

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

*CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE
TRABAJO DE UN MÓDULO
FOTOVOLTAICO MEDIANTE MODELOS
CLÁSICOS*

Alumno: Mendizabal, Arrillaga, Xabier

Director: Mazón, Sainz-Maza, Angel Javier

Curso: 2017-2018

Fecha: Julio de 2018

RESUMEN

El propósito de este documento es detallar el cálculo de la temperatura de trabajo real de una célula fotovoltaica de silicio policristalino mediante Modelos Clásicos de Temperatura. Estos modelos tienen coeficientes que se determinan gracias a características tanto ambientales como propias de la célula. Gracias a poder determinar esta temperatura, es posible el cálculo de la potencia máxima real que puede generar la célula. Como este texto demuestra, la potencia real será significativamente menor que la referente a las condiciones nominales.

Palabras clave: célula fotovoltaica, energía renovable, Modelo NOCT, Modelos Clásicos de Temperatura.

LABURPENA

Hurrengo txostenaren helburua, silizio polikristalino zelula fotovoltaikoen temperatura errearen kalkulua da, Temperatura Modelo Klasiko-en bidez. Modelo hauek aurkezten dituzten koefizienteak, gure zelula modelo zehatzarentzat egoki ditzakegu, aldagai meteorologikoen eta zelula beraren arabera. Temperatura hau jakiteari esker, gure zezulak sortuko duen potentzia máximo erreala jakin dezakegu. Ondoren ikusiko den bezala, potentzia hau, kondizio nominaletan sortutakoa baino nabarmentsuki baxuagoa izango da.

Hitz gakoak: zelula fotovoltaikoa, energía berriztagarriak, NOCT Modeloa, Temperatura Modelo Klasikoak.

ABSTRACT

The next document aims for the detailed calculation of the real working temperature of a polycrystalline silicon photovoltaic cell, using Classic Temperature Models. The coefficients that form part of these models are adjustable and characterizable for our specific polycrystalline cell, using data from external meteorological variables as well as the cell's physical properties. The benefit of knowing this temperature is that we will be capable of calculating the real maximum power we will produce at different conditions of irradiation. This project presents how significantly lower this power is compared to the one obtained in *Nominal Conditions*.

Key words: photovoltaic cell, renewable energy, NOCT Model, Classic Temperature Models.

ÍNDICE

1. MEMORIA.....	1
1.1 Tecnología fotovoltaica.....	1
1.2 Mercado Global.....	3
1.3 Objetivo y alcances del trabajo.....	6
1.4 Beneficios que aporta el trabajo.....	7
1.5 Análisis del estado del arte.....	8
1.6 Descripción de la solución propuesta.....	19
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	22
2.1 Descripción del equipo.....	22
2.2 Descripción de fases y tareas.....	25
2.3 Determinación de los parámetros de los Modelos Clásicos.....	30
2.4 Obtención y comparativa de resultados.....	34
2.5 Planificación del proyecto. Diagrama de Gantt.....	43
3. CONCLUSIONES.....	46
4. BIBLIOGRAFÍA.....	47
5. ANEXO I: Código programado para la determinación de los parámetros de los Modelos Clásicos.....	49
ANEXO II: Ficha técnica de módulo policristalino Pramac Luce MC.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Células fotovoltaicas de Silicio monocristalino</i>	2
Figura 2. <i>Estructuras con seguimiento de un eje (izq.) y dos ejes (dcha.)</i>	2
Figura 3. <i>Evolución de la potencia total instalada en el mundo</i>	4
Figura 4. <i>Evolución del coste de cada tecnología por Watt</i>	5
Figura 5. <i>Evolución de la eficiencia de las células fotovoltaicas por tecnología</i>	5
Figura 6. <i>Modelo energético de bandas</i>	8
Figura 7. <i>Representación esquemática de la unión PN con diferencia de potencial aplicada</i>	10
Figura 8. <i>Esquema de funcionamiento de célula fotovoltaica</i>	11
Figura 9. <i>Circuito eléctrico equivalente de una célula fotovoltaica</i>	11
Figura 10. <i>Curvas I-V y P-V características del funcionamiento de una célula fotovoltaica</i>	12
Figura 11. <i>Curva I-V en función de T_c</i>	14
Figura 12. <i>Distancia entre el sol y la tierra durante el año, medida en unidades Astronómicas (AU)</i>	15
Figura 13. <i>Ejemplo de irradiancia recibida por un módulo fotovoltaico en un plano inclinado</i>	17
Figura 14. <i>Diagrama de flujo de trabajo para la solución propuesta</i>	21
Figura 15. <i>Curvas I-V en función de la temperatura de célula²³</i>	23
Figura 16. <i>Evolución de irradiancia global de los días 16, 17 y 18 de junio de 2016</i>	26
Figura 17. <i>Resultado de la regresión lineal mediante el modelo de Ross</i>	31
Figura 18. <i>Resultado de la regresión no lineal mediante el modelo de King</i>	32
Figura 19. <i>Resultado de la regresión no lineal mediante el modelo de Servant</i>	33
Figura 20. <i>Resultado de la regresión lineal mediante el modelo de Risser</i>	33
Figura 21. <i>Gráfica de irradiancia del día 21 de Junio de 2016</i>	35
Figura 22. <i>Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de Ross y la real</i>	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 23. <i>Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de King y la real</i>	37
Figura 24. <i>Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de Servant y la real</i>	37
Figura 25. <i>Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de Risser y la real</i>	38
Figura 26. <i>Gráficas de la evolución de la RMSE (°C) para cada modelo</i>	39
Figura 27. <i>Diagrama de Gantt del proyecto</i>	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Top 10 de países por potencia total instalada y potencia instalada en 2017.....	3
Tabla 2. <i>Comportamiento del módulo fotovoltaico a las condiciones de operación estándar</i>	22
Tabla 3. <i>Parámetros de temperatura del módulo fotovoltaico</i>	23
Tabla 4. <i>Datos de temperatura ambiente de los días 16, 17 y 18 de junio de 201</i>	27
Tabla 5. <i>Datos de velocidad del viento de los días 16, 17 y 18 de Junio de 2016</i>	27
Tabla 6. <i>Datos de la temperatura de célula de los días 16, 17 y 18 de Junio de 2016</i> ..	28
Tabla 7. <i>Valores de coeficientes y error de los modelos utilizados</i>	34

NOMENCLATURA

FV	Fotovoltaico/a
IEA	Agencia Internacional de la Energía (del inglés, <i>International Energy Agency</i>)
NOCT	Temperatura de Operación Nominal de Célula (del inglés, <i>Nominal Operating Cell Temperature</i>).
AM	Masa de aire (del inglés, <i>air mass</i>)
AU	Unidades astronómicas (del inglés, <i>astronomic units</i>)
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
STC	Condiciones estándares de medida (del inglés, <i>Standard Test Conditions</i>)

1. MEMORIA

1.1 Tecnología fotovoltaica

La tecnología fotovoltaica (del griego “phos”, luz, y en honor a Alessandro Volta, quien desarrolló la primera pila eléctrica en 1800) [1] es la tecnología que permite la conversión directa de la energía proveniente del sol (fotones), en electricidad de corriente continua (CC). Esta conversión se realiza en las llamadas células fotovoltaicas, formadas por un material especialmente diseñado (generalmente silicio monocristalino o policristalino) para que cuando sea irradiado, se produzca en él el efecto fotovoltaico necesario para el flujo de corriente eléctrica. Estas células se montan unas junto a otras para poder producir una mayor potencia, formando los conocidos módulos fotovoltaicos. Estos módulos son encapsulados frontalmente por una capa transparente, generalmente de vidrio, y posteriormente mediante un polímero [2].

Los elementos que conforman un sistema de energía fotovoltaica son los módulos fotovoltaicos, la estructura sobre la que se montan (encargada de optimizar la radiación que reciben), el inversor (en caso de que esté conectado a la red) o la batería y el regulador de carga (en caso de que funcione de manera aislada). Además del cableado y los sistemas de protección tales como fusibles, tomas a tierra e interruptores [3]. Los módulos comerciales tienen una potencia nominal que suele variar entre 50 y 300 W.

Si el sistema está conectado a la red, además del inversor DC/AC (el cual es capaz de mantener la generación en el punto de máxima potencia posible), es necesaria una subestación que controle y modifique la corriente generada para que satisfaga los requisitos de la red en aras de un suministro eléctrico seguro, robusto y de calidad para el consumidor. En caso de que se utilice de manera aislada para autoconsumo, el regulador de carga mantiene las baterías en su máximo punto de carga y las protege de descargas profundas y sobrecargas, aumentando su vida útil [4].

En la actualidad, la tecnología fotovoltaica presenta eficiencias variables que dependen, en mayor parte, del material de la célula y del sistema estructural de seguimiento en el que se sustenta el módulo. En cuanto al material, el silicio monocristalino es el de uso más extendido, alcanzando un 16-20% de eficiencia frente a su colega policristalino que alcanza un 14% de eficiencia. Otros materiales utilizados son el silicio amorfo (eficiencias del 10%) y nuevos materiales en desarrollo como el Teluro de Cadmio (CdTe) o el Diseleniuro de indio-cobre (CIS) [5]. La célula que va a utilizarse como modelo en este proyecto está formada por Silicio policristalino, un material de bajo coste y también muy extendido.

MEMORIA



Figura 1. Células fotovoltaicas de Silicio monocristalino

En cuanto a la estructura que sustenta al módulo, existen estructuras fijas, de seguimiento en un eje, en ambos ejes y con tecnología *backtracking*. El seguimiento permite aumentar la eficiencia del panel, provocando que en él incida una mayor radiación solar. A su vez, el *backtracking* posiciona los paneles de un parque fotovoltaico de tal forma que no se hagan sombra entre ellos, permitiendo un mayor aprovechamiento del espacio sin comprometer la generación de energía eléctrica. Estos sistemas, dependiendo de cada caso y localización en el globo, pueden llevar a un incremento de eficiencia de hasta un 45% para los sistemas de dos ejes [6].

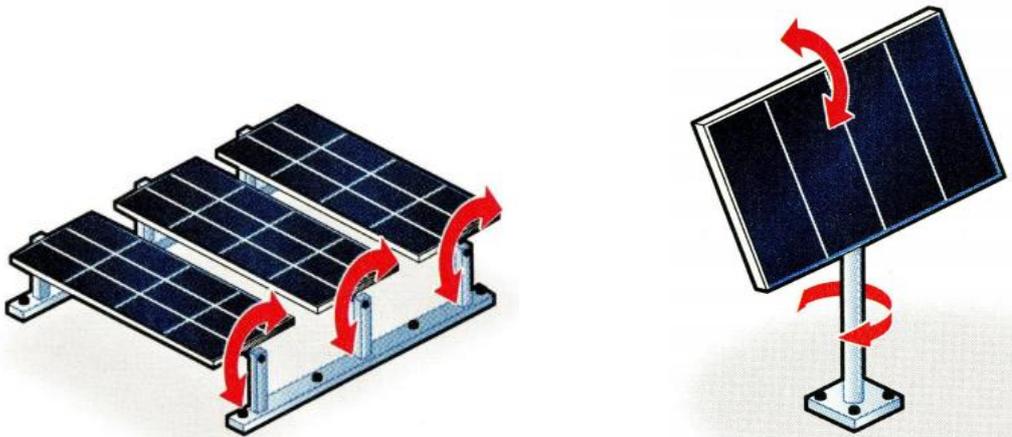


Figura 2. Estructuras con seguimiento de un eje (izq.) y dos ejes (dcha.)

MEMORIA

1.2 Mercado global

La energía fotovoltaica se ha introducido en los últimos años de manera importante en el mercado eléctrico, y lo ha hecho para quedarse. Además, es una tecnología que goza de una gran aceptación en la ciudadanía por su innegable y verdadero origen renovable.

Desde principios de 2007, momento en el que se comenzó a dar un incremento notable en la potencia instalada y tendencia al cambio en las políticas energéticas de los países desarrollados, la instalación de módulos fotovoltaicos ha seguido creciendo, aunque irregularmente debido a trabas económicas y burocráticas, hasta alcanzar un total de 402 gigavatios acumulados a final de 2017 gracias a los 98 gigavatios instalados durante el año, según la Agencia Internacional de la Energía [7]. De estos 98 gigavatios, el 54% han sido instalados en China, confirmando al gigante asiático como líder global del mercado fotovoltaico con una capacidad total de 131 GW. Le siguen a cierta distancia EE.UU (con 51 GW), Japón con 49 GW y Alemania con 42 GW. Además, se observa la clara apuesta de India por la energía fotovoltaica con 9,1 GW instalados en 2017, lo que supone el 50% de la potencia total instalada que alberga el país en estos momentos.

