques se corresponde con cada una de las ecuaciones mostradas en la figura [50], y de forma global se consigue obtener la simulación de una célula fotovoltaica parametrizada en el entorno de Matlab de la forma anteriormente explicada.

Por último, todos los bloques anteriores están en el interior de un subsistema global denominado *célula solar*, el cual actúa como la carcasa de la propia célula, y de esta manera todo el funcionamiento interno de la misma se encuentra en un nivel inferior, realizando así un modelo jerárquico de fácil entendimiento para cualquier usuario que observe dicho programa.

Este subsistema denominado *célula solar* es el bloque de Simulink que se presenta a continuación en la figura [52] rodeado en color rojo.

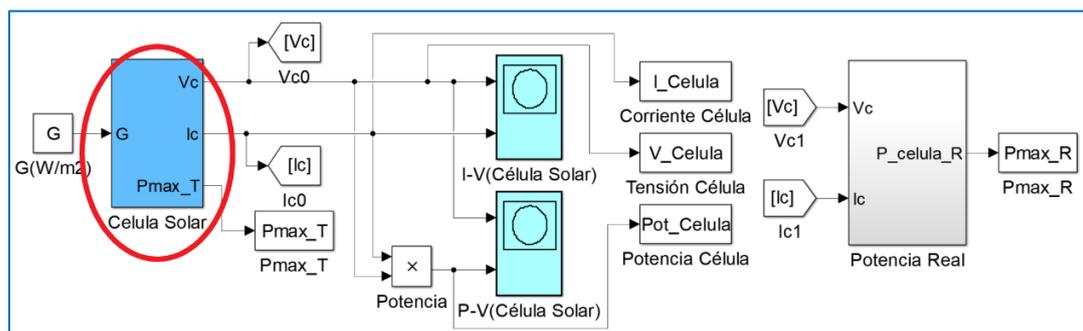


Figura 52. Bloque de Simulink denominado célula solar.

Además, en la imagen superior se puede observar cómo mediante los bloques *XY-Graph* de Simulink se dibujan las curvas características de la célula, y mediante con los bloques *To Workspace*, se llevan los valores de las potencias, tensión e intensidad al script principal de Matlab, y así almacenarlos en los vectores citados y explicados anteriormente.

5.4.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez implementadas ambas partes del proyecto de simulación de una célula solar fotovoltaica, solo falta iniciar la ejecución del programa global y dar paso a la obtención y justificación de los resultados.

Para poder contrastar los resultados de la simulación se han obtenido los datos reales de una célula solar de silicio monocristalino denominada *C60 solar Cell*, de Sunpower.

A continuación en la figura [53] se muestra la tabla de parámetros característicos de la célula fotovoltaica en condiciones estándar ofrecida por el fabricante.

Electrical Characteristics of Typical Cell at Standard Test Conditions (STC)						
STC: 1000W/m ² , AM 1.5g and cell temp 25°C						
Bin	P _{mpp} (Wp)	Eff. (%)	V _{mpp} (V)	I _{mpp} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)
G	3.34	21.8	0.574	5.83	0.682	6.24
H	3.38	22.1	0.577	5.87	0.684	6.26
I	3.40	22.3	0.581	5.90	0.686	6.27
J	3.42	22.5	0.582	5.93	0.687	6.28

All Electrical Characteristics parameters are nominal
Unlaminated Cell Temperature Coefficients
Voltage: -1.8 mV / °C Power: -0.32% / °C

Figura 53. Datasheet de la célula solar C60 de Sunpower.

En la figura anterior se pueden observar los diferentes parámetros de célula citados con anterioridad, en condiciones estándar, y que en mi programa, se pide al usuario que los introduzca por teclado.

En concreto, se van a comparar los datos aportados por el fabricante del primer modelo de esta gama de células, el modelo G de la célula C60 de Sunpower.

Para la correcta simulación de la célula solar escogida, se ejecuta el script *EjecucionCelula* desde Matlab y se introducen los parámetros en condiciones estándar de la célula y las entradas climatológicas del sistema de simulación (G y T_a). Cabe destacar que en este caso, para poder corroborar el funcionamiento de simulación, introduciré inicialmente el valor de G=G* y la T_a que haga que la T_c sea la temperatura de célula estándar T_c=298 K = 25°C.

En la figura [54] se observa el menú en el que se introducen los parámetros y entradas del sistema para la ejecución del programa.

```
|-----|
| PARAMETROS DE CÉLULA EN CONDICIONES ESTANDAR |
|-----|
| TENSION MÁXIMA EN Pmax(STC) [V]: 0.574
| INTENSIDAD MÁXIMA EN Pmax(STC) [A]: 5.83
| TENSION DE CIRCUITO ABIERTO (STC) [V]: 0.682
| CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (STC) [A]: 6.24
| IRRADIANCIA (STC) [W/m2]: 1000
| TONC (STC) [°C]: 47
| Delta [%/°C]: 0.0032
|-----|
| INTRODUCIR POR TECLADO LAS ENTRADAS |
|-----|
|--> IRRADIANCIA [W/m2]: 1000
|--> TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: -8.75
|-----|
| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN. |
|-----|
| ---> G es: 1000.00
| ---> Ta es: -8.75
|-----|
```

Figura 54. Menú para la introducción de parámetros de célula y entradas.

Una vez introducidos estos parámetros y las entradas que hacen que la célula se encuentre en condiciones estándar se obtiene los siguientes resultados, mostrados en la figura [55].

```
|-----|
| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN. |
|-----|
| ---> G es: 1000.00
| ---> Ta es: -8.75
|-----|
| La Pmax Ideal (Aprox) [W] es: 3.35
|-----|
| La Pmax Ideal (Sim) [W] es: 3.28
| La Vmax Ideal (Sim) [V] es: 0.56
| La Imax Ideal (Sim) [A] es: 5.91
|-----|
| La Pmax Real (Sim) [W] es: 2.68
|-----|
```

Figura 55. Resultados de la simulación de la célula de Sunpower.

En la anterior figura se puede observar que la potencia máxima ideal aproximada (*Pmax Ideal (Aprox)*) siguiendo la ecuación de aproximación de Miguel Alonso Abella, se obtiene un valor de 3.35W. Por otro lado, mediante la simulación de la célula fotovoltaica, teniendo en cuenta las variaciones por la irradiancia en el dispositivo fotovoltaico según el modelo de Wagner, se obtiene una potencia de 3.28W (*Pmax Ideal (Sim)*). Por último, se puede observar que el valor de la potencia real entregada por la célula, aplicando a la potencia ideal simulada un factor de rendimiento en el que se tiene en cuenta las pérdidas por caídas óhmicas, por mismatch, por la suciedad de la célula, pérdidas espectrales, debido al punto de máxima potencia y a la propia variación de la potencia, se obtiene un valor de 2.68W.

Por último, el resultado visual de la simulación, como bien se ha explicado con anterioridad, al finalizar la ejecución de este proyecto de simulación de un célula

fotovoltaica, se generan unas gráficas, las cuales son las curvas características de la célula. Estas gráficas son dependientes de la irradiancia a la que se quiere someter al dispositivo fotovoltaico y de la temperatura ambiente, también introducida por teclado. En este caso, al simular la célula en condiciones estándar de irradiancia y de temperatura de célula, se obtienen las curvas característica I-V y P-V mostradas a continuación en la figura [56].

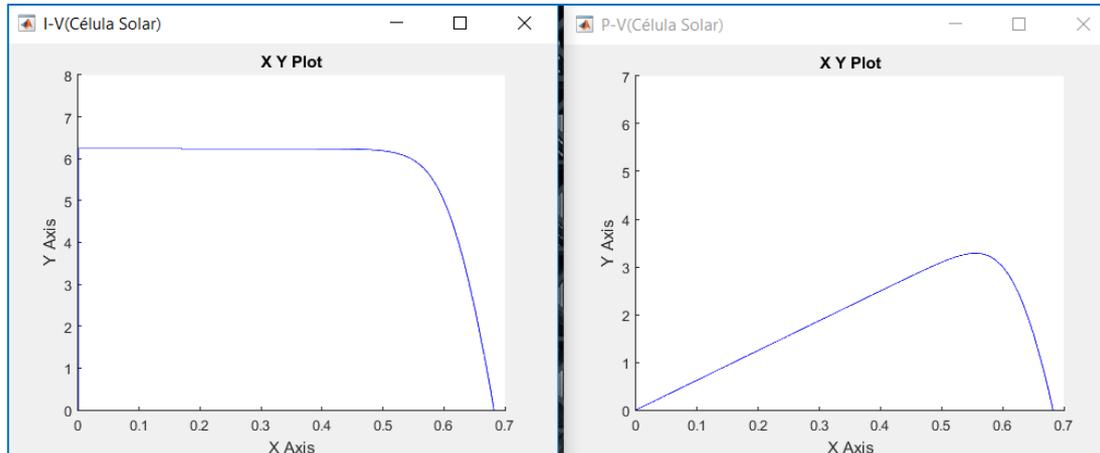


Figura 56. Curvas características de la célula simulada.