TABLE 1: TOP 10 COUNTRIES FOR INSTALLATIONS AND TOTAL INSTALLED CAPACITY IN 2017

TOP 10 COUNTRIES IN 2017				TOP 10 COUNTRIES IN 2017			
1		China	53 GW	1		China	131 GW
2		USA	10,6 GW	2		USA	51 GW
3		India	9,1 GW	3		Japan	49 GW
4		Japan	7 GW	4		Germany	42 GW
5		Turkey	2,6 GW	5		Italy	19,7 GW
6		Germany	1,8 GW	6		India	18,3 GW
7		Australia	1,25 GW	7		UK	12,7 GW
8		Korea	1,2 GW	8		France	8 GW
9		UK	0,9 GW	9		Australia	7,2 GW
10		Brazil	0,9 GW	10		Spain	5,6 GW

Tabla 1. Top 10 de países por potencia total instalada y potencia instalada en 2017

MEMORIA

Varios países, en especial asiáticos, han declarado su intención de continuar con el ritmo de gigavatios instalados, con lo que se prevé una mayor escalada de esta tecnología ya que, pese a esta potencia instalada, los países solo pueden abastecerse de electricidad de origen fotovoltaico en un porcentaje muy reducido, con Honduras a la cabeza con un 13,26%. Para el caso de España, la fotovoltaica solo pudo cubrir el 3% de la demanda en 2016 [8].

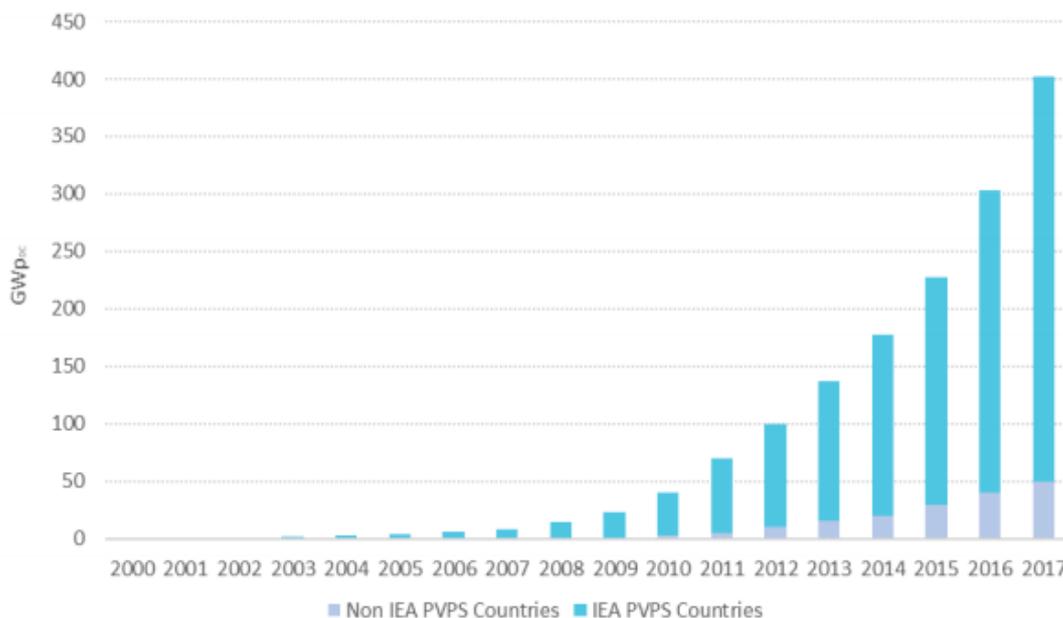


Figura 3. Evolución de la potencia total instalada en el mundo

A este auge del uso de la tecnología, se le ha de añadir la mejora tecnológica que la ha acompañado, así como la reducción del coste del kWh fotovoltaico, el cual ya puede prácticamente competir con otras tecnologías de generación convencionales sin necesidad de ayudas. La energía solar fotovoltaica ha dejado de ser el integrante débil del equipo y va a continuar cobrando presencia. A continuación se muestran dos figuras que representan la mejora de eficiencia y la reducción del coste wattio/USD. Es importante señalar que las eficiencias mostradas son obtenidas en laboratorio bajo condiciones óptimas de irradiancia, temperatura y ventilación [9].

MEMORIA

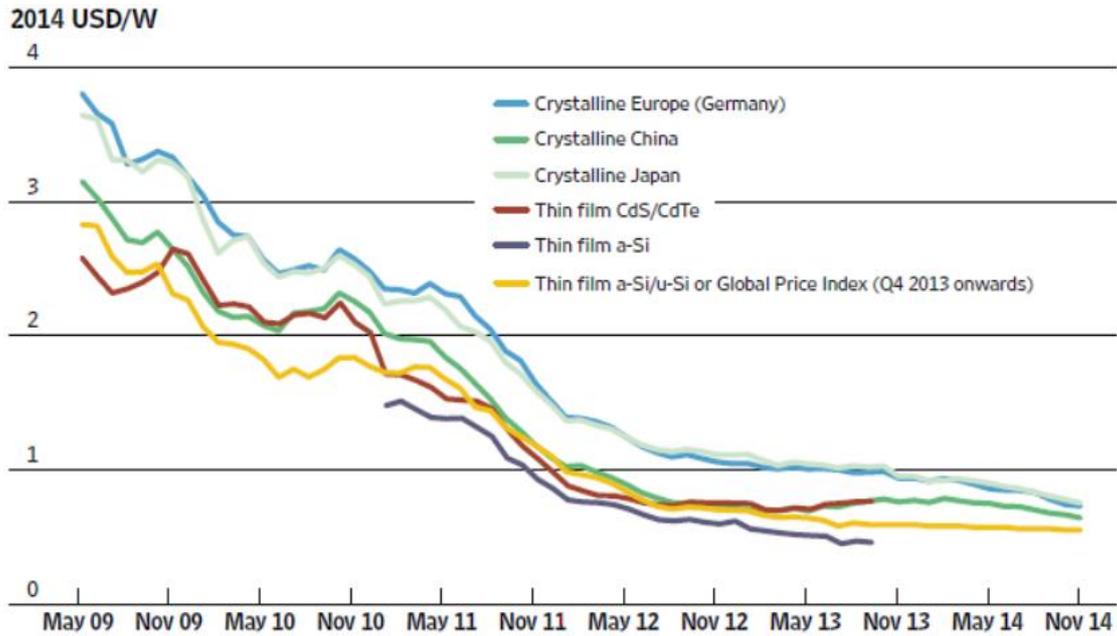


Figura 4. Evolución del coste de cada tecnología por Watt

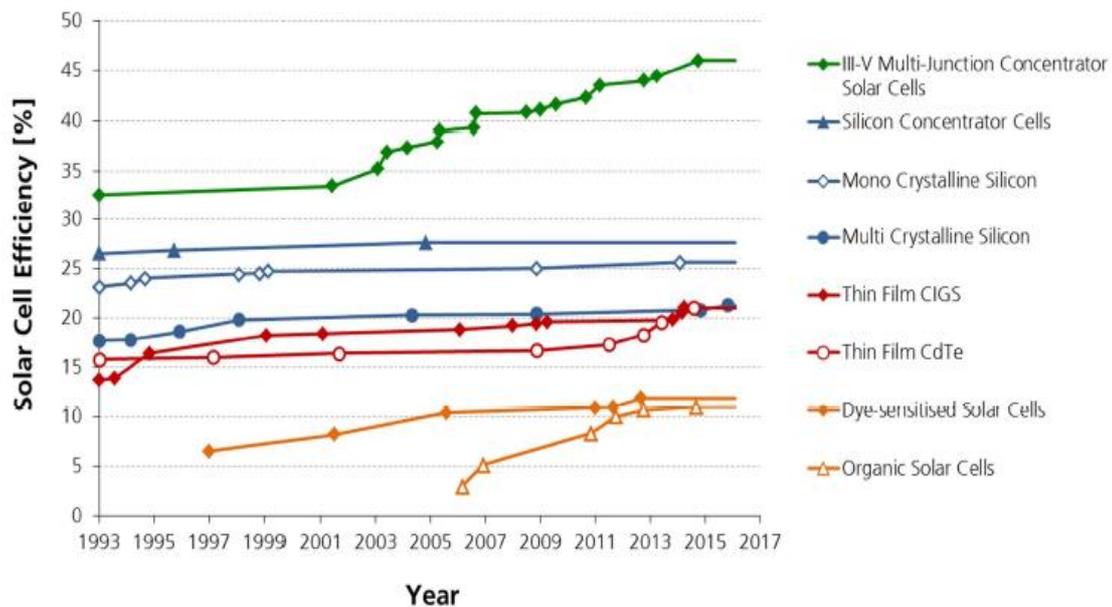


Figura 5. Evolución de la eficiencia de las células fotovoltaicas por tecnología

MEMORIA

De esta manera, la energía solar fotovoltaica se encuentra ante un horizonte esperanzador, con países cada vez más involucrados en la consecución de la descarbonización del sector eléctrico.

1.3 Objetivos y alcance del trabajo

El factor que determinará, en mayor medida, la eficiencia con la que nuestra placa fotovoltaica genera electricidad, será su temperatura de trabajo. O en otras palabras, la temperatura de las células que la componen. Un módulo fotovoltaico está compuesto por varias de estas células, conectadas en serie y paralelo, para generar una mayor potencia conjuntamente, luego dependerá en realidad de la temperatura de cada una de las células en el módulo. Los fabricantes nos proporcionan la potencia que se genera bajo unas condiciones estandarizadas: 1000 W/m² de irradiancia en una distribución espectral de 1.5 AM y una temperatura de célula nominal de 25 °C. Sin embargo, la realidad es que si la célula está bajo estas condiciones de irradiancia, la temperatura de célula se disparará muy por encima de la de los 25 °C [10], rondando los 45-49 °C. Este aumento de temperatura provoca una disminución en la potencia que generamos mediante nuestro módulo fotovoltaico.

Por el interés innegable que presenta, por tanto, conocer, estudiar y controlar en la medida de lo posible esta temperatura, se comenzaron a desarrollar modelos matemáticos sencillos que ayudaran a calcularla de manera aproximada. El primero de estos modelos fue publicado en 1986 por el proyecto FSA (*Flat-plate Solar Array*, en inglés), una iniciativa americana que basándose en pruebas realizadas bajo distintas condiciones térmicas, logró definir lo que hoy en día se conoce como el Modelo NOCT (del inglés, *Nominal Operating Cell Temperature*)[11]. Una ecuación lineal basada en la temperatura de operación nominal de célula y condiciones externas de temperatura ambiente e irradiancia que predecía adecuadamente dicha temperatura ante condiciones diferentes a las nominales. A partir de este modelo surgieron más, los cuales introdujeron parámetros dependientes del módulo fotovoltaico y también la influencia de la velocidad del viento. La introducción de la influencia de la velocidad del viento en los modelos mejoró su precisión, debido a que se comenzó a tomar en cuenta la pérdida de calor y consecuente disminución de la temperatura de célula que conlleva el fenómeno de convección provocado por el viento [12].

El objetivo de este texto es hacer valer estos modelos clásicos de temperatura para calcular la temperatura de trabajo de una célula fotovoltaica concreta. Para ello los modelos necesitan ser ajustados como se verá a continuación, ya que dependen de

MEMORIA

parámetros específicos del espécimen físico (la célula fotovoltaica en este caso). Este proyecto pretende además calcular el error con el que dichos modelos consiguen predecir la temperatura de célula, para determinar cuál es el que mejor se ajusta. El objetivo final, será calcular cuál es la potencia máxima real que podremos generar una vez conocida la temperatura de célula real. Se extrapolará el resultado también a otras condiciones de irradiancia. De esta manera, el presente texto pretende dotar al lector de un conocimiento más profundo sobre esta tecnología y otorgarle un mayor criterio a cerca de la potencia que son capaces de generar los módulos fotovoltaicos.

1.4 Beneficios que aporta el trabajo

El conocimiento de trabajo real de nuestra célula fotovoltaica permitirá conocer en todo momento la potencia máxima que podemos generar. Esto significa que por un lado, podremos saber cuándo es la temperatura de célula demasiado alta, ya que puede que rebajar el nivel de radiación solar que incide en ella (poniendo el módulo bajo o tras una sombra parcial) sea incluso beneficioso para la generación de una mayor potencia activa. Por otro lado, permite también un mejor cálculo y dimensionamiento (en cuanto a número de módulos necesarios) de una instalación fotovoltaica.

1.5 Análisis del estado del arte

En 1839 Becquerel observó que ciertos materiales, cuando se exponen a la luz, producen una corriente eléctrica. Esto ahora se conoce como el efecto fotovoltaico, y es la base de la operación de células fotovoltaicas.

Las células solares se fabrican a partir de materiales semiconductores; es decir, materiales que actúan como aislantes a bajas temperaturas, pero como conductores cuando hay energía o calor disponible.

En la actualidad, la mayoría de las células solares están basadas en silicio, por ser la tecnología más madura y desarrollada. Además, otros materiales como el Teluro de Cadmio (CdTe) o el Diseleniuro de indio-cobre (CIS) están bajo investigación activa y pueden reemplazar el silicio a largo plazo [3].

1.5.1 Modelos para describir el fenómeno fotovoltaico

Las propiedades eléctricas de los semiconductores se pueden explicar utilizando dos modelos, el modelo de enlaces y el modelo de bandas.

MEMORIA

- El Modelo de Enlace

El modelo de enlace utiliza los enlaces covalentes que unen los átomos de silicio para describir el comportamiento de los semiconductores.

A bajas temperaturas, los enlaces están intactos y el silicio se comporta como un aislante. A altas temperaturas, algunos enlaces se rompen y la conducción puede ocurrir por dos procesos:

1. Los electrones de enlaces rotos son libres de moverse.
2. Los electrones de los enlaces vecinos también pueden moverse hacia el 'hueco' creado en el enlace roto, permitiendo que el enlace roto o el hueco se propague como si tuviera una carga positiva.