5.4.4. CONCLUSIONES

Contrastando los resultados obtenidos con los datos aportados por el fabricante de la célula C60, modelo G, de Sunpower, se puede observar lo siguiente.

El resultado de la potencia obtenida mediante la ecuación de aproximación de la potencia de Abella, representada en la figura [32], es un valor de potencia de 3.35W, que comparándolo con la potencia máxima obtenida por la célula según el fabricante (3.34W), se obtiene un error relativo de aproximadamente el 0.3%.

Por otro lado, según el modelo de simulación implementado en Simulink y que se ha tenido en cuenta la variación de los parámetros de célula según el modelo de Wagner, la potencia ideal máxima generada por la célula solar fotovoltaica C60 es de 3.28W, que comparando este resultado con la potencia máxima generada por la célula según el fabricante (3.34W), se obtiene un error relativo de aproximadamente el 1.8%.

Por tanto, como conclusión, se puede decir, que por medio de la ecuación de estimación de la potencia generada por una célula fotovoltaica, dependiente de las condiciones climáticas en las que se encuentre el dispositivo, hecha por Miguel Alonso Abella, es adecuada y presenta un error relativo prácticamente insignificante. Este resultado satisfactorio se obtiene debido a que tiene en cuenta ambos parámetros que modifican el comportamiento de la célula y se ajusta muy bien como estimación de la potencia posible generada por la célula fotovoltaica.



Por otro lado, mediante la aproximación de los parámetros del modelo de Wagner, los resultados de la potencia simulada de la célula difieren un poco más. Esto es debido a que la variación de los parámetros de la célula no es exacta, ya que mediante el modelo de Wagner, tanto en la corriente de cortocircuito como en la tensión de circuito abierto se realiza una aproximación, la cual, solamente es dependiente de la irradiancia que incide en ese momento sobre el dispositivo, despreciando la temperatura de célula y su efecto sobre el mismo. Además, en el modelo de Wagner, se realiza otra aproximación, y es que la corriente de cortocircuito de la célula será la corriente de célula generada en cada momento ($I=I_{sc}$). Es por ello que el resultado de la simulación de la potencia generada por la unidad básica de una instalación fotovoltaica difiere en un 1.8% de la potencia ideal aportada por el fabricante en condiciones estándar.

De todos modos, el modelo de Wagner, le he considerado adecuado para su implementación en el sistema de simulación, debido a que no busco el resultado absoluto, sino un programa que me permita la simulación de cualquier dispositivo fotovoltaico y que reporte un resultado fiable, para poder así comparar y estudiar diferentes dispositivos, de diferentes tecnologías de célula y de cualquier procedencia o fabricante del sector de la fotovoltaica.

5.5. SIMULACIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO

5.5.1. INTRODUCCIÓN

En el segundo programa desarrollado, se va a tratar de simular el comportamiento de un panel fotovoltaico ante diferentes valores de irradiancia y de temperatura ambiente. Para hacer un programa genérico y que sirva para cualquier panel que se encuentre en el mercado, se pide al usuario que introduzca los parámetros en condiciones estándar del mismo, que nos aporta el fabricante. Posteriormente se pide al usuario de nuevo, que teclee e introduzca la irradiancia G , y la temperatura ambiente, T_a , a la que se desea simular el panel. Además se introducirá el número de células en paralelo y en serie que conforma el panel a simular. Una vez introducidos estos parámetros, mediante el modelo de Wagner se calculan las variaciones de los parámetros en condiciones estándar, al igual que en el anterior programa de simulación implementado. Una vez introducidos estos parámetros, el programa internamente va a transcribir esos parámetros a nivel de célula, ya que es la parte fundamental de un panel, y augurando un buen funcionamiento al más bajo nivel, la extrapolación posterior a nivel de panel será satisfactoria. Entonces, se ejecuta la simulación del panel fotovoltaico. Por último, el sistema genera el valor de la potencia aproximada a nivel de panel en esas determinadas condiciones según la aproximación de la potencia ideal de Abella ilustrada en la figura [32], la potencia ideal obtenida después de la simulación del funcionamiento del panel fotovoltaico, obteniendo el punto de máxima potencia simulado. También se

obtiene la potencia real aportada por el panel bajo esas condiciones de temperatura e irradiancia.

Además, se representan las curvas I-V y P-V de la asociación de células que conforma el panel fotovoltaico, pudiendo así, visualizar también su comportamiento y obtener una completa monitorización del estado del dispositivo fotovoltaico a nivel de panel.

5.5.2. ESTRUCTURA Y EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA

5.5.2.1. Código de Matlab

En este segundo programa, en el que se va a simular un panel fotovoltaico, se parte de la base de operación del primero desarrollado y explicado anteriormente. Cabe destacar que en esta nueva simulación, para desarrollarlo de una forma más intuitiva y acorde a los *datasheet* de paneles fotovoltaicos, en vez de introducir los parámetros de célula, se van a introducir las características en condiciones estándar del panel fotovoltaico.

En cuanto a la estructuración del código y jerarquía del programa va a ser idéntico al anterior.

- **EjecucionPanel.m**

Este programa desarrollado en el entorno de Matlab será el *script* principal de esta nueva simulación, sería el homólogo a *EjecucionCelula* del anterior programa focalizado a, como su propio nombre indica, la célula solar.

Cabe destacar, que el funcionamiento de este programa principal consiste también en la organización jerárquica de invocaciones a las funciones que consiguen el objetivo global de esta simulación. Es decir, sería también el *main* de este nuevo proyecto.

- **Parametros.m**

Esta función de este nuevo programa de simulación va a ser exactamente idéntica a su homóloga en el programa desarrollado para la simulación de una célula, con la salvedad que en vez de introducir los parámetros de célula en condiciones estándar, se van a introducir los parámetros en condiciones estándar del panel a simular.

- **cargaParamPanel.m**

A continuación, una vez ejecutada la función *Parametros*, en el *script* principal del proyecto se pasa a invocar la función *cargaParamPanel*. La cual va a recibir como



argumentos todos los valores tecleados por el usuario anteriormente, correspondientes a los parámetros del panel en condiciones estándar.

Con estos parámetros, esta función lo que va a hacer es conformar una variable tipo struct denominada *panel*, la cual va a contener todas estas características en condiciones estándar. Sería la función homóloga a la función *cargaParamCelula* del anterior programa de simulación desarrollado en este documento.

- **EligePanel.m**

Esta función es la diferencia más notable en cuanto al funcionamiento del anterior programa, ya que en *EligePanel*, lo que se va a realizar es la introducción del número de células en serie y en paralelo que conforman el panel fotovoltaico que se va a simular mediante este programa. Este número de células se van a almacenar en las variables N_s y N_p respectivamente, y van a ser nuevas entradas al modelo de simulación implementado en Simulink.

El valor de estas variables va a permitir trabajar al modelo de Simulink a nivel de célula, tal y como se ha explicado anteriormente.

- **Irr_Temp.m**

La siguiente función que se invoca desde el script principal de este nuevo programa de simulación es la función que, al igual que en el primer programa de simulación, va a permitir la introducción por teclado de la irradiancia, G , y la temperatura ambiente, T_a , a la cual se quiere simular el panel fotovoltaico.

- **Diversos Comandos**

Después de introducir los parámetros en condiciones estándar del panel y las entradas del sistema de simulación implementado en Simulink, en el script principal se ejecutarán una serie de comandos por los motivos expuestos a continuación.

En primer lugar, se ejecuta el comando *find_system* con el nombre del modelo de Simulink para que encuentre la ubicación y la ruta a seguir para la posterior ejecución de dicho modelo.

En segundo lugar, se va a realizar una reserva de memoria asignando ceros a los vectores donde se van a almacenar los resultados de la simulación. Esta reserva de memoria nos permitirá realizar una simulación más ágil y obteniendo una adecuada velocidad computacional a la hora de la ejecución de la simulación.