El concepto de un hueco en movimiento es análogo al de una burbuja en un líquido. A pesar de esto es en realidad el líquido el que se mueve.

- El modelo de banda

El modelo de banda describe el comportamiento de los semiconductores en términos de niveles de energía entre valencia y bandas de conducción. Esto se ilustra en la siguiente figura.

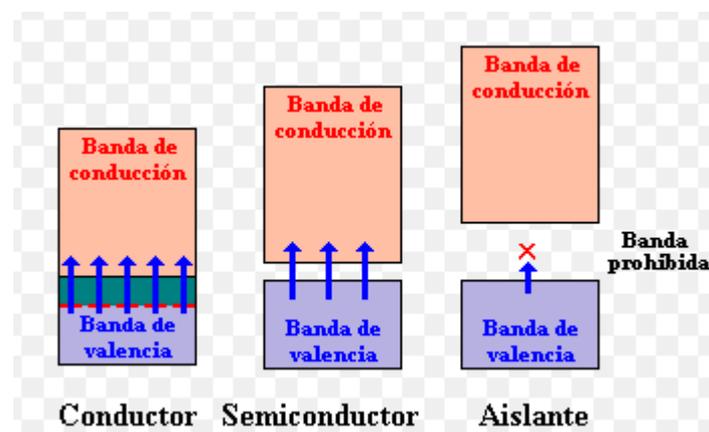


Figura 6. Modelo energético de bandas

Los electrones en enlaces covalentes tienen energías correspondientes a los de la banda de valencia. En la banda de conducción, los electrones son libres de ser transportados. La banda prohibida corresponde a la energía mínima necesaria para liberar un electrón de un enlace covalente a la banda conductora donde puede conducir una corriente. Los huecos restantes se conducen en la dirección opuesta en la banda de valencia, como se describe para el modelo de enlaces [3]. Los

MEMORIA

electrones adquieren la energía necesaria para saltar de la banda de valencia a la de conducción, cuando son excitados por la radiación solar.

1.5.2 Tipos de semiconductores

El silicio y otros materiales semiconductores utilizados para las células solares pueden ser cristalinos, policristalinos, multicristalinos, microcristalinos o amorfos. Aunque los usos de estos términos varían, seguimos las definiciones establecidas por tamaño de grano por Basore en 1994 [13].

- $< 1 \mu\text{m}$: *Microcristalino*

- $< 1 \text{ mm}$: *Policristalino*

- $< 10 \text{ cm}$: *Multicristalino*

- *Sin disposición regular de los átomos: Amorfos*

La célula fotovoltaica escogida para este proyecto está fabricada de Silicio policristalino. Por lo tanto, se detallará a continuación la estructura de este tipo de Silicio, que se puede englobar dentro del Multicristalino para hacer un análisis más amplio.

Las técnicas para la producción del silicio multicristalino (y policristalino) son menos críticas y por tanto, más baratas, que las utilizadas para producir Silicio monocristalino. El inconveniente que presentan es que los límites o fronteras que dividen los diferentes cristales provocan una reducción de la eficiencia de la célula porque provocan una recombinación excesiva entre los huecos y las cargas liberadas dentro de los cristales. Para evitar unas pérdidas excesivas, el tamaño de grano debe ser del orden de milímetros.

1.5.3 Fundamentos de la tecnología fotovoltaica. La unión PN

A continuación se explica la unión entre cristales semiconductores especialmente diseñados o dopados que se utiliza, la unión PN. El cristal tipo n es el que presenta una mayor concentración de electrones que de huecos. Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo n, reciben el nombre de portadores mayoritarios, mientras que a los huecos se les denomina "portadores minoritarios". El cristal del tipo p presenta una mayor concentración de huecos que de electrones. En este caso, se denominara portadores mayoritarios a los huecos y minoritarios a los electrones [13].

Al unir un semiconductor de tipo p con otro de tipo n, se produce un desequilibrio. Debido al desequilibrio se produce un movimiento de huecos desde el cristal de tipo p, al tipo n, dejando iones con carga negativa. A su vez, se produce un movimiento

MEMORIA

de electrones a la inversa, dejando iones con carga positiva en el cristal de tipo n. En el espacio cercano a la unión, se produce un campo eléctrico. Para conseguir corriente es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir la barrera de potencial.

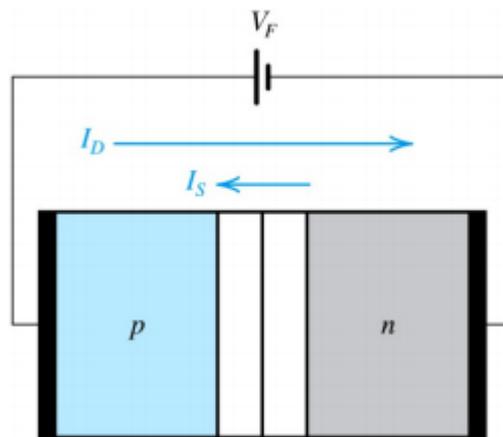


Figura 7. Representación esquemática de la unión PN con diferencia de potencial aplicada

Cuando la unión es iluminada, los electrones (portadores de carga) se desplazan a la banda de conducción por el aporte energético de fotones. De esta manera, el campo eléctrico conduce los portadores de carga y dificulta la recombinación. La corriente fotogenerada es ahora aprovechable por un circuito externo. Para que esto ocurra, los fotones incidentes deben tener una energía mínima, con una longitud de onda inferior a los 1100 nm (infrarojo). Los fotones más energéticos son los de baja longitud de onda, y son absorbidos en la superficie. Los fotones menos energéticos (alta longitud de onda), penetran en el interior hasta romper un enlace (ultravioleta, <400nm). A continuación se muestra esquematizado el funcionamiento de la célula fotovoltaica. En ella se observan tanto la corriente de difusión (movimiento de huecos desde cristal p a cristal n, dejando iones con carga negativa) como la de arraste (provocada por los portadores de carga negativa que se recombinan en la zona cercana a la unión). Una vez alcanzado el equilibrio, este se debe romper mediante la aplicación de una diferencia de potencial. Por convenio, la corriente entra por zona p y sale por zona n [14].

MEMORIA

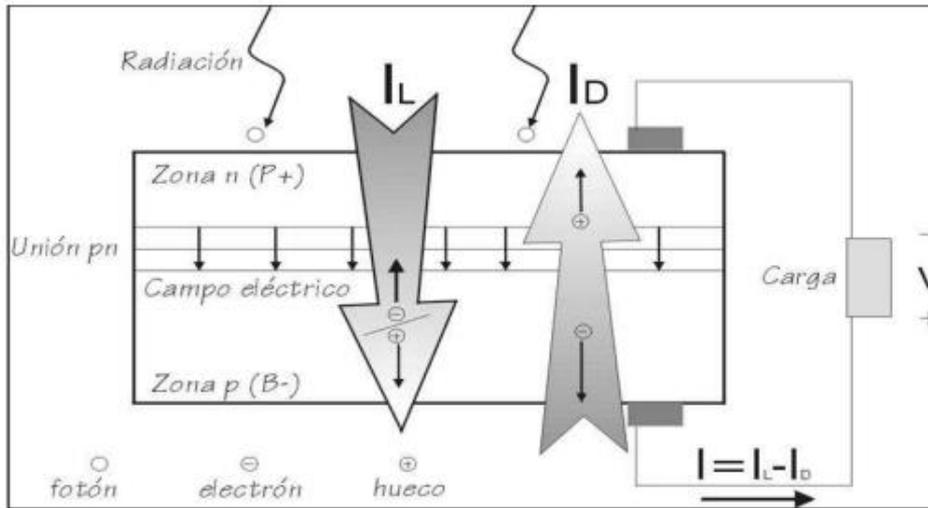


Figura 8. Esquema de funcionamiento de célula fotovoltaica

- Caracterización matemática del módulo fotovoltaico

Generalmente, el circuito eléctrico equivalente de una celda solar, consta de una fuente de corriente foto generada por acción de la radiación solar, un diodo, una resistencia en paralelo y una resistencia en serie (que representan la resistencia interna del material al flujo de la corriente), tal y como se representa a continuación:

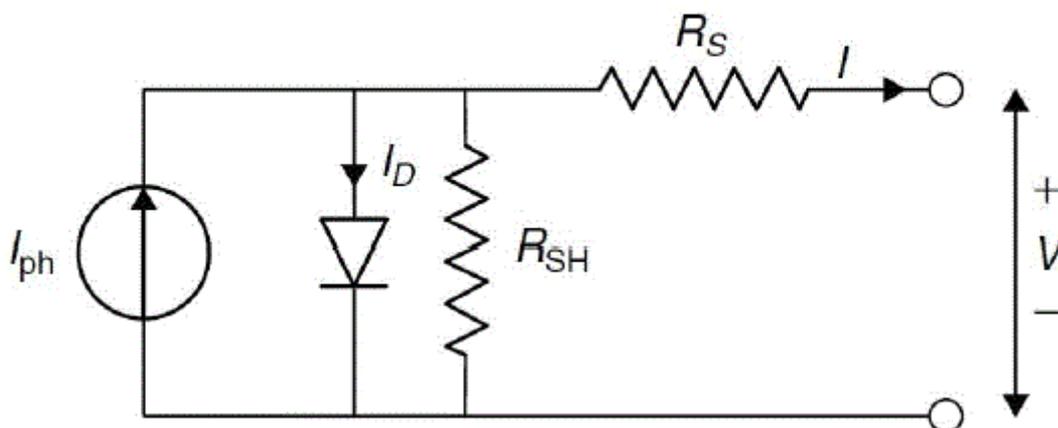


Figura 9. Circuito eléctrico equivalente de una célula fotovoltaica.

MEMORIA

El modelo matemático de la célula se obtiene a partir de su representación eléctrica, y se encuentra en función principalmente de la radiación solar y de la temperatura de trabajo. Las características típicas de una célula suelen representarse por medio de gráficas: voltaje-intensidad y voltaje-potencia. En la siguiente figura se pueden observar los puntos más representativos de las curvas, tales como: la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}) y la potencia en el punto de máxima potencia (P_{MPP}).

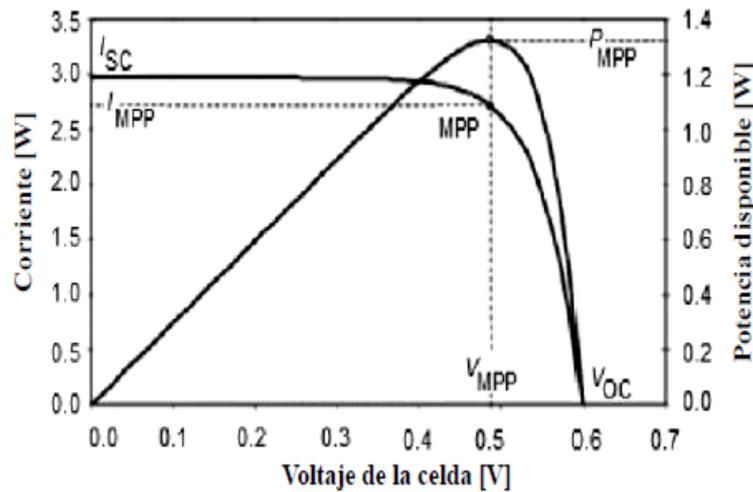


Figura 10. Curvas I-V y P-V características del funcionamiento de una célula fotovoltaica.

El modelo matemático que describe la curva voltaje-corriente en una célula fotovoltaica, generalmente se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (1)$$

donde, I_L es la corriente foto generada, I_0 es la corriente de saturación inversa, R_S es la resistencia en serie, R_{SH} es la resistencia en paralelo, V es el voltaje, q es la carga de un electrón ($1.6 \times 10^{-19}C$), y a es un parámetro dado por la ecuación: $a = kT_eA$.

MEMORIA

siendo k la constante de Boltzman (1.38×10^{-23} J/K), T_c es la temperatura de la célula y A es el factor de idealidad. El factor de idealidad permite distinguir el comportamiento entre una fabricada de silicio y una de germanio, dependiendo así de la tecnología de fabricación.

La corriente foto generada varía en función de la radiación solar y de la temperatura de trabajo [7], y se describe por:

$$I_L = \frac{S}{S_{REF}} \left[I_{L,REF} + \mu_{ISC} (T_C - T_{C,REF}) \right] \quad (2)$$

donde, S es la irradiancia, S_{ref} es la irradiancia de referencia (1000 W/m²), $I_{L,REF}$ es la corriente foto generada de referencia y se puede tomar como la corriente de cortocircuito ($I_{L,REF} = I_{SC}$), y μ_{ISC} es el coeficiente de cortocircuito, el cual generalmente está dado por el fabricante.

La corriente de saturación inversa está dada por la expresión siguiente:

$$I_O = I_{O,REF} (T_C / T_{REF})^3 \exp \left[qE_G (1/T_{REF} - 1/T_C) / kA \right] \quad (3)$$

donde, E_G es la energía del semiconductor en su banda de gap y $I_{O,REF}$ es la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia.

Generalmente, la eficiencia de una célula no se afecta con la variación en la resistencia en paralelo (debida a impurezas en el Silicio), por lo que se puede asumir que R_{SH} es nulo. Por otro lado, una pequeña variación en la resistencia serie afecta significativamente el comportamiento y eficiencia. Ya que la resistencia en paralelo no representa un porcentaje significativo de pérdidas, se simplifica el modelo matemático planteado en (1). Así la ecuación se simplifica en [15]:

$$I = I_L - I_O \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{a} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Para extrapolar esta ecuación a un módulo fotovoltaico formado por células conectadas en serie y en paralelo, debe introducirse su número (N_s y N_p respectivamente) en la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$I = N_p I_L - N_p I_O \left[\exp \left(\frac{q(V / N_s + IR_S / N_p)}{a} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

MEMORIA

1.5.4 Influencia de la temperatura de célula

La temperatura a la que opera la célula está determinada por la temperatura ambiente, por las características del módulo en el que está encapsulado, por la intensidad de la irradiación solar que recibe y por otras variables como la velocidad del viento o la humedad relativa. El modelo de NOCT que se ha mencionado en la sección 1.3 (Objetivos y alcance del trabajo) se corresponde con la siguiente ecuación lineal, donde la temperatura ambiente influye únicamente de manera aditiva y la irradiación está determinada por la diferencia de temperatura entre la NOCT (proporcionada por el fabricante y medida en condiciones nominales de operación) y la temperatura ambiente nominal, dividida entre la irradiación en las mismas condiciones. S es la irradiación incidente en nuestras condiciones. De esta forma, si las condiciones a las que estamos evaluando la célula coinciden con las nominales (800 W/m^2 y $20 \text{ }^\circ\text{C}$), la fracción se anulará y la temperatura de célula será igual a la NOCT.

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{800} \times S \quad (6)$$

La siguiente figura muestra la disminución tanto del voltaje en circuito abierto como de la intensidad de cortocircuito a medida que aumenta la temperatura de célula en múltiplos de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [16].

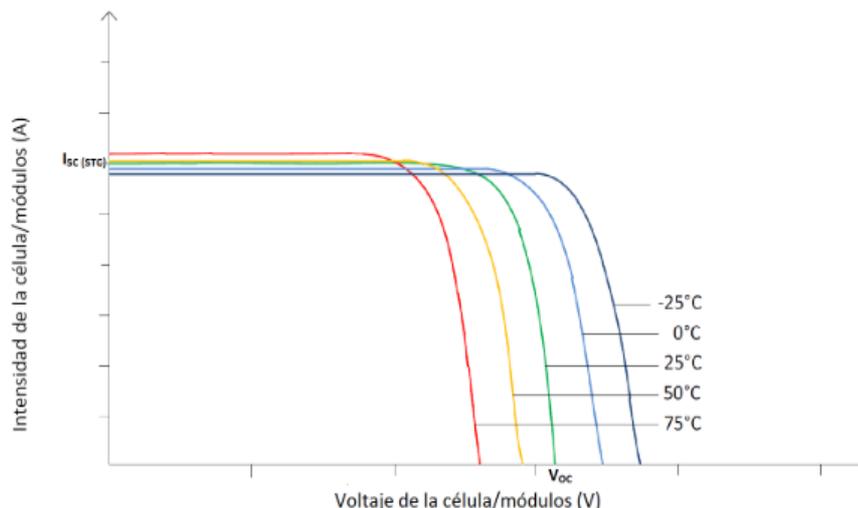


Figura 11. Curva I-V en función de T_c .

MEMORIA

1.5.5 La radiación solar

El sol produce una cantidad de energía constante, denominada constante solar, de 1367 W/m^2 que, en el momento de incidir sobre la superficie terrestre pierde parte de su potencia debido a la influencia de los fenómenos atmosféricos, la actividad humana, la forma propia de la Tierra, el ciclo día/noche y la órbita elíptica de la Tierra.

A la vista está, la distancia entre el sol y la tierra oscila entre los 1.017 AU el 4 de Julio (Afelio) y unos 0,983 AU el 3 de Enero (Perifelio). Las unidades AU son “Unidades Astronómicas” y es la distancia promedio entre el Sol y la Tierra (150 millones de Kilómetros).

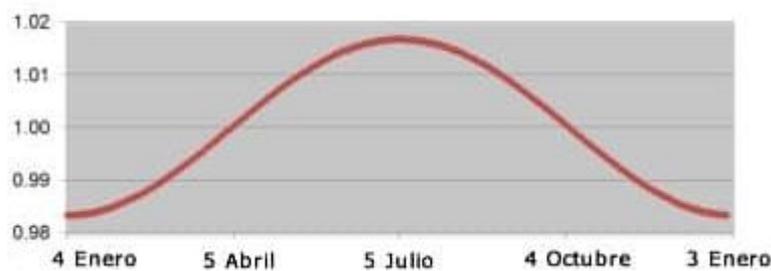


Figura 12. *Distancia entre el sol y la tierra durante el año, medida en unidades Unidades Astronómicas, AU*

La atmósfera atenúa la radiación solar debido a los fenómenos de reflexión, absorción y difusión que los componentes atmosféricos (moléculas de aire, ozono, vapor de agua, CO₂, aerosoles, etc.) producen sobre ésta.

La difusión que se produce debida a la presencia de polvo y a la contaminación del aire depende, en gran medida, del lugar donde se mida, siendo mayor en los lugares industriales y en los lugares más poblados. Los efectos meteorológicos locales tales como nubosidad, lluvia o nieve afectan también a la irradiancia solar que llega a un determinado lugar.

Además de la radiación directa, difusa y de reflexiva, hay que tener en cuenta que cuando los rayos solares no inciden perpendicularmente sobre las células fotovoltaicas, se producen pérdidas por reflexión y absorción en las capas anteriores a la célula, como el vidrio encapsulante y capa antirreflexiva. También es necesario tener en cuenta las pérdidas por suciedad y los efectos espectrales, ya que las células solares responden selectivamente a los fotones de la luz incidente, es decir, que para cada longitud de onda de la radiación solar incidente, generan una corriente determinada.

MEMORIA

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, la irradiancia que incide en un plano horizontal sobre la superficie terrestre un día claro al mediodía alcanza un valor máximo. Para el cálculo de la producción energética de una instalación fotovoltaica es fundamental conocer la irradiación solar en el plano correspondiente a la instalación y la trayectoria solar en el lugar en las diferentes épocas del año. La situación del sol en un lugar cualquiera viene determinada por la altura y el azimut del sol.

Para calcular las distintas componentes de la radiación sobre una superficie terrestre, será necesario conocer la irradiación incidente sobre una superficie situada fuera de la atmósfera como referencia, denominada radiación extraterrestre, de 1000 W/m^2 aproximadamente. Este valor depende del lugar y, sobre todo, de la nubosidad, como decimos.

Se define la orientación mediante el azimut (para el sol, ψ , y para el captador, γ). El azimut solar es el ángulo que forma la dirección sur con la proyección horizontal del sol, hacia el norte por el noreste o por el noroeste, considerando la orientación sur con $\psi = 0^\circ$, y considerando los ángulos entre el sur y el noreste negativos y entre el sur y el noroeste positivos.

Por ejemplo, la orientación Este se considera $\psi = -90^\circ$, mientras que para la orientación Oeste, $\psi = 90^\circ$. La inclinación viene definida por el ángulo β (para el módulo) y por la altura solar a o su complementario θ_z , (ángulo cenital) para el sol

Cuanto más perpendicular se encuentra el sol con respecto a la superficie terrestre (es decir, cuanto menor valor del ángulo cenital) menor es el camino que recorre la radiación solar a través de la atmósfera. Por el contrario para ángulos cenitales mayores (menor altura solar) el camino a recorrer por la radiación solar en la atmósfera es mayor, lo que implica que la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre es menor.

Para ello se define la masa de aire, (AM) como el cociente entre el recorrido óptico de un rayo solar y el correspondiente a la normal a la superficie terrestre (ángulo cenital cero) y que está relacionada con la altura solar (α). Para una altura solar de $\alpha = 90^\circ$, su valor es la unidad, valor mínimo de AM y que se corresponde con la situación del sol en el zenit (vertical del observador).

El valor de $AM = 1$ (sol en el cenit) no se da ningún día del año, excepto en latitudes que se encuentran en el ecuador. La radiación solar en el espacio exterior, es decir sin atravesar la atmósfera terrestre, supone $AM = 0$.

MEMORIA

Resumiendo, a diferencia de la orientación e inclinación del panel solar, que las podemos adaptar para conseguir que la irradiancia recibida por el panel sea máxima, el efecto de la absorción atmosférica es algo que no podemos controlar, por lo que la cantidad de energía solar que se recibe realmente en la superficie terrestre es siempre inferior a la que se recibiría justo por encima de la atmósfera.

Ni que decir tiene que dependiendo de la latitud donde nos encontremos la altura solar será diferente para cada día del año

La radiación solar en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar es siempre mayor que si la misma superficie la colocamos en cualquier otra posición. Al variar el azimut y la altura solar a lo largo del día y del año, lógicamente el ángulo de incidencia de radiación óptimo no es siempre constante. La única situación donde eso ocurriría sería con un sistema que varíe la inclinación y orientación constantemente, como lo hace un seguidor solar.

Para considerar si una determinada superficie ya existente es apta para su uso solar, es necesario conocer la radiación solar incidente sobre dicha superficie.

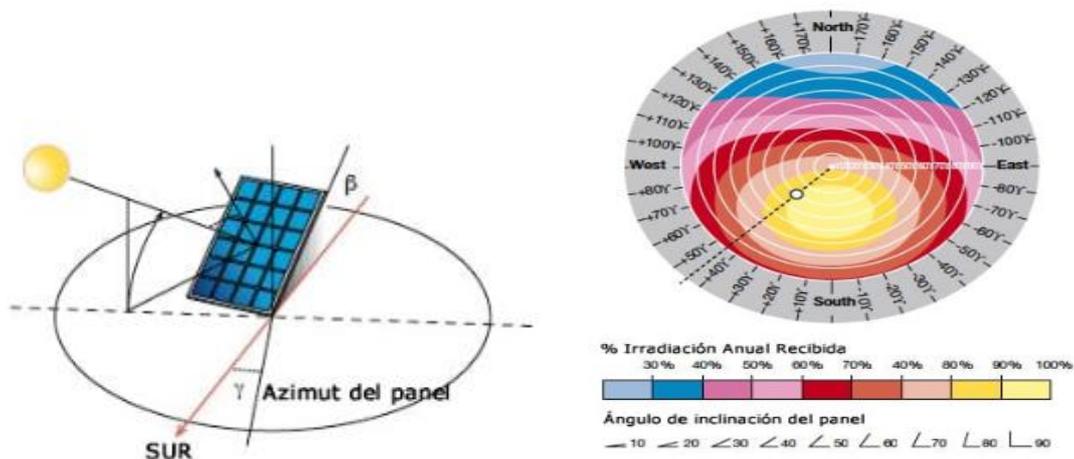


Figura 13. Ejemplo de irradiancia recibida por un módulo fotovoltaico en un plano inclinado.

En la figura anterior se muestra un ejemplo de gráfico donde se aprecia el tanto por cierto de irradiancia que recibirá un panel solar en función de su desviación respecto al sur (azimut del panel) y su ángulo de inclinación. En el ejemplo, podemos ver que una instalación fotovoltaica con un azimut de 45° (positivos pues es hacia el Oeste), representados por la línea de puntos que une el centro con los 45° , y con una

MEMORIA

inclinación de 30° (donde corta la línea de puntos con la circunferencia de los 30°), nos sale en la zona de mayor radiación, por lo que desviaciones de hasta 45° no afectan demasiado a la producción [17].

1.5.6 Modelos Clásicos de temperatura para la obtención de T_c

A continuación se describen los Modelos Clásicos de temperatura que se van a utilizar en este proyecto para el cálculo de la temperatura de célula. Dentro de los Modelos disponibles se ha optado por estudiar y comparar los siguientes 4: Modelos de Ross, King, Servant y Risser. Estos modelos presentan distintas ecuaciones cuyos parámetros es necesario determinar para nuestro modelo de célula concreto. Además, presentan variabilidad en cuanto a las variables de entrada. El modelo de Ross, por ejemplo, no toma en cuenta la velocidad del viento y es debido a esto que en teoría debería obtenerse un resultado menos preciso con su empleo.

- Modelo de Ross

El modelo de Ross es el más sencillo de los cuatro presentados. Tiene un único coeficiente, K_G que tiene una dependencia lineal con la irradiancia. La segunda variable que entra en juego es la temperatura de ambiente. Se añade de manera únicamente aditiva, sin coeficiente [18].

$$T_c = K_G \cdot G + T_a \quad (7)$$

- Modelo de King

El modelo de King es un modelo más completo que toma en cuenta la velocidad del viento e introduce dos parámetros. Al igual que con el Modelo de Ross, será necesario determinar estos parámetros con registros de datos disponibles.

$$T_c = T_a + G \cdot \exp(K_0 + K_{W_S} \cdot W_S) \quad (8)$$

Donde G es la irradiancia solar incidente sobre la superficie del módulo y K_0 y K_{W_S} son los coeficientes citados anteriormente: K_0 establece el límite superior de la temperatura del módulo a bajas velocidades de viento y alta irradiancia solar, mientras que K_{W_S} establece el valor al cual la temperatura del módulo cae cuando

MEMORIA

aumenta la velocidad del viento. Las unidades del coeficiente K_0 son $s \cdot m^{-1}$, mientras que K_{W_s} es adimensional [2].