Y para finalizar, se va a calcular la temperatura de célula en función del *TONC* y la temperatura ambiente, T_a , introducidos anteriormente por teclado.

- **Car_panel.m**

Mediante esta función se van a conseguir obtener los valores característicos de un panel fotovoltaico para una irradiancia, G , y una temperatura de célula, T_c , según el modelo de Wagner. Cabe destacar que la temperatura de célula y la de panel, se consideran iguales y homogéneas para dicha simulación.

Esta función va a ser la homóloga a la función *car_celula* del primer programa de simulación que se ha explicado en este documento. En este caso, al tratarse de la simulación de un panel, las entradas que recibe son las características estándar del panel y forma una variable tipo *struct* denominada *panel*, en la cual se contienen todos los parámetros modificados según el modelo de Wagner.

En esta función denominada *car_panel* se va a invocar también a otra subfunción denominada *parW_panel* (homóloga a *parW_celula* del anterior programa desarrollado), la cual es una subrutina que determina los parámetros del modelo de Wagner de una panel (R_{pv} , V_t , I_0 , I_l), a partir de las características en condiciones estándar. Esta subrutina va a devolver los parámetros de Wagner a la función *car_panel* y de esta manera se obtendrán los valores característicos del panel solar (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp}) modificados y dependientes de la irradiancia y temperatura.

- **cargaParamSimulink.m**

Esta función realiza exactamente lo mismo que su homóloga en el anterior programa. En este caso se delimita a cargar las variables de entrada en el modelo de Simulink, pero a nivel de panel.

- **Ejecución de la simulación**

Una vez calculados todos los parámetros e introducidas todas las entradas que requiere el modelo de simulación del panel fotovoltaico implementado en Simulink, se pasa a ejecutar dicho modelo y al funcionamiento de la simulación, la cual se explicará en detalle en el siguiente apartado del presente documento.

En este segundo programa, las entradas, como se ha visto hasta ahora es a nivel de panel, por tanto, como el modelo de Simulink implementado trabaja internamente a nivel de célula, se deben obtener los valores de célula en base a los parámetros del panel y así poder obtener una gran precisión de simulación trabajando al nivel más básico de la fotovoltaica. Es por ello, que en las características generales de este nuevo modelo de Simulink se debe realizar una división de los parámetros del panel entre el número de células que conforman el propio panel a simular.

Como se puede intuir, antes de arrancar el modelo de simulación, se realizan los ajustes mostrados en la figura [57] en las entradas del nuevo sistema de Simulink.

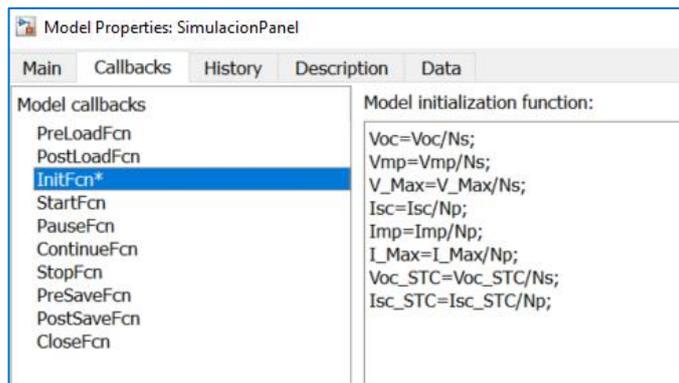


Figura 57. Transcripción de entradas a nivel de célula.

Por último, en este apartado, cabe destacar que una vez realizados todos los cálculos de simulación a nivel de célula, el propio sistema de Simulink extrapola a parámetros de panel y los resultados obtenidos son los mismos que en el modelo de simulación del programa en el que se simula solamente una célula, pero como es lógico, a nivel de panel.

- **MMP.m**

Una vez ejecutada la simulación del panel en el entorno de Simulink y obtenidas las variables de tipo vector que se obtienen como salida, en el script principal del proyecto se va a invocar la función *MMP*, función que se va a encargar de obtener el punto de máxima potencia del panel simulado. Para conseguir este objetivo, se necesita pasar como argumento de entrada el vector *Pmax_T*, en el cual se almacenan cada una de las potencias obtenidas en la simulación correspondientes a cada uno de los cien puntos recogidos durante el barrido de tensión que se realiza en Simulink. Entonces, al igual que se realizaba en la función *MMP* a nivel de célula, se realiza aquí a nivel de panel y se obtiene el índice del vector de potencias en el cual se encuentra la máxima potencia del panel simulada.

- **creaVect.m**

Una vez obtenido el índice en el que se encuentra la máxima potencia simulada del panel, los resultados obtenidos son los mismos que se obtenían en esta misma función en el anterior programa en el que se simulaba una única célula. Pero en este caso, los resultados que se muestran son las mismas potencias pero a nivel de panel.

- **muestrPot.m**

Por último, una vez obtenido cada uno de los vectores en los que se encuentra el valor máximo de cada variable obtenida en el desarrollo de la simulación, se muestra por pantalla, al igual que se realizaba a nivel de célula en el anterior programa.

5.5.2.2. Implementación en Simulink

En cuanto al modelo de Simulink implementado en este nuevo proyecto de simulación de panel fotovoltaico, la base y por tanto el modelo matemático es idéntico al anterior y el mostrado en la figura [50], ya que como bien se ha explicado, aunque en este programa se parametrize un panel fotovoltaico, los cálculos internos de simulación se realizan a nivel de célula. Es por ello que el modelo de simulación implementado en este programa a nivel de célula es idéntico al mostrado en la figura [51].

Una vez explicado esto, como bien se sabe, ahora el objetivo es obtener resultados a cerca de un panel fotovoltaico, por lo que las entradas N_s (número de células en serie) y N_p (número de células en paralelo) entran en juego.

Siguiendo una organización jerárquica del modelo de simulación, al igual que el funcionamiento interno de una célula se envolvía en un subsistema denominado célula solar, ahora, se envuelve el funcionamiento del panel, en una carcasa denominada *panel fotovoltaico*, mostrado en la figura [58].

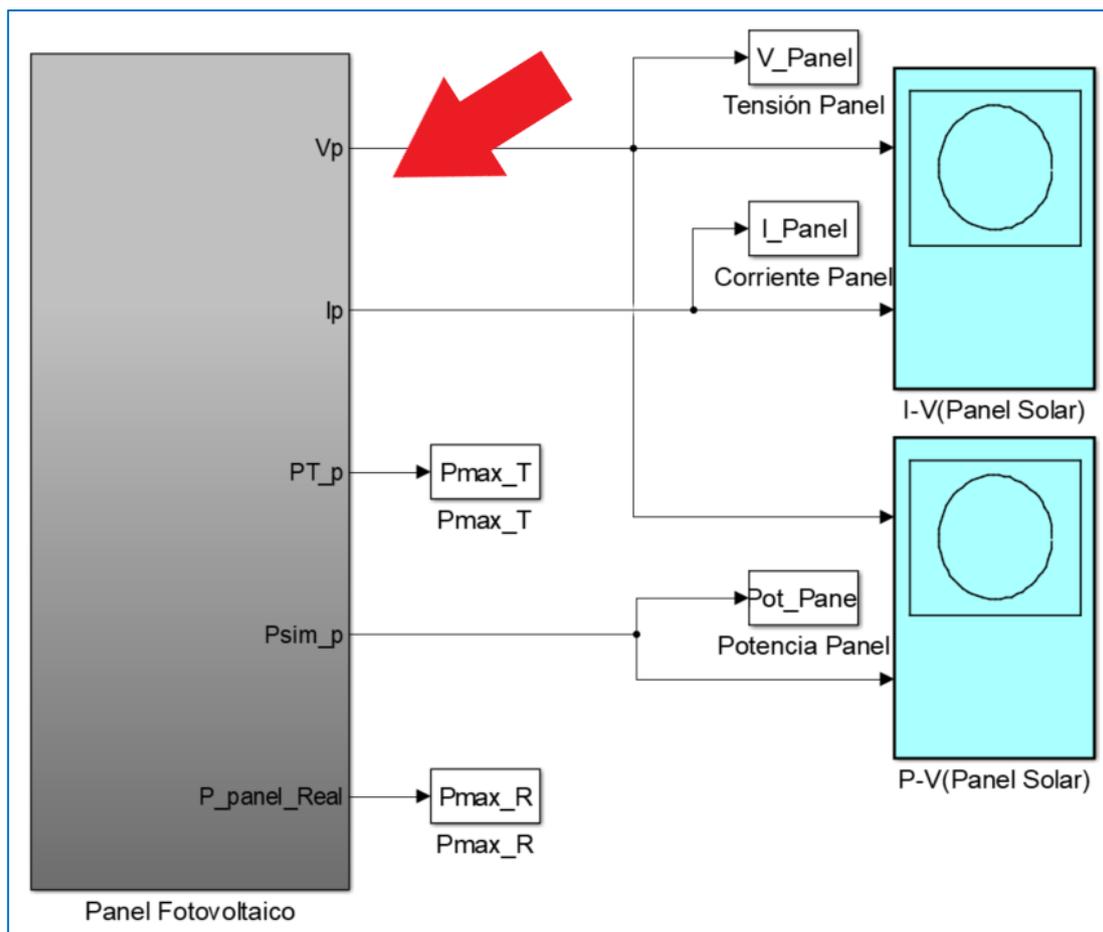


Figura 58. Bloque de Simulink denominado Panel Fotovoltaico.

En el interior de este subsistema se tendrá el funcionamiento del panel fotovoltaico, haciendo uso del subsistema *Célula Solar* en el cual se centra todo el funcionamiento interno a nivel de célula, y las variables N_s y N_p para la extrapolación del funcionamiento a nivel de panel. El interior de este bloque denominado *Panel Fotovoltaico* se muestra a continuación en la figura [59].

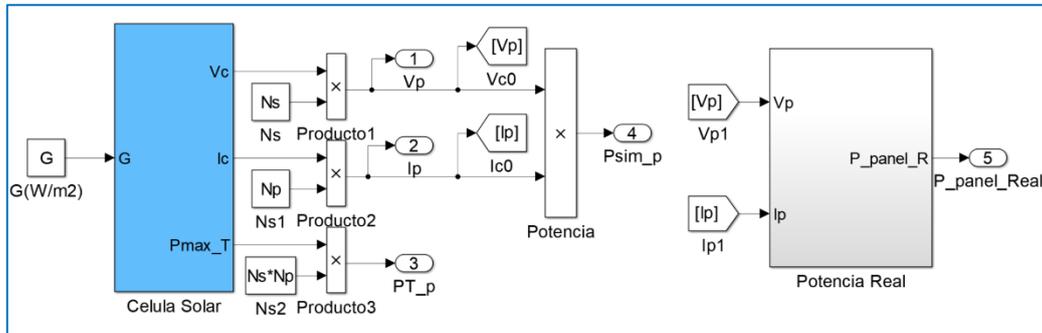


Figura 59. Modelo del panel fotovoltaico en Simulink.

5.5.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Una vez implementadas ambas partes del proyecto de simulación de un panel fotovoltaico, solo falta iniciar la ejecución del programa global y dar paso a la obtención y justificación de los resultados.

Para poder contrastar los resultados de la simulación se han obtenido los datos reales de una panel de silicio monocristalino denominado *I-106/12*, de Isofoton.

A continuación en la figura [60] se muestra la tabla de parámetros característicos del panel fotovoltaico en condiciones estándar ofrecida por el fabricante.

Electrical Characteristics	
STC Power Rating P_{mp} (W)	106
Open Circuit Voltage V_{oc} (V)	21.6
Short Circuit Current I_{sc} (A)	6.54
Voltage at Maximim Power V_{mp} (V)	17.4
Current at Maximim Power I_{mp} (A)	6.10
Panel Efficiency	12.4%
Fill Factor	75.0%
Power Tolerance	
Maximum System Voltage V_{max} (V)	760
Maximum Series Fuse Rating (A)	
Temperature Coefficients	
Temperature Coefficiency of I_{sc}	0.060 %/°C
Temperature Coefficiency of V_{oc}	-0.36 %/°C
Temperature Coefficiency of P_{mp}	
Mechanical Characteristics	
Cell Type	Monocrystalline Cell
Cell Size(mm)	
Cells	36

Figura 60. Datasheet del panel I-106/12 de Isofoton.

En la figura anterior se pueden observar los diferentes parámetros del panel citados con anterioridad, en condiciones estándar, y que en mi programa, se pide al usuario que introduzca por teclado.

Para la correcta simulación del panel escogido, se ejecuta el script *EjecucionPanel* desde Matlab y se introducen los parámetros en condiciones estándar del módulo y las entradas climatológicas del sistema de simulación (G y T_a), además del número de células en serie y en paralelo que componen el módulo a simular. Cabe destacar que en este caso, para poder corroborar el funcionamiento de simulación, introduciré inicialmente el valor de $G=G^*$ y la T_a que haga que la T_c sea la temperatura de célula estándar $T_c=298\text{ K} = 25^\circ\text{C}$.

En la figura [61] se observa el menú en el que se introducen los parámetros y entradas del sistema para la ejecución del programa.

```

|-----|
| PARAMETROS DE PANEL EN CONDICIONES ESTANDAR |
|-----|
| TENSION MÁXIMA EN Pmax(STC) [V]: 17.4 |
| INTENSIDAD MÁXIMA EN Pmax(STC) [A]: 6.1 |
| TENSION DE CIRCUITO ABIERTO (STC) [V]: 21.6 |
| CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (STC) [A]: 6.54 |
| IRRADIANCIA (STC) [W/m2]: 1000 |
| TONC (STC) [°C]: 47 |
| Delta [%/°C]: 0.0036 |
|-----|
| INTRODUZCA EL NÚMERO DE CÉLULAS DEL PANEL. |
|-----|
| Ns (Células serie): 36 |
| Np (Células paralelo): 2 |
|-----|
| INTRODUCIR POR TECLADO LAS ENTRADAS |
|-----|
|--> IRRADIANCIA [W/m2]: 1000 |
|--> TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: -8.75 |
|-----|
| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN. |
|-----|
|--> G es: 1000.00 |
|--> Ta es: -8.75 |

```

Figura 61. Menú para la introducción de parámetros del panel y entradas.

Una vez introducidos estos parámetros y las entradas que hacen que el panel se encuentre en condiciones estándar se obtiene los siguientes resultados, mostrados en la figura [62].

```

|-----|
| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN. |
|-----|
|--> G es: 1000.00 |
|--> Ta es: -8.75 |
|-----|
| La Pmax Ideal (Aprox) [W] es: 106.14 |
|-----|
| La Pmax Ideal (Sim) [W] es: 105.54 |
| La Vmax Ideal (Sim) [V] es: 17.28 |
| La Imax Ideal (Sim) [A] es: 6.11 |
|-----|
| La Pmax Real (Sim) [W] es: 86.05 |
|-----|

```

Figura 62. Resultados de la simulación del panel de Isofoton.

En la anterior figura, se puede observar que la potencia máxima ideal aproximada ($P_{max\ Ideal\ (Aprox)}$), siguiendo la ecuación de aproximación de Miguel Alonso Abella, se obtiene un valor de 106.14W. Por otro lado, mediante la simulación de la célula fotovoltaica, teniendo en cuenta las variaciones por la irradiancia en el dispositivo fotovoltaico según el modelo de Wagner, se obtiene una potencia de 105.54W ($P_{max\ Ideal\ (Sim)}$). Por último, se puede observar que el valor de la potencia real entregada por la célula, aplicando a la potencia ideal simulada un factor de rendimiento en el que se tiene en cuenta las pérdidas por caídas óhmicas, por mismatch, por la suciedad de la célula, pérdidas espectrales, debido al punto de máxima potencia y a la propia variación de la potencia, se obtiene un valor de 86.05W.

Por último, en cuanto al resultado visual de la simulación, como bien se ha explicado con anterioridad, al finalizar la ejecución de este proyecto de simulación de un panel fotovoltaico, se generan las curvas características del panel mostradas a continuación en la figura [63].