- Modelo de Servant

Este Modelo propone la introducción de tres parámetros, uno para cada variable de entrada que toma: irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. La última de estas variables está presente en la ecuación restando, para considerar la pérdida de calor por convección [19].

$$T_c = T_a + K_G \cdot G \cdot (1 + K_{T_a} \cdot T_a)(1 - K_{W_s} \cdot W_s) \quad (9)$$

- Modelo de Risser

El último de los modelos presentados, también toma en cuenta la velocidad del viento e introduce 3 coeficientes. Pero además, introduce un cuarto coeficiente de manera independiente, K_0 .

$$T_c = K_0 + K_{T_a} \cdot T_a + K_G \cdot G + K_{W_s} \cdot W_s \quad (10)$$

1.6 Descripción de la solución propuesta

La solución que este texto propone, para obtener la temperatura de célula real ante diferentes irradiancias y poder así calcular la potencia máxima real que podemos generar, se presenta en esta sección. En primer lugar, se van a mostrar las simplificaciones que ha tomado este proyecto en su desarrollo:

1.- **Estudio sobre una única célula fotovoltaica:** En lugar de suponer un módulo fotovoltaico con $n \times m$ células, se ha basado el estudio en una única célula, obteniendo resultados que a continuación podrían extrapolarse a un módulo completo. Para ello, se ha considerado que nuestro módulo fotovoltaico está formado por una única célula, y se han considerado válidas las especificaciones del módulo completo para ella.

2.- **Célula sobre estructura fija y en plano horizontal:** con objeto de simplificar los cálculos, se han tomado las simplificaciones de que la célula se encuentra fija, con todos sus grados de libertad restringidos. Esto supone, que no realiza ningún tipo

MEMORIA

de seguimiento a la trayectoria del sol (los hay de uno y dos ejes). Además, la se ha considerado que la célula está en el plano horizontal y que la radiación que recibe es la radiación global. Esto supone las simplificaciones del cálculo del ángulo azimutal y cenital que definen la posición relativa del sol respecto de la superficie terrestre.

3.- La irradiancia global es la total incidente en la placa: dado que el objetivo de este texto no es el de estudiar los componentes de la radiación que finalmente inciden en la célula, se ha tomado que los datos de radiación global disponibles son los mismos que la radiación incidente en la célula. Pese a ello, conocer la naturaleza de la radiación solar es de vital importancia para poder comprender y operar tecnología fotovoltaica; es por eso que se ha dedicado un apartado a su estudio en el análisis del arte (sección 1.5.5).

Una vez identificadas las simplificaciones de partida que se van a tomar, el primer cometido es conocer las especificaciones de nuestra célula fotovoltaica disponibles en su ficha técnica (simplificación 1). A partir de este punto, la solución que se propone es la siguiente:

Se van a ajustar los parámetros de los Modelos Clásicos de temperatura a nuestra célula fotovoltaica mediante registros de datos disponibles referentes a irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. El cuarto registro necesario para “personalizar” los Modelos Clásicos a nuestra célula, es la temperatura real de célula que se tuvo en los momentos de los registros de las variables de entrada. Estos datos no son disponibles al no contar con un prototipo sobre el que poder realizar las mediciones. Razón por la que se ha tenido que tomar la siguiente simplificación:

4.- Datos de temperatura de célula reales calculados a partir del Modelo NOCT: se ha decidido que la manera de proceder frente a la carencia de los registros de temperatura de célula, será considerar la calculada mediante el Modelo NOCT. Como fue presentado en la sección X, este modelo solo necesita de datos de irradiancia y temperatura ambiente, por lo que permite el cálculo de la variable necesaria para el ajuste mediante los registros disponibles. Evidentemente, esto supone cometer un error inicial de partida que se va a traspasar al resto de los cálculos que realicemos. Además no hay forma de conocer la magnitud de este error por no contar con el prototipo real. Pese a que esta suposición influye en la comparativa de resultados final, no impedita ilustrar y calcular el hecho que quiere demostrarse en este proyecto. A partir de este momento se hablará del registro creado de la temperatura de célula mediante el Modelo NOCT como temperatura de célula real.

MEMORIA

Con los Modelos ajustados, seremos capaces de calcular la temperatura de trabajo real de nuestra célula bajo cualquier condición de temperatura ambiente, irradiancia y/o velocidad del viento. De esta forma, mediante el coeficiente de temperatura de potencia máxima proporcionada por el fabricante en la ficha técnica, se calculará la potencia máxima real que podremos generar. Esta potencia máxima estará referida a las condiciones estándar de prueba. Sin embargo, también se extrapolará este resultado a otras condiciones de irradiancia.

El siguiente diagrama de flujo muestra de manera esquematizada la solución que propone este texto.

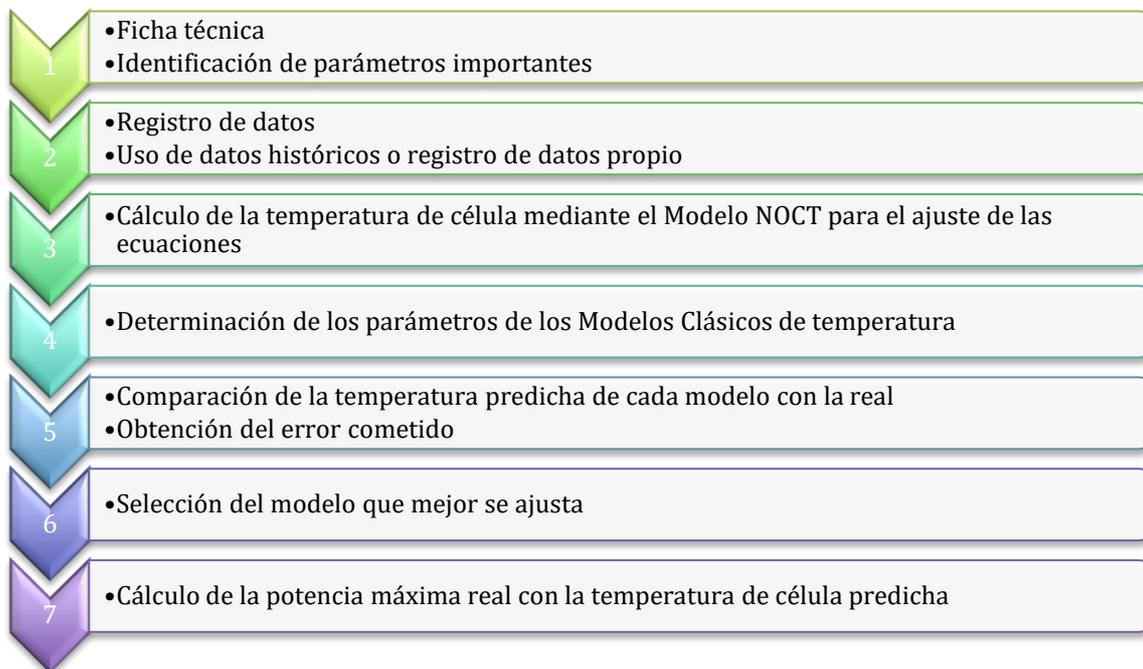


Figura 14. Diagrama de flujo de trabajo para la solución propuesta

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1 Descripción del equipo

- *Descripción de la célula fotovoltaica*

Para este proyecto se ha estudiado la temperatura de trabajo de una única célula fotovoltaica, de manera que se podría extrapolar fácilmente a un módulo fotovoltaico de varias células. Para ello, se ha asumido que las especificaciones eléctricas y térmicas del módulo fotovoltaico son las correspondientes a una única célula y se ha procedido como si el módulo tuviera una única célula. Se ha trabajado con las especificaciones técnicas de una placa fotovoltaica de la empresa Pramac. Se trata de un módulo fotovoltaico de Silicio Policristalino de 240 W, concretamente el modelo Pramac Luce MC 240 W.

El área total del módulo es 1652 mm x 100 mm y está encapsulado tanto frontal como posteriormente. La capa frontal es de vidrio templado y microestructurado de alta transmisividad, diseñada para proteger a la célula de golpes y de inclemencias del tiempo, así como para favorecer la absorción de la irradiancia incidente; la célula de silicio policristalino laminada en EVA (etilen-vinil acetato); y una capa posterior de Tedlar que la protege de efectos indeseables como oxidación y humedad. Esto supone para el módulo un espesor total de 50 mm.

A continuación se muestran los dos conjuntos de especificaciones que más interesan de la ficha técnica. En primer lugar, las correspondientes a su comportamiento eléctrico bajo las condiciones de operación estándar.

Tipo de celdas/módulo	Silicio policristalino (mc-Si)				
Clases de Potencia	220 W	225 W	230 W	235 W	240 W
Rango de Potencia (W)	± 3%				
Potencia máxima P_{mpp} (W)	220	225	230	235	240
Tensión punto de max. Potencia V_{mpp} (V)	29,8	29,9	30,0	30,1	30,2
Corriente punto de max. Potencia I_{mpp} (A)	7,40	7,53	7,67	7,81	7,95
Tensión de circuito abierto V_{oc} (V)	36,5	36,7	36,8	38,8	37,0
Corriente de corto circuito I_{sc} (A)	8,12	8,18	8,34	8,44	8,54

Tabla 2. Comportamiento del módulo fotovoltaico a las condiciones de operación estándar

En segundo lugar, para la consecución del objetivo de este proyecto, nos interesa el conjunto de parámetros de temperatura; concretamente, el valor CCT P_{max} . Este coeficiente nos indicará cuánto se ha reducido la potencia generada por cada grado

METODOLOGÍA DE TRABAJO

(en este caso Kelvin) que aumenta la temperatura de célula por encima de los 25°C (o en este caso 298 K) de operación nominal. Su valor es de - 0,48 %/K.

Coeficiente temperatura a P _{mpp} %/°C	-0,40
Coeficiente temperatura a V _{oc} %/°C	-0,38
Coeficiente temperatura a I _{sc} %/°C	+0,04
NOCT °C	45

Tabla 3. Parámetros de temperatura del módulo fotovoltaico

El fabricante también nos proporciona las curvas características del módulo para distintas condiciones de operación. Estas curvas son las curvas I-V y P-V en función de la irradiancia incidente. Estas gráficas serán utilizadas posteriormente para poder calcular la potencia real máxima para otras condiciones diferentes a las estándar.

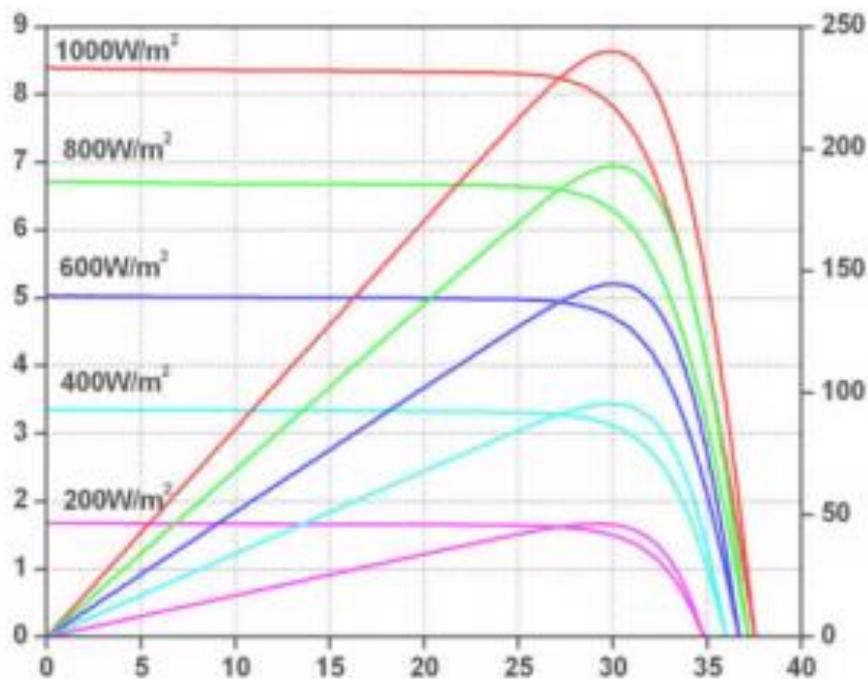


Figura 15. Curvas I-V en función de la temperatura de célula

METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Descripción de la instrumentaría necesaria para la toma de datos

Como ya ha sido comentado anteriormente, los datos necesarios para este proyecto de irradiancia global (W/m^2), temperatura ambiente ($^{\circ}C$) y velocidad del viento (m/s) se disponían ya, gracias a registros históricos [20]. El último dato necesario es la variable de salida; la temperatura real de célula. Al no disponer del prototipo y ocurriendo además, que en los módulos comerciales la célula está encapsulada de forma que no es posible medir su temperatura directamente con un sensor [2], se ha optado por calcularla para los valores ambientales meteorológicos del registro mediante el Modelo NOCT (Nominal Operation Cell Temperature). Esto supone acarrear a la regresión el error cometido por este modelo. Sin embargo, para un usuario que quisiera realizar este estudio con un prototipo de célula fotovoltaica, necesitaría la siguiente instrumentación para la medida de las variables:

- Sensores de temperatura que midieran la temperatura de célula ó Modelo NOCT en caso de no poder acceder a ella
- Sensor que mida la temperatura ambiente
- Piranómetro situado en el plano del módulo que evalúe la radiación global que recibe del cielo, incluyendo la directa y la difusa.
- Un anemómetro que mida la velocidad del viento

A su vez sería necesario un sistema informático con tarjetas de entrada que registrara estas variables periódicamente. La toma de datos escapa del objetivo de este texto.