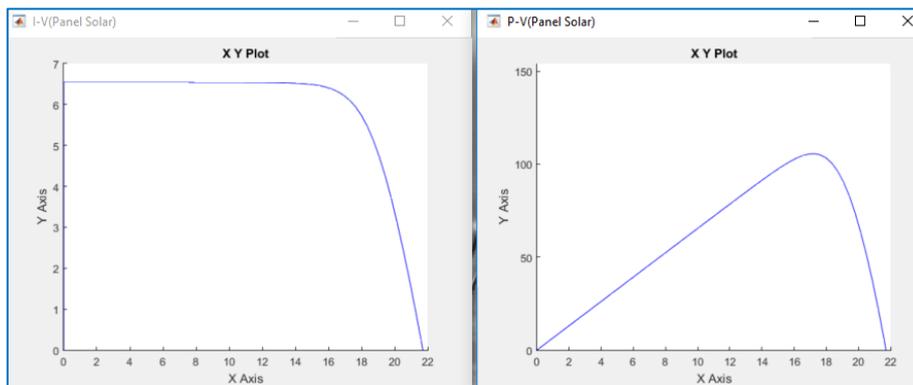


Figura 63. Curvas características del panel simulado.

5.5.4. CONCLUSIONES

Contrastando los resultados obtenidos con los datos aportados por el fabricante del panel de Isofoton, modelo I-106/12, se puede observar lo siguiente.

El resultado de la potencia obtenida mediante la ecuación de aproximación de la potencia de Abella, representada en la figura [32], es un valor de potencia de 106.14W, que comparándolo con la potencia máxima obtenida por la célula según el fabricante (106W), se obtiene un error relativo de aproximadamente el 0.13%.

Por otro lado, según el modelo de simulación implementado en Simulink y que se ha tenido en cuenta la variación de los parámetros del panel según el modelo de Wagner, la potencia ideal máxima generada por el panel en cuestión es de 105.54W, que comparando este resultado con la potencia máxima generada por la célula según el fabricante (106W), se obtiene un error relativo de aproximadamente el 0.43%.

Por tanto, se puede concluir, que mediante la simulación en la que se tiene en cuenta la variación de los parámetros en condiciones estándar según el modelo de Wagner se consiguen unos resultados muy próximos al fabricante, siendo una aproximación fiable en cuanto a la obtención de resultados no absolutos.

Mediante la simulación de cualquier panel, empleando el programa desarrollado, va a presentar unos resultados fiables y relativos para poder comparar cualquier tipo de panel, de cualquier naturaleza y que implemente cualquier tecnología de célula.

Cabe destacar, que actualmente en el mercado, cuando se va a implementar una instalación fotovoltaica, los fabricantes nos presentan diferentes módulos o paneles fotovoltaicos, no células aisladas, es por ello que este segundo programa, en el que se obtienen resultados de potencia a nivel de panel, tiene un mayor interés comercial que el primer modelo de simulación descrito en este documento.

5.6. SIMULACIÓN DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

5.6.1. INTRODUCCIÓN

En este tercer y último programa de simulación se va a poder simular una célula, un panel, o una instalación fotovoltaica. La principal diferencia con respecto a los anteriores programas es que el usuario no va a teclear directamente las entradas de irradiancia y temperatura ambiente, sino que se va a programar un algoritmo que sea capaz de leer esos datos de un fichero por pares, obtenidos del programa de adquisición de datos anteriormente explicado en este documento, llamado *Meteonorm*.

De esta forma, el usuario puede simular cualquiera de los tres elementos citados, en el tramo de tiempo de un año, en una situación especificada que él desee. Pudiendo elegir si los datos de irradiancia y temperatura ambiente de esa ciudad se sucedan minuto a minuto u hora a hora.

Este último programa de simulación se ha realizado con el propósito de observar la evolución de la potencia simulada que es capaz de generar un elemento fotovoltaico en una ubicación específica del mundo en la que se quiera, por ejemplo, desarrollar una instalación fotovoltaica completa.

Para llevar a cabo lo enunciado se ha desarrollado un programa basado en los dos anteriores, tal y como se va a explicar a continuación en el siguiente apartado del documento.



5.6.2. ESTRUCTURA Y EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA

5.6.2.1. Código de Matlab

Como bien se ha explicado, este programa de simulación se ha basado en el principio de funcionamiento de los dos programas desarrollados anteriormente. En este caso, lo que se va a parametrizar es el o los paneles que constituyen la instalación fotovoltaica, y mediante lo visto en el anterior programa de simulación, en el que se ejecutaba un panel fotovoltaico, se va a trabajar a nivel de célula y posteriormente extrapolando de nuevo a panel o en su caso, a instalación fotovoltaica, si existen varios paneles en la instalación de energía fotovoltaica que se quiere simular.

Entonces, como muchas de las funciones que se emplean en este nuevo programa de simulación ya han sido explicadas anteriormente, solo se incidirá sobre aquellas que resulten novedosas en este modelo de simulación.

- **EjecucionInstalacion.m**

EjecucionInstalacion va a ser el *script* principal de este proyecto de simulación, el cual, al igual que los *script* principales de los anteriores programas desarrollados, va a dedicarse a organizar todas las funciones y el modelo de Simulink que intervenga en este tercer programa de simulación en el ámbito de la fotovoltaica.

Cabe destacar, que a diferencia de los anteriores *main*, este va a programarse de tal manera que permita la ejecución cíclica, ya que lo que se pretende en este proyecto es la obtención de las entradas (T_a y G) de un fichero durante un tramo de tiempo especificado.

- **Parametros.m**

En esta función, al igual, que en el anterior programa, se van a introducir por teclado los parámetros en condiciones estándar del tipo de panel que constituya la instalación a simular.

- **cargaParamPanel.m**

La función *cargaParamPanel* es idéntica a su función homóloga, que tiene el mismo nombre, en el anterior programa donde se simulaba un único panel solar. Su funcionamiento es exactamente el mismo.

- **EligePanel.m**

Una vez ejecutadas las dos funciones anteriores en el *script* principal de este proyecto, se pasa a especificar el número de células que posee el tipo de panel que se va a emplear en la instalación fotovoltaica a simular.

- **EligeInstal.m**

Esta función, únicamente permite al usuario introducir el número de paneles que conforma la instalación fotovoltaica si hubiera más de uno.

- **MenuTiempo.m**

Una vez introducidos los parámetros del panel, y el número de ellos que conforman la instalación, en el *script EjecucionInstalacion* se va a ejecutar esta función, la cual va a permitir al usuario especificar la unidad de tiempo en la que se van a medir las irradiancias y las temperaturas del fichero que posteriormente se seleccionará.

Es decir, si los datos se van a leer hora a hora o minuto a minuto. Para obtener estos datos cada minuto se deberá introducir “MINUTO”, y si por el contrario se desean leer los datos cada hora se debe introducir “HORA”. Para ello, se ha desarrollado un menú que tiene el aspecto que se muestra a continuación en la figura [64].

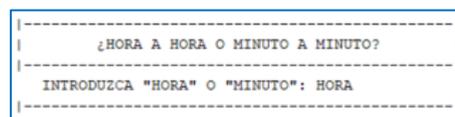


Figura 64. Menú para indicar la unidad de tiempo.

- **seleccionFichero.m**

Una vez seleccionada la unidad de tiempo, se ejecutará la función denominada *seleccionFichero*, la cual va a permitir al usuario cargar el fichero de la ciudad en la unidad de tiempo previamente seleccionada que se quiere simular. Cabe destacar que este fichero seleccionado contiene los datos de la ciudad que aparece en su nombre, de temperatura e irradiancia a lo largo de un año, extraído previamente desde Meteonorm.

En la figura [65] que se muestra a continuación, se va a observar un ejemplo de ejecución de este momento en el que se elige el fichero del que se quieren extraer estos datos meteorológicos.

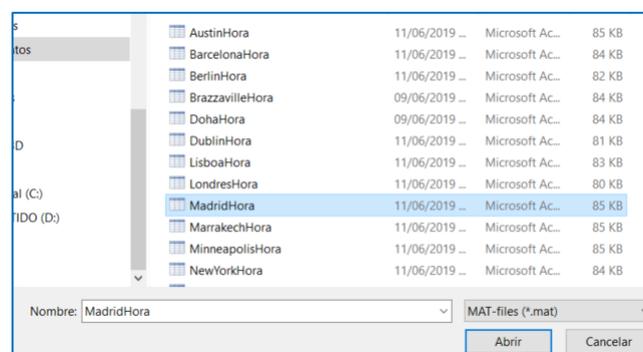


Figura 65. Selección del fichero de datos a cargar en la simulación.



- **Menu Tramo Tiempo.m**

Entonces, una vez seleccionado el fichero, el programa desarrollado ya sabe de qué fichero tiene que obtener los datos de irradiancia, G , y temperatura ambiente, T_a . Entonces, solo falta indicar al programa el tramo de ese fichero que se quiere leer, especificando así el día en el que se quiere arrancar la simulación y el día en el que se quiere finalizar. De esto se encargará la función *Menu_Tramo_Tiempo*, siguiente función que se invoca desde el *script* principal del programa.

En esta función, lo que se realiza es un menú en el cual se solicita al usuario que introduzca el día y el mes inicial de la simulación y el día y mes final, especificando de esta manera que fragmento del fichero previamente seleccionado se quiere leer.

- **Rango.m**

Mediante la selección anterior del tramo de tiempo a simular, la función denominada *Rango*, va a realizar los cálculos pertinentes para obtener la posición exacta del fichero en el que se quiere empezar y finalizar a leer las irradiancias y temperaturas del fichero seleccionado, almacenando todos esos valores en dos vectores diferenciados, uno para las irradiancias y otro para las temperaturas ambiente leídas.

- **Diversos Comandos**

Posteriormente a estas funciones de selección, se va a programar el carácter cíclico del programa, en el cual se va a recorrer cada uno de los vectores de temperatura ambiente e irradiancia que se han formado al leerse dichos valores del fichero de datos elegido. De esta forma se ejecutará las funciones *car_panel*, *cargaParamSimulink*, la propia simulación del modelo de Simulink, *MMP*, y las funciones encargadas de mostrar los resultados de cada simulación, como son *creaVect* y *muestraPot*, para cada uno de los pares leídos de irradiancia y temperatura ambiente.

De esta forma en cada iteración del ciclo se van a almacenar los valores máximos de potencia generados para cada uno de los pares de irradiancia y temperatura ambiente leídos y posteriormente simulados.

- **imprimeGraficas.m**

Una vez almacenados los valores de máxima potencia de cada iteración, se puede realizar un seguimiento gráfico de las potencias máximas generadas en cada instante concreto de irradiancia y temperatura a lo largo del periodo de tiempo simulado y en la unidad de tiempo elegida. Es por ello, que la última función que se invoca en el *script* principal sea *imprimeGraficas*, la cual realiza esta tarea.

5.6.2.2. Implementación en Simulink

En este último programa, en el que se simula una instalación fotovoltaica, la base es la misma que la de los dos programas anteriores, se trabaja a nivel de célula y posteriormente se extrapola a panel y por último, a instalación, obteniendo de esta manera la potencia total simulada y generada por la instalación completa.

Es por ello, que al introducir el concepto de instalación, siguiendo la programación basada en bloques jerárquica de los programas anteriores, se debe introducir un nuevo nivel, el de la instalación fotovoltaica, que como se muestra en la figura [66], se denomina *Instalación Fotovoltaica*.

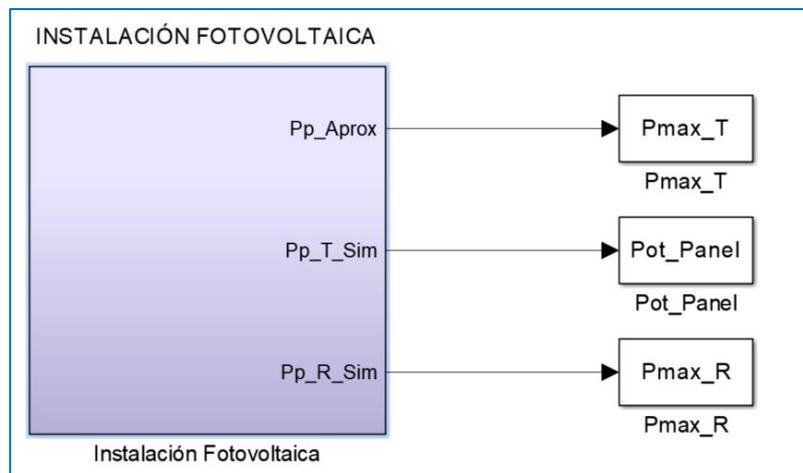


Figura 66. Bloque de Simulink denominado *Instalación Fotovoltaica*.

5.6.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Una vez implementadas ambas partes del proyecto de simulación de una instalación fotovoltaica, solo falta iniciar la ejecución del programa global y dar paso a la obtención y justificación de los resultados.

En primer lugar, cabe destacar que se deben introducir todos los parámetros característicos de un panel solar en condiciones estándar, el número de células del panel, el número de paneles de la instalación y completar todos los menús anteriormente explicados para la selección del tramo y unidades de tiempo en las que se quiere simular.

Una vez completados todos estos campos que se pide al usuario rellenar, se procede a la ejecución del algoritmo global para la simulación completa del sistema de estudio.

En la figura [67] se van a mostrar los parámetros y entradas del sistema que se han tecleado para observar un ejemplo de simulación del programa.

PARAMETROS DEL PANEL EN CONDICIONES ESTANDAR	¿HORA A HORA O MINUTO A MINUTO?
TENSION MÁXIMA EN Pmax(STC) [V]: 17.4	INTRODUZCA "HORA" O "MINUTO": HORA
INTENSIDAD MÁXIMA EN Pmax(STC) [A]: 6.1	¿QUE FICHERO DESEA LEER?
TENSION DE CIRCUITO ABIERTO (STC) [V]: 21.6	SELECCIONA EL FICHERO DESEADO A LEER.
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (STC) [A]: 6.54	
IRRADIANCIA (STC) [W/m2]: 1000	
TONC (STC) [°C]: 47	
Delta [%/°C]: 0.0036	
INTRODUZCA EL NÚMERO DE CÉLULAS DEL PANEL.	;;;SI SE HA ELEGIDO MINUTO A MINUTO!!!
Ns (Células serie): 36	(Elegir una simulación de solamente un día)
Np (Células paralelo): 2	INTRODUZCA FECHA DE INICIO DE SIMULACIÓN
INTRODUZCA EL N° DE PANELES DE LA INSTALACIÓN	MES INICIAL: 6
Nps (Paneles serie): 1	DIA INICIAL: 1
Npp (Paneles paralelo): 1	INTRODUZCA FECHA DE FIN DE SIMULACIÓN
	MES FINAL: 6
	DIA FINAL: 30

Figura 67. Selección para la simulación de una instalación fotovoltaica.

Se puede observar en la anterior imagen, que se ha seleccionado una instalación formada por un único panel conformado por 36 células en serie y 2 en paralelo. Además se ha elegido que los datos del fichero seleccionado (MadridHora.mat) se lean hora a hora, obteniendo los resultados de simulación durante todo el mes de Junio.

Por tanto, una vez hecha la previa selección a la simulación se ejecuta el modelo programado y se podrá observar el seguimiento de la máxima potencia ideal aproximada según Abella, la máxima potencia simulada teniendo en cuenta la variación de los parámetros del panel según Wagner, y la potencia real aportada por la instalación. Además, se obtendrá un seguimiento de la temperatura ambiente y la irradiancia que se ha ido leyendo hora a hora.

En primer lugar, se va a mostrar el seguimiento de la temperatura ambiente, T_a , que se ha simulado en este caso, tal y como se muestra en la figura [68].

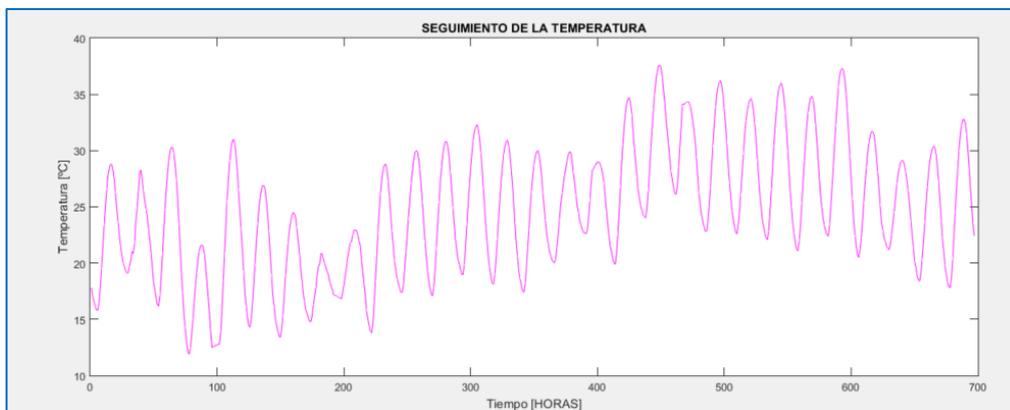


Figura 68. Seguimiento de la temperatura ambiente utilizada en la simulación.