- Computador y software Matlab

Para la obtención de los parámetros de los modelos clásicos específicos de nuestro modelo, es necesario realizar regresiones (tanto lineales como no lineales) con los registros de los datos que han sido recolectados. Se ha optado por utilizar el programa *Matlab* por incorporar en un único software las herramientas necesarias para los objetivos de este proyecto (herramientas para la regresión, herramientas gráficas). *Matlab* ofrece además el valor añadido de ser un lenguaje sencillo e intuitivo que permite realizar cálculos y programas, y archivarlos de manera rápida y sencilla.

Por lo tanto es necesario también un ordenador que permita la implantación de este software. Para este proyecto se ha utilizado un ordenador HP Pavilion y la versión Matlab R2014a. Como añadido, el registro de las variables se ha organizado en un

METODOLOGÍA DE TRABAJO

archivo Excel para a continuación importarlo a Matlab luego en definitiva los programas de software utilizados han sido estos dos.

2.2 Descripción de fases y tareas

- Registro de datos

Es necesario ordenar los datos registrados para la obtención de los modelos clásicos de temperatura. Estos datos se dividen en variables de entrada (irradiancia global, temperatura ambiente y velocidad del viento) y de salida (temperatura de célula). Mientras que las variables de entrada son conocidas de antemano gracias a registros históricos disponibles [20], la variable de salida no lo es ya que es la que queremos calcular. Lo ideal sería disponer de un prototipo en el que la temperatura de célula se pudiera medir directamente mediante el uso de sensores de temperatura. Al no ser el caso, se ha optado para obtener sus valores a partir del Modelo NOCT, como se ha presentado la simplificación 4 (sección 1.6). Una vez realizado este cálculo, es necesario escoger dos conjuntos de datos diferentes. El primero corresponde a los valores por cada hora (medidos en hora local) del día de todas las variables mencionadas, de los días 16, 17 y 18 de junio de 2016 en Bilbao (Latitud: 43.2603479, Longitud: -2.9334110). Este primer conjunto de datos será utilizado para la obtención de los parámetros de los modelos.

El segundo conjunto de datos, es igual que el primero pero correspondiente únicamente al día 21 de Junio de 2016. Este registro se utilizará una vez tenidos los modelos, para comparar las temperaturas de célula “reales” (calculadas mediante Modelo NOCT) y del modelo clásico, para poder así estimar el error que comete cada uno de ellos. Es importante señalar la necesidad de disponer de dos conjuntos de datos disjuntos para que de esta manera el error obtenido en base al segundo conjunto no esté influenciado por los datos utilizados para el cálculo de los parámetros.

Para realizar este registro se ha creado una hoja de cálculo Excel, el cual tiene un total de 64 registros por día, sumando un total de 320 datos. El conjunto utilizado para el ajuste de los parámetros se corresponde con los días 16, 17 Y 18 de Junio de 2016 y el registro del día utilizado para comprobar la validez de los modelos se corresponde con el día 21 de Junio de 2016. Este número de datos de los que se compone el archivo es de manera evidente fácilmente procesable por Matlab sin necesidad de un largo tiempo de computación, debido a que solo se dispone del valor de los datos para cada hora. Además, dentro de los registros de los días utilizados en este proyecto, solo se han tomado para las regresiones los valores de las horas en

METODOLOGÍA DE TRABAJO

el intervalo 5 AM – 20 PM, debido a que esas son las únicas horas en las que la célula recibe radiación solar. Por lo tanto, carecería de sentido utilizar los datos de fuera de este periodo ya que en esos momentos nuestra célula fotovoltaica no está generando electricidad.

A continuación, como caracterización meteorológica más importante, se muestra la evolución de la irradiancia global recibida por la célula a lo largo de los 3 días que se han escogido como conjunto para la determinación de los modelos. Esta irradiancia mostrada en la siguiente figura toma las simplificaciones 2 y 3 de la sección 1.6. Se observa cómo la irradiancia tiene una tendencia parabólica a lo largo del día, coincidente con las horas en las que más alta es la posición del sol o, en otras palabras, más verticalmente inciden los rayos de sol en la célula. El 16 de junio (primera gráfica), sigue una trayectoria ascendente sin perturbaciones hasta las 13h, momento en que se da el pico de irradiancia del día con un valor de 925.2 W/m^2 . La suavidad de la curva se debe a que probablemente aquel fue un día soleado sin presencia en absoluto de nubosidad.

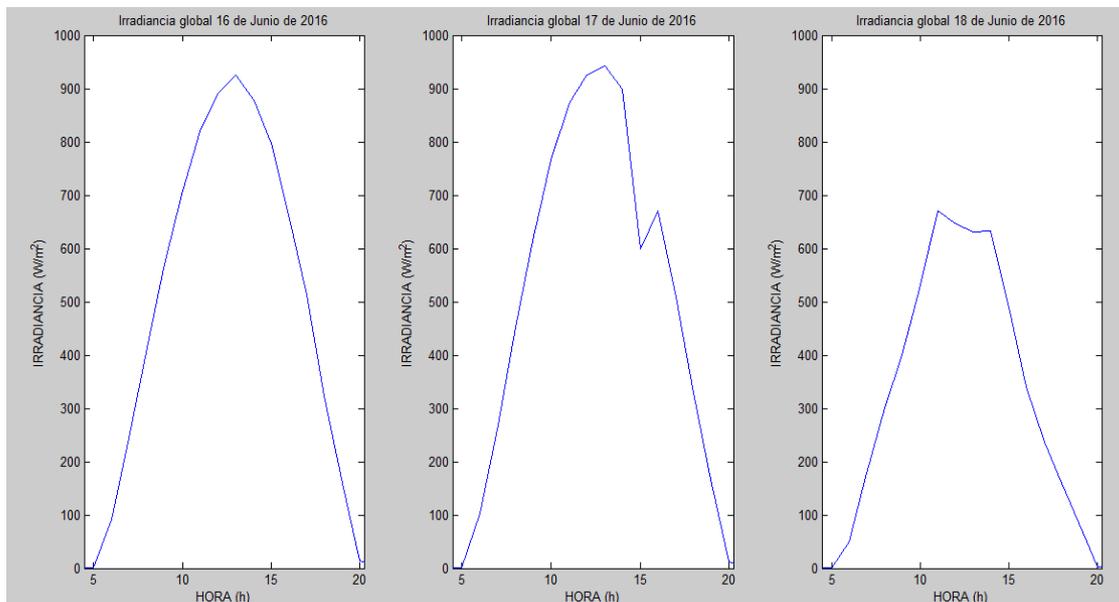


Figura 16. Evolución de la irradiancia global de los días 16, 17 y 18 de junio de 2016

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El día 17 de Junio de Junio muestra una irradiancia perturbada por intervalos nubosos durante la tarde, que provoca que aparezcan picos de irradiancia cuando la nubosidad se aleja de la trayectoria de los rayos de sol. El día 18 de Junio en cambio, fue probablemente un día con una nubosidad parcial continua a lo largo de las horas de luz, provocando que tan solo se alcanzara una irradiancia máxima de 670.6 W/m^2 a las 11h.

En cuanto a la temperatura ambiente y la velocidad del viento, se dispone también del registro del valor horario de cada variable. Por no considerar su representación gráfica de una importancia suficiente, las siguientes dos tablas recogen los valores máximos, mínimos y medios que se registraron de cada variable durante los 3 días seleccionados.

	<i>T máxima (°C)</i>	<i>T mínima (°C)</i>	<i>T media(°C)</i>
<i>16 de Junio</i>	<i>20,2</i>	<i>12,1</i>	<i>16,6</i>
<i>17 de Junio</i>	<i>19,0</i>	<i>12,6</i>	<i>16,3</i>
<i>18 de Junio</i>	<i>19,4</i>	<i>11,8</i>	<i>16,1</i>

Tabla 4. Datos de temperatura ambiente de los días 16, 17 y 18 de junio de 201

	<i>V máxima (m/s)</i>	<i>V mínima (m/s)</i>	<i>V media (m/s)</i>
<i>16 de Junio</i>	<i>18</i>	<i>6</i>	<i>11,48</i>
<i>17 de Junio</i>	<i>16</i>	<i>5</i>	<i>12,36</i>
<i>18 de Junio</i>	<i>21</i>	<i>6</i>	<i>13,56</i>

Tabla 5. Datos de velocidad del viento de los días 16, 17 y 18 de Junio de 2016

La temperatura ambiente sigue en los 3 días un perfil parecido, que asciende de manera muy regular hasta las horas de temperatura máxima, 13 h, a las 15 h y a las 14 h respectivamente. En cuanto a la velocidad del viento, esta es muy variable y se dispone únicamente de los registros a la hora de recogida de los datos. Lo ideal sería contar con datos tomados con una frecuencia mayor, de 100 o 1000 segundos por ejemplo para contar con una imagen mejor de la situación del viento aquel día. Por lo tanto, se ha de recordar que para un mejor resultado a la hora de procesar los datos es recomendable disponer de conjuntos de medida con una frecuencia de registro más alta.

Para la temperatura de célula, se tiene también sus valores cada hora desde que la célula comienza a recibir radiación solar. La temperatura de célula sigue una trayectoria similar a la de la temperatura ambiente, debido evidentemente a que es ella, junto con la irradiancia recibida e influencia de la inercia térmica y la

METODOLOGÍA DE TRABAJO

distribución de temperaturas en la célula (la cual se ha supuesto uniforme para este texto), la que hace que aumente la temperatura de célula. Sin embargo, su curva es mucho más acentuada. La temperatura de célula, oscila entre los 12/14 °C y 33/47 °C. Esto deja de manifiesto que la célula opera a temperaturas notablemente superiores a la temperatura de operación nominal de 25 °C, con la consecuente pérdida de potencia generada. La siguiente tabla muestra de nuevo los valores máximos, mínimos y medios de cada día.

	$T_{máxima}$ (°C)	$T_{mínima}$ (°C)	T_{media} (°C)
16 de Junio	47,0	12,3	31,5
17 de Junio	44,5	14,2	30,3
18 de Junio	36,7	13,6	26,6

Tabla 6. Datos de la temperatura de célula de los días 16, 17 y 18 de Junio de 2016

- Regresión lineal en Matlab

El siguiente paso de este trabajo es, una vez obtenida la caracterización meteorológica tanto del entorno como de la temperatura de célula, determinar los parámetros característicos de cada modelo para las condiciones ambientales registradas. Para ello se han tenido que realizar regresiones tanto lineales como no lineales, dependiendo del modelo. De igual forma, para cada caso se han tenido en cuenta las variables correspondientes, ya que hay modelos que tienen en cuenta la velocidad del viento y otros que no. Para las regresiones lineales se ha hecho uso del comando $fitglm(X,y)$, el cual genera un modelo lineal generalizado a partir de las respuestas y (T_c) a las entradas de la matriz X (G , T_a , y/o V). En este comando, la matriz X son las variables predictoras y el vector y es la variable de respuesta [21]. Para los modelos no lineales, como el modelo de King, se ha hecho uso del comando $fitnlm(X,y,modelfun,K)$. X e y tienen el mismo significado que en el caso anterior, $modelfun$ es la función definida del modelo en la que la matriz K son los coeficientes que se quieren calcular [22]. Estos pueden ser 2 o 3 dependiendo del modelo escogido. Habrá que inicializar una matriz K de las dimensiones adecuadas.

- Cálculo y comparación con el conjunto de datos no utilizado

Una vez ajustados los parámetros del modelo para nuestras condiciones, ya es posible calcular la temperatura de célula de otras condiciones cualquiera de irradiancia global, temperatura ambiente y velocidad del viento sin más que introduciendo sus valores en las ecuaciones de los modelos ajustadas. Por lo tanto, se va a realizar una comparación entre los datos “reales” de temperatura de célula de los que se dispone (día 21 de Junio de 2016) y de los calculados mediante los

METODOLOGÍA DE TRABAJO

modelos clásicos para las condiciones ambientales de cada hora. De esta forma se podrá calcular el error cometido mediante cada uno de los modelos (recordar que en el caso de este texto los modelos arrastran el error producido por el modelo NOCT).