En segundo lugar, se observará la variación de la irradiancia que se ha ido leyendo en cada hora de simulación, tal y como se muestra en la figura [69].

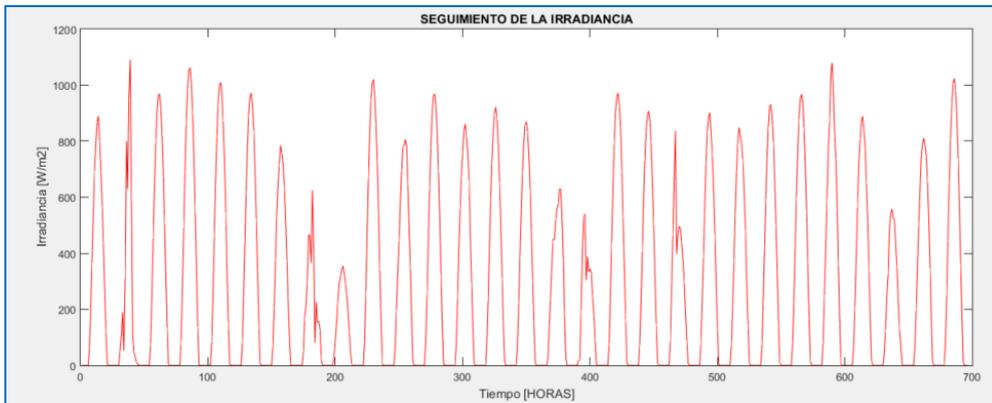


Figura 69. Seguimiento de la irradiancia utilizada en la simulación.

En tercer lugar, se observará el seguimiento de la potencia ideal aproximada de la instalación según la ecuación de Abella, tal y como se muestra en la figura [70].

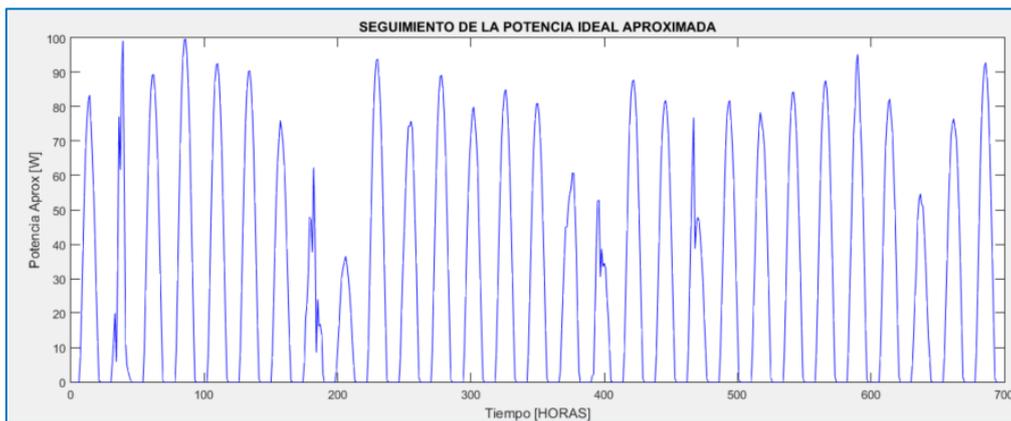


Figura 70. Seguimiento de la potencia ideal aproximada por hora.

En cuarto lugar, se observará el seguimiento de la potencia ideal simulada de la instalación en el modelo planteado, tal y como se muestra en la figura [71].

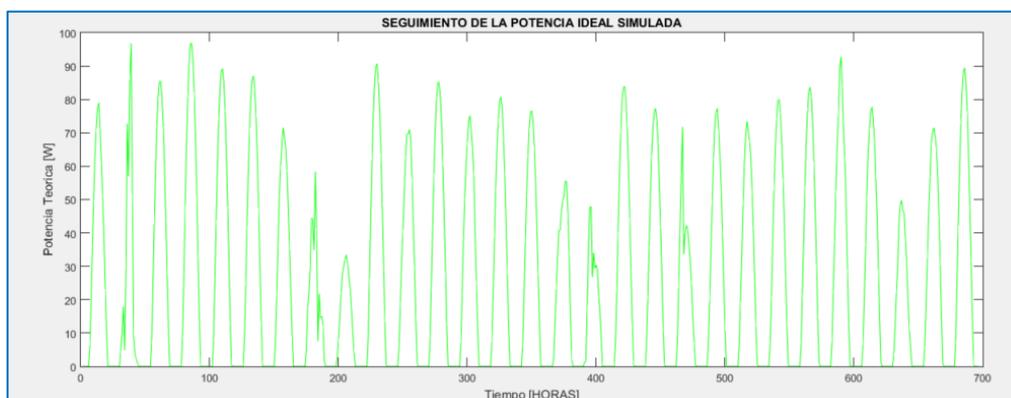


Figura 71. Seguimiento de la potencia ideal simulada por hora.

Por último, se observará el seguimiento de la potencia real simulada de la instalación en el modelo planteado, tal y como se muestra en la figura [72].

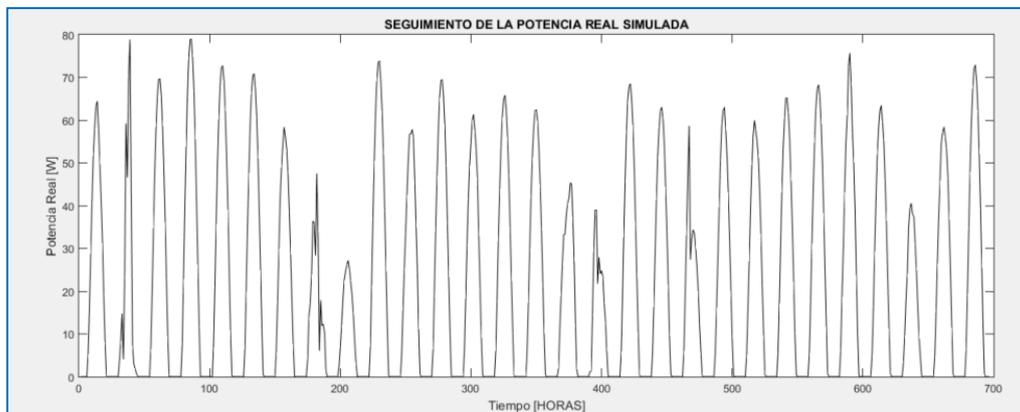


Figura 72. Seguimiento de la potencia real simulada por hora.

Cabe destacar, que si la elección hubiera sido minuto a minuto, los resultados tendrían el mismo aspecto, pero resultaría más eficiente simular solamente un día, ya que si se simula también un mes, el tiempo de simulación se demora demasiado.

Por último, en Matlab, como se ha explicado anteriormente, se generan tres vectores en los cuales se almacenan todos los puntos de máxima potencia ideal aproximada, ideal simulada y real simulada, para cada irradiancia y temperatura ambiente, que se generan en el *workspace* de Matlab. Estos vectores se han generado para almacenar estas potencias y poder llevarlas a la siguiente fase de una instalación fotovoltaica, el inversor, y seguir estudiando y simulando una planta fotovoltaica partiendo de datos de irradiancia y temperatura reales.

5.6.4. CONCLUSIONES

Una vez realizada la simulación de una instalación fotovoltaica mediante el modelo de simulación de interacción entre Matlab y Simulink, se puede concluir que los resultados obtenidos son valores fiables y relativos en cuanto a la potencia extraída por la instalación, ya que en este proyecto no se ha buscado la exactitud absoluta, sino que se obtengan resultados fiables y que sirvan de orientación a la hora de observar el comportamiento de una instalación ante diferentes entornos ambientales.

Con este último programa, se ha observado que el modelo general que se ha planteado para la simulación de una célula, teniendo en cuenta la variación de los parámetros característicos, en función de la temperatura e irradiancia incidente en el dispositivo, ha sido adecuado y se ha corroborado su buen funcionamiento.

Por último, quería destacar la importancia en este proyecto, de la parte de adquisición de datos por parte del programa Meteonorm, ya que gracias a esta herramienta he podido manejar datos de irradiancia y temperatura ambiente reales, de tal forma que las células, paneles e instalaciones simuladas se han visto ante entradas realistas, que dependiendo de su posible ubicación en la realidad, pueden ser favorables o desfavorables para la generación de energía por parte de la instalación fotovoltaica.



6. CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO

Para concluir el proyecto que se ha realizado en el presente documento, es necesario exponer una serie de consideraciones finales y así finalizar la realización del mismo.

En primer lugar, en el trabajo desarrollado a cerca la energía solar fotovoltaica, cabe decir que se ha realizado un estudio del estado del arte de las tecnologías de célula e innovaciones venideras en un futuro próximo. En cuanto a los materiales que predominan en la actualidad a la hora de la fabricación de dispositivos fotovoltaicos cabría destacar el silicio, ya que es el material preponderante en el mercado actualmente. Sin embargo, como se ha recogido en este documento, existen diversas ramas de investigación. Como pueden ser los nuevos materiales que se están descubriendo paulatinamente para intentar competir con la hegemonía del silicio o las diferentes técnicas de fabricación que se están desarrollando para el abaratamiento general de costes de construcción. Además, este estudio sobre la situación actual de la fotovoltaica permite obtener una vista global de las tecnologías y materiales que se van a emplear en un futuro no muy lejano, y que se instaurarán en cualquier tipo de instalación fotovoltaica que se pueda observar en cualquier ubicación mundial.

Por otro lado, lo que es la parte práctica del proyecto, he de decir que se ha desarrollado un sistema de simulación bastante robusto para la prueba de diferentes dispositivos fotovoltaicos y para la observación de su comportamiento ante diferentes condiciones climáticas, con diferentes irradiancias y temperaturas, ante las que se puede situar una instalación fotovoltaica. Mediante el sistema de simulación planteado, se ha conseguido obtener una estimación de la potencia generada por los elementos fotovoltaicos, estando listo de esta manera su posible utilización para la siguiente etapa de la instalación, que sería material suficiente para desarrollar otro trabajo fin de grado como el realizado. De esta manera continuista, se ha pretendido obtener los resultados y no solo contrastarlos, sino almacenarlos para, como bien he dicho, poder emplearlos en un futuro en diversos proyectos para la continua y completa simulación de una instalación fotovoltaica.

De forma global, se podría decir que en esta vertiente de la investigación, la tecnología fotovoltaica requiere una creciente importancia. Esto es debido a que las diferentes formas de obtención de energía en las que se emplean recursos fósiles cada vez son más problemáticas para la sociedad y ecosistemas del mundo entero. Es por ello, que un intenso estudio sobre las diversas vías posibles para la instalación de sistemas de energía fotovoltaica puede ser vital para la obtención total de la energía demandada en un futuro. Todo ello, sin existir una gran dependencia de recursos, salvo los materiales con los que se fabrican los dispositivos fotovoltaicos y la fuente de energía necesaria para su funcionamiento.



7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Rasero, C. M. (2011). Energía solar fotovoltaica. *Energía solar fotovoltaica, situación actual*.
- [2]. Venkateswari, R., & Sreejith, S. (2019). Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 376-394.
- [3]. Abella, M. A. (2005). *Sistemas fotovoltaicos*. SAPT Publicaciones Técnicas, SL.
- [4]. de Telecomunicación, C. O. D. I. (2002). *Energía solar fotovoltaica*. Editorial Ibergraphi, España.
- [5]. Lamigueiro, O. P. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Versión 1.22. marzo 2011.
- [6]. Manzanares, J. L. B. (2007). *Tecnología de células solares de silicio cristalino*.
- [7]. Kasap, S., & Capper, P. (Eds.). (2017). *Springer handbook of electronic and photonic materials*. Springer.
- [8]. *Electricity from Sunlight: "An Introduction to Photovoltaics"* (Hardcover), Paul A. Lynn, John Wiley & Sons, 2010.
- [9]. Omazic, A., Oreski, G., Halwachs, M., Eder, G. C., Hirschl, C., Neumaier, L., ... & Erceg, M. (2019). Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 192, 123-133.
- [10]. Kessler, F., & Rudmann, D. (2004). Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules. *Solar Energy*, 77(6), 685-695.
- [11]. Alaaeddin, M. H., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & Al-Oqla, F. M. (2019). Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 318-332.
- [12]. Fagua, A. L. F., & Suárez, W. F. B. (2015). Celdas Solares Orgánicas. *Ciencia, innovación y tecnología*, 2, 71-81.
- [13]. Coral, W. A. C., & Riveros, S. U. (2013). Celdas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro. *Elementos*, 2(2).

- [14]. Mazhari, B. (2006). An improved solar cell circuit model for organic solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, 90(7-8), 1021-1033.
- [15]. Gurney, R. S., Lidzey, D. G., & Wang, T. (2019). A review of non-fullerene polymer solar cells: from device physics to morphology control. *Reports on Progress in Physics*, 82(3), 036601.
- [16]. Agnaldo, J. S., Bastos, J. B. V., Cressoni, J. C., & Viswanathan, G. M. (2006). Células solares de TiO₂ sensibilizado por corante. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 28(1), 77-84.
- [17]. Azevedo, M., & Cunha, A. (1991). Fazer uma célula fotovoltaica. *Physics on Stage, Aveiro Pt*, v2, (4).
- [18]. Segura, J. L., Pérez, R. G., & León, N. M. (2001). Células solares de plástico: Un reto para los nuevos materiales orgánicos del siglo XXI. In *Anales de la Real Sociedad Española de Química* (No. 1, pp. 5-11). Real Sociedad Española de Química.
- [19]. Martínez, V. C., López, A., & Gómez, M. M. (2016). Celdas solares sensibilizadas por colorante basadas en TiO₂ modificado con CuO. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), 324-338.
- [20]. Reyes Lemus, J. A. (2014). Colorantes orgánicos de origen natural utilizados como sensibilizadores de celdas solares (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).
- [21]. Tang, C., Chen, S. C., Tang, Y., Ma, W., & Zheng, Q. (2018). Cyclopentadithiophene-cored non-fullerene acceptors for efficient polymer solar cells with superior stability. *Solar Energy*, 174, 991-998.
- [22]. Du, X., Heumueller, T., Gruber, W., Classen, A., Unruh, T., Li, N., & Brabec, C. J. (2019). Efficient polymer solar cells based on non-fullerene acceptors with potential device lifetime approaching 10 years. *Joule*, 3(1), 215-226.
- [23]. Li, H., Wang, J., Wang, Y., Bu, F., Shen, W., Liu, J., ... & Tang, J. (2019). The progress of non-fullerene small molecular acceptors for high efficiency polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 190, 83-97.
- [24]. Wang, J., Wang, J., & Zhang, F. (2019). Ternary polymer solar cells achieving 11.78% efficiency with two fluorinated non-fullerene acceptors. *Organic Electronics*, 67, 253-258.



- [25]. Niggemann, M., Zimmermann, B., Haschke, J., Glatthaar, M., & Gombert, A. (2008). Organic solar cell modules for specific applications—from energy autonomous systems to large area photovoltaics. *Thin Solid Films*, 516(20), 7181-7187.
- [26]. Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature photonics*, 8(7), 506.
- [27]. Demic, S., Ozcivan, A. N., Can, M., Ozbek, C., & Karakaya, M. (2017). Recent Progresses in Perovskite Solar Cells. In *Nanostructured Solar Cells*. IntechOpen.
- [28]. Zong, B., Fu, W., Guo, Z. A., Wang, S., Huang, L., Zhang, B., ... & Zhang, Z. (2019). Highly stable hole-conductor-free perovskite solar cells based upon ammonium chloride and a carbon electrode. *Journal of colloid and interface science*, 540, 315-321.
- [29]. Pérez, G. S., Gómez, J. A., & López, E. V. (2018). ENERGÍA RENOVABLE: CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA. *Investigación Joven*, 5(2), 16-19.
- [30]. Li, W., Yan, X., Aberle, A. G., & Venkataraj, S. (2019). Effect of sodium diffusion on the properties of CIGS solar absorbers prepared using elemental Se in a two-step process. *Scientific reports*, 9(1), 2637.
- [31]. Simonot, E. (2016). Las últimas innovaciones en las tecnologías fotovoltaicas, de la reducción de coste a la captación de valor. *Cuadernos de energía*, (48), 51-56.
- [32]. Vera-Dávila, A. G., Delgado-Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 343-356.
- [33]. Noguera-Salas, O., Pinto-García, R. A., & Villarreal-Padilla, J. E. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. *Iteckne*, 15(1), 7-16.
- [34]. Martínez, A. Z., & Santos, M. (2015). *Modelo y Simulación de un Sistema Fotovoltaico Portátil*.