Para acometer dicha labor se ha hecho uso de la métrica estadística RMSE (raíz del error cuadrático medio). Antes de nada se va a introducir el instrumento estadístico necesario para su obtención: la suma de errores cuadráticos (SSE). Donde y_i es el valor real de la variable estudiada e \hat{y} es el valor calculado por el modelo que se esté analizando

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

La RMSE se calcula realizando la raíz cuadrada del Error Cuadrático Medio (*MSE*, *Mean Square Error* en inglés), donde n es el número de muestras que se tiene:

$$MSE = \frac{SSE}{n} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (13)$$

Realizando el sumatorio de las diferencias entre los valores real y aproximado al cuadrado para cada toma que se tiene, y dividiendo el resultado por el número de tomas se obtiene el MSE (del inglés *Mean Squared Error*) o la media del error cuadrático. Realizando la raíz cuadrada del MSE obtenemos finalmente la raíz del error cuadrático medio, RMSE [23].

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para cada uno de los modelos, se calculará la RMSE sobre el conjunto de datos destinado a testear el modelo (21 de Junio de 2016), siendo el resultado mejor cuanto menor sea su valor. Se mostrarán las gráficas de la evolución horaria de la RMSE.

- Cálculo de la potencia máxima real generada según la especificación del fabricante

El fabricante, conocedor de que el rendimiento que se le saca al módulo fotovoltaico desciende según aumenta la temperatura de célula a partir de los 25 °C, nos proporciona el coeficiente de temperatura de potencia máxima, un coeficiente en unidades de % / °C que nos indica el tanto por cien que estamos perdiendo respecto a la potencia máxima a las condiciones de operación estándar, por cada °C que se eleva la temperatura de célula.

En nuestro caso, este parámetro tiene un valor de -0,4 %/K (o °C, ver tabla X). Gracias a este parámetro ya podemos calcular la potencia real a la que aspiramos generar cuando las condiciones son las estándar. A su vez, podremos calcular también la potencia máxima real que podríamos generar bajo otras condiciones de irradiancia gracias a la curva I-V proporcionada por el fabricante. En ella, podemos calcular cuánto es la potencia máxima que podremos generar a en función de la irradiancia que recibimos. Esta será la nueva potencia máxima de referencia sobre la que realizaremos el cálculo en base a nuestra temperatura de célula predicha

De esta forma se llegaría al final del procedimiento que se ha llevado a cabo en este proyecto, con la obtención de la potencia máxima que realmente podemos generar debido al sobrecalentamiento de la célula fotovoltaica, y la variedad de modelos ajustados para nuestra célula, a disposición de ser utilizadas en cualquier momento para el cálculo de la temperatura de trabajo de la célula.

2.2 Determinación de los parámetros de los Modelos Clásicos

En este apartado se calculan mediante el uso de regresiones lineales y no lineales en *Matlab*, los parámetros que tiene cada modelo explicado en la sección 1.5 (Análisis del estado del arte), y que son característicos tanto de las condiciones ambientales como de la naturaleza del modelo (en este caso célula fotovoltaica). Para cada modelo, se va a mostrar el resultado de la regresión realizada. El código programado para la obtención del resultado se puede encontrar en el ANEXO I.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Modelo de Ross

El único parámetro del modelo de Ross se puede determinar mediante una regresión lineal, luego se ha utilizado el comando *fitglm*, introduciendo como variables de entrada la temperatura ambiente T_a (la cual se ha introducido como 'Offset') y la irradiancia G (que sí viene multiplicada por una constante K_G), y como variable de salida la temperatura de célula T_c . El resultado obtenido para la regresión lineal realizada es un coeficiente de valor 0,027553.

```

Generalized Linear regression model:
Tc ~ G
Distribution = Normal

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
G	0.028685	0.00085265	33.642	1.5396e-34

Figura 17. Resultado de la regresión lineal mediante el modelo de Ross

De esta manera, nuestro modelo de Ross con el parámetro ajustado para nuestro caso de estudio es el siguiente:

$$T_c = 0,028685 \cdot G + T_a$$

- Modelo de King

Los coeficientes del modelo de King no se pueden obtener mediante una regresión lineal, ya que los coeficientes de cada variable están también determinados por el resto de las variables a la vez. Se realiza (como se ha indicado en el apartado *Regresión lineal en Matlab* de la sección 2.1) una regresión no lineal utilizando el comando *fitnlm*. Este modelo, a priori deberá proporcionar un error menor que el modelo de Ross ya que toma en cuenta además de la temperatura ambiente y la irradiancia global incidente, la velocidad del viento. La ecuación del modelo posee 2 parámetros que se han de ajustar, K_0 y K_v . Primero se ha definido la ecuación del modelo mediante el uso del comando para definir funciones $@(K,Q)$, que indica que la función definida depende tanto de K , matriz que contiene los coeficientes como Q , matriz que contiene los registros de los datos necesarios.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Nonlinear regression model:
 $y \sim (x2 + x1 \cdot \exp(K1 + K2 \cdot V_{\text{viento}}))$

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
K1	-3.4782	0.10601	-32.81	1.4662e-33
K2	-0.0057135	0.008015	-0.71285	0.47954

Figura 18. Resultado de la regresión no lineal mediante el modelo de King

Donde K1 y K2 se corresponden con K_0 y K_v . El primero de estos coeficientes es adimensional mientras que el segundo vendrá dado en s/m. De esta forma, la ecuación del modelo de King con los parámetros ajustados para nuestro caso de estudio es:

$$T_c = T_a + G \cdot (-3,4782 - 0,0057135 \cdot V)$$

- Modelo de Servant

El modelo de Servant necesita, al igual que el modelo de King, de una regresión no lineal, por lo que el procedimiento que se ha seguido para la obtención de los parámetros es idéntica al del apartado anterior. Sin embargo, la ecuación del modelo de Servant contempla 3 parámetros a determinar a diferencia del modelo de King que solo necesita 2. Estos son K_G , K_{T_a} y K_v . Por ello, la matriz inicializada para los parámetros en este caso será de 1×3 en vez de 1×2 . El resultado de la regresión no lineal se muestra a continuación:

METODOLOGÍA DE TRABAJO

```

Nonlinear regression model:
  y ~ (x2 + K1*x1*(1 + K2*x2)*(1 - K3*x3))

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
K1	0.053632	0.0099785	5.3748	2.6169e-06
K2	-0.023971	0.005242	-4.573	3.756e-05
K3	0.0052406	0.0066625	0.78659	0.43564

Figura 19. Resultado de la regresión no lineal mediante el modelo de Servant

Donde K1, K2 y K3 se corresponden con K_G , K_{T_a} y K_V respectivamente y vendrán dados en $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ y s/m respectivamente. De esta forma, la ecuación del modelo de King con los parámetros ajustados para nuestro caso de estudio es:

$$T_c = T_a + 0,053632 \cdot G \cdot (1 - 0,023971 \cdot T_a) \cdot (1 - 0,0052406 \cdot V)$$

- Modelo de Risser

El Modelo de Risser se puede determinar mediante una regresión lineal, haciéndose de nuevo la operación mediante el comando *fitglm* pero a diferencia del modelo de Ross, teniendo en cuenta la velocidad del viento. En la ecuación de este modelo, además de que cada variable para multiplicada por su coeficiente, el término independiente también. Este es indicado por *Matlab* bajo el nombre de *Intercept*. El resultado de la regresión lineal realizada es el siguiente:

```

Generalized Linear regression model:
  Tc ~ 1 + G + Ta + Ws
  Distribution = Normal

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	9.0645	3.7597	2.411	0.020152
G	0.029117	0.0019386	15.019	6.2417e-19
Ta	0.49185	0.26078	1.886	0.065901
Ws	-0.038086	0.12505	-0.30457	0.76213

Figura 20. Resultado de la regresión lineal mediante el modelo de Risser

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Los parámetros obtenidos tienen las mismas dimensiones que las indicadas hasta ahora. De esta forma, la ecuación del modelo de King con los parámetros ajustados para nuestro caso de estudio es:

$$T_c = 9,0645 + 0,029117 \cdot G + 0,49185 \cdot T_a - 0,038086 \cdot V$$

En la siguiente tabla se resumen los resultados que se han obtenido para cada modelo ajustado, tanto los parámetros obtenidos como el RMSE.

Modelo	K_G	K_{Ta}	K_V	K₀	RMSE (°C)
Ross	0,028685	-	-	-	2,84
King	-	-	-0,0057135	-3,4782	3,25
Servant	0,053632	- 0,023971	0,0052406	-	3,06
Risser	0,029117	0,49185	- 0,038086	9,0645	3,27

Tabla 7. Valores de coeficientes y error de los modelos utilizados

De esta forma concluye la parte del proyecto relativa al ajuste de los parámetros de los Modelos Clásicos. A partir de ahora ya podemos predecir la temperatura a la que estará nuestra célula ante unas condiciones cualesquiera. Por lo tanto, nos disponemos en situación de realizar una comparativa de todos los modelos, para analizar los pros y contras de cada uno y ver si se puede determinar uno de ellos como el mejor frente al resto. Además de esto, también podremos comprobar la potencia máxima real que generamos gracias a las especificaciones del fabricante. En definitiva, la siguiente sección de este texto se dedicará a analizar y manipular los modelos clásicos ajustados y los resultados obtenidos para que el lector acabe teniendo un entendimiento suficientemente amplio sobre la operativa con modelos clásicos de temperatura para la obtención de la potencia máxima real.

2.3 Obtención y comparativa de los resultados

En esta sección se va a comprobar en primer lugar la precisión con la que los modelos han predicho las temperaturas de la célula a lo largo del día. Para ello, como ya se ha mencionado, se dispone de los datos registrados del 21 de Junio de 2016 para esta labor. Para mostrar esta precisión se van a representar gráficamente la temperatura de célula predicha y la real estimada mediante NOCT (se la va a tratar como temperatura real) conjuntamente. A continuación, se mostrará la evolución de la raíz del error cuadrático medio, RMSE de cada modelo. El siguiente paso será

METODOLOGÍA DE TRABAJO

realizar una comparativa de los resultados obtenidos para cada modelo para definir cuál de ellos ha proporcionado un mejor resultado en cada caso, qué variables tiene en cuenta dicho modelo y si es lineal o no lineal.

Una vez realizados estos pasos, se va a proceder al cálculo de la potencia máxima real generada para las condiciones estándar, mediante el coeficiente de temperatura de potencia máxima ($\%/^{\circ}\text{C}$) proporcionado por el fabricante. Después se extrapolará este resultado a condiciones de irradiación distintas.

- Irradiancia del día utilizado para la comprobación de la validez de los modelos

La razón por la que se ha escogido el día 21 de Junio, es simple y llanamente que se trata de un día aparentemente sin nubosidad, con lo que la curva de irradiación con los datos de nuestro registro va a ser muy regular. Esto ayudará a que el RMSE no se desvíe más de lo que se espera debido a tomas de datos en momentos de irregularidades meteorológicas.

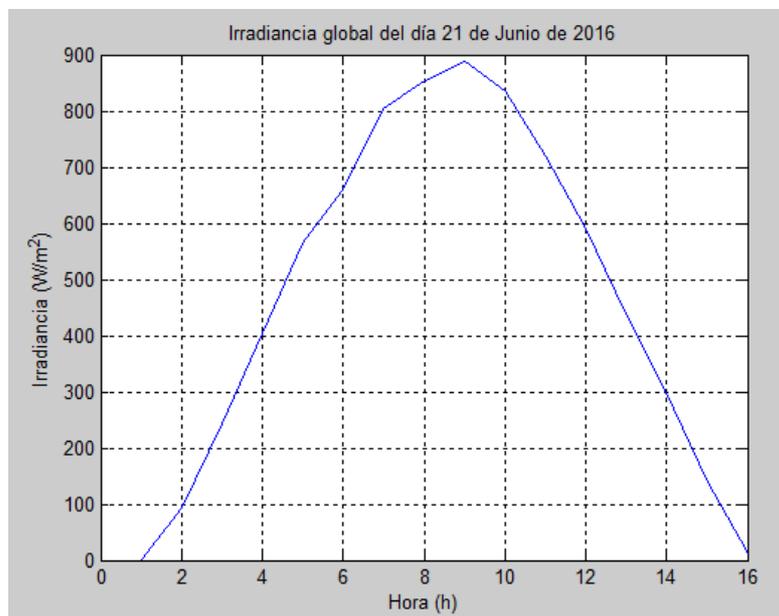


Figura 21. Gráfica de irradiación del día 21 de Junio de 2016

METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Gráficas de T_c reales frente a T_c predicha por los modelos

Para la obtención de los valores T_c “reales” mediante el modelo NOCT, se ha programado el modelo para la Temperatura de Operación Nominal de Célula proporcionada por el fabricante. Esta temperatura debe estar medida a una irradiancia de 800 W/m^2 , una temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una velocidad del viento de 1 m/s (además de para el espectro de luz 1.5 AM). Comprobando este dato en la ficha técnica (ver sección 2.1, *Descripción de la célula fotovoltaica*), se tiene que es de 45°C de $\pm 2^\circ\text{C}$. Se muestran las gráficas conjuntas para cada modelo en el mismo orden en el que han sido realizadas las regresiones. Por comodidad, se han mostrado únicamente el intervalo de los datos que interesan, correspondiente a las horas en las que la célula recibe radiación solar.

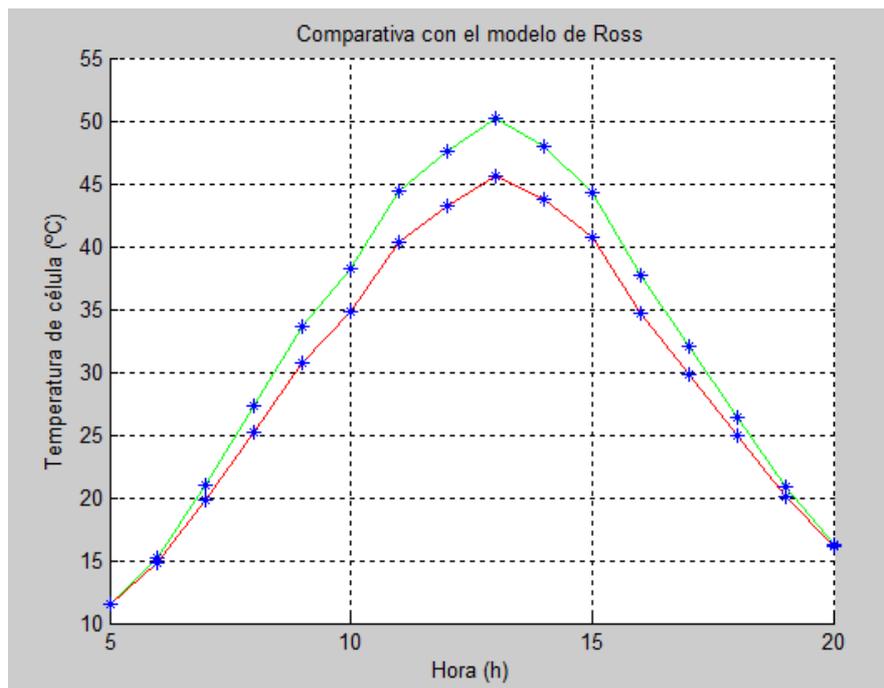


Figura 22. Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de Ross y la real.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

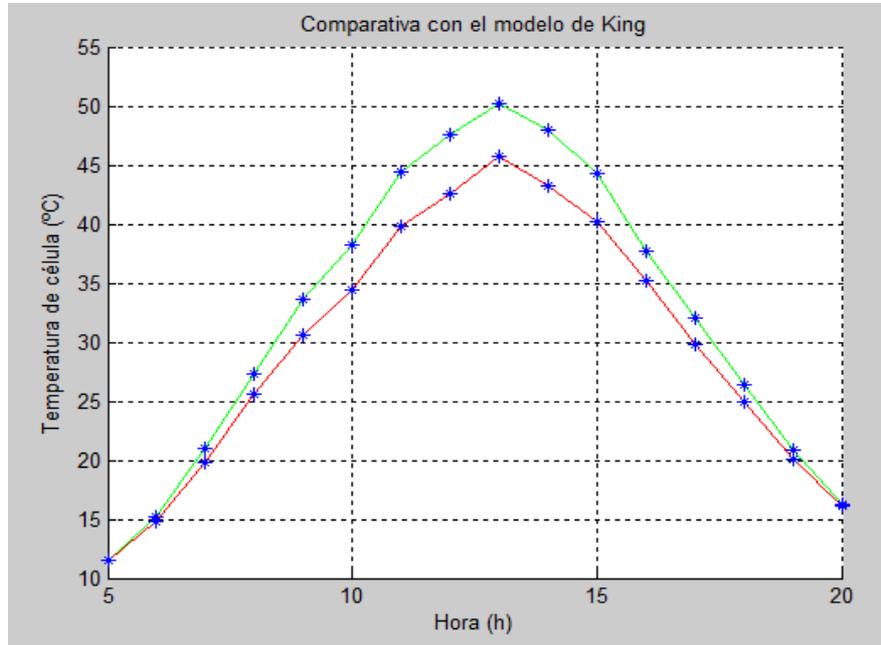


Figura 23. Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de **King** y la real.

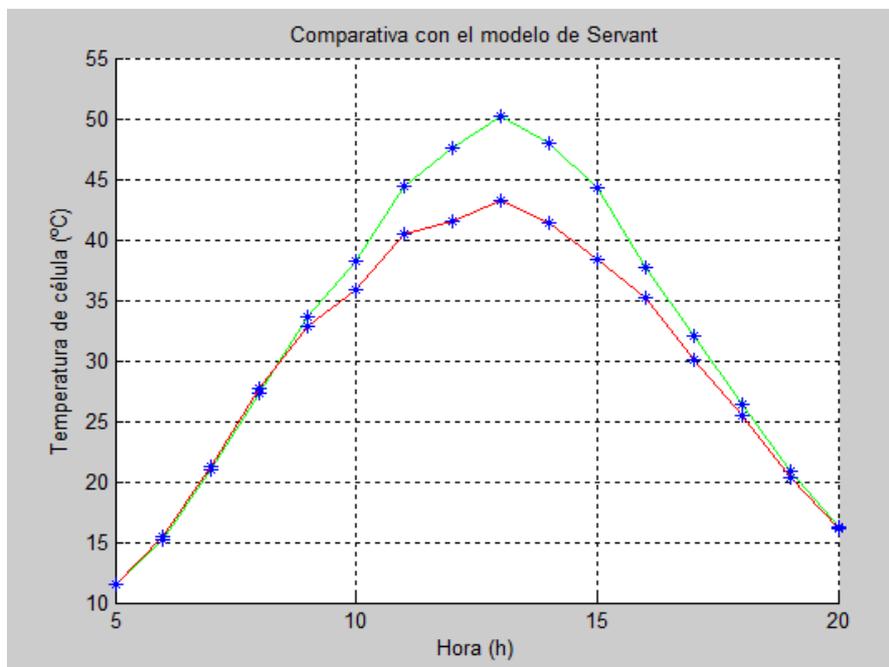


Figura 24. Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de **Servant** y la real.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

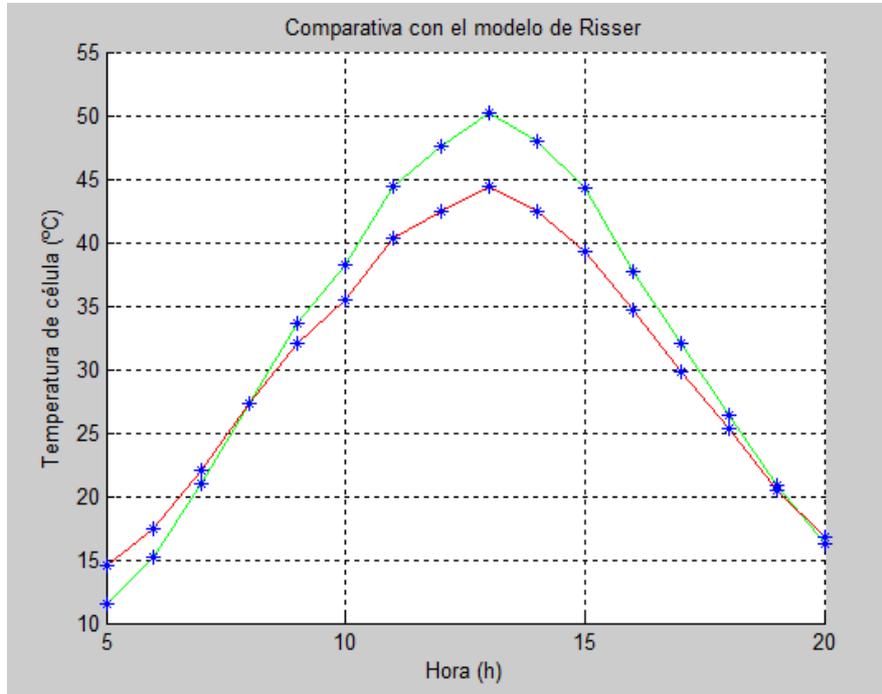


Figura 25. Gráfica comparativa de la temperatura de célula estimada por el modelo de **Risser** y la real

METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Gráficas de la evolución del RMSE en el día para la prueba

En la siguiente figura se ha mostrado conjuntamente la evolución de los errores RMSE de cada modelo para poder analizar posteriormente su regularidad y estabilidad.

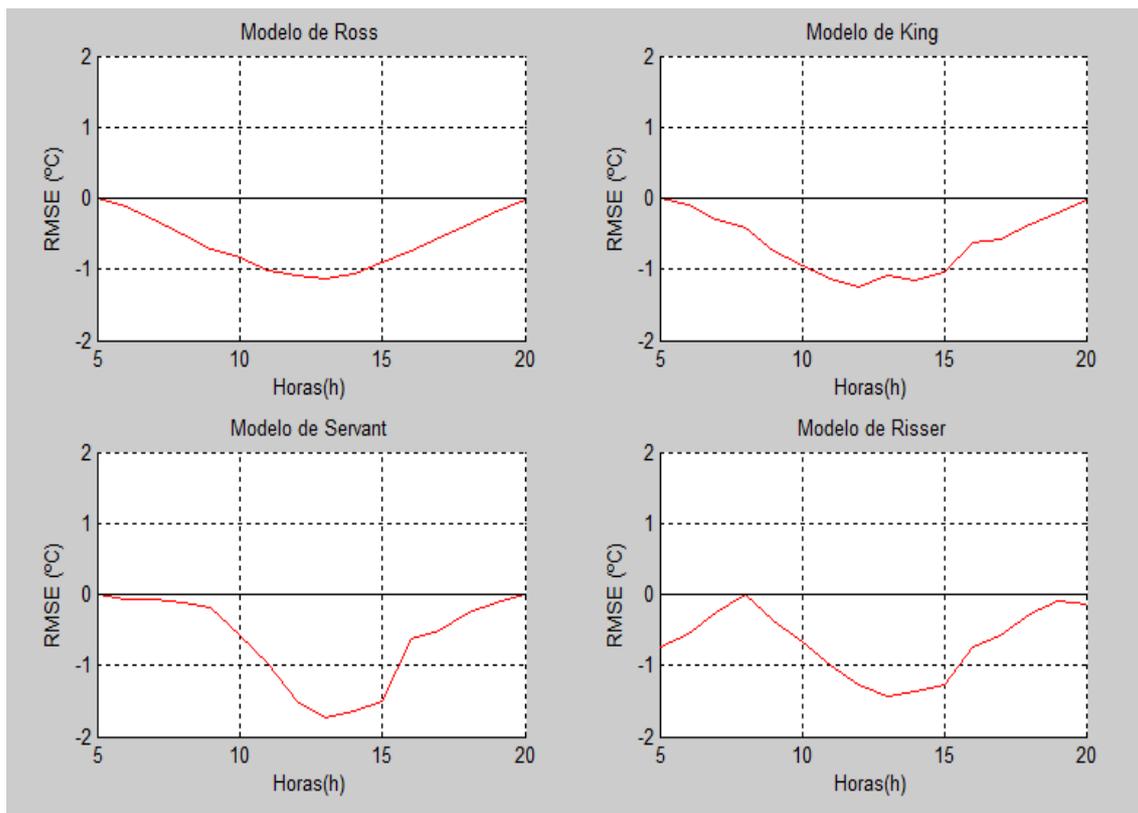


Figura 26. Gráficas de la evolución de la RMSE (°C) para cada modelo

En esta comparativa de gráficas se observa, en primer lugar a simple vista, que los 4 se acercan a la temperatura real de la célula. Analizando las gráficas más detalladamente, se observa que hay diferencias en la predicción según el modelo que se esté considerando.

Para el caso del modelo de Ross, la predicción se ajusta prácticamente a la real en las primeras y últimas horas del periodo de radiación solar considerado. Sin embargo, a lo largo del día se aleja de los valores deseados, alcanzando la discrepancia máxima a la hora de irradiancia máxima. Realizando un paréntesis, es importante señalar que en realidad, la temperatura de célula máxima no se obtendría exactamente a la hora del pico de irradiancia, sino que más tarde. Esto es debido a la inercia térmica que posee la célula fotovoltaica, la cual tarda en asimilar

METODOLOGÍA DE TRABAJO

y conducir la energía que le llega de la radiación solar [16]. El valor de RMSE para el modelo de Ross es de 2,84 °C (ver *figura 39*). Sorprendentemente, es el más bajo de los 4 modelos empleados. Esto no debería ser así debido a que el modelo de Ross obvia la influencia de la velocidad del viento. La velocidad del viento tiene una gran importancia en cuanto a la transmisión de calor por convección de la célula al entorno [12]. Al no tenerla en cuenta, el modelo debería ajustarse peor de lo que en realidad lo hace. Pese a todo, se observa que funciona peor en las horas centrales del día cuando la temperatura de célula es alta y el viento juega un papel importante. Si se hubiera dispuesto de un registro de datos más extenso, con medidas más frecuentes, habría quedado de manifiesto que este es el peor de los 4 modelos, por el hecho de no tener en cuenta el fenómeno convectivo entre célula y aire.

Los siguientes 3 modelos; King, Servant y Risser, sí tienen en cuenta la influencia de la velocidad del viento. Los valores de RMSE (°C) para ellos son 3,25, 3,06 y 3,27 respectivamente. Observamos que el más bajo de estos valores es el correspondiente al modelo de Servant. Analizando a simple vista las 3 gráficas comparativas entre la temperatura de célula real y la predicha, se observa también que Servant es también quien mejor aproximación nos ofrece. Comparándola con Risser, observamos que este último tiene la desventaja de que no se ha ajustado correctamente en las primeras horas de la mañana. Comparándola con King, podemos deducir que Servant sigue la línea real más ajustadamente salvo en las horas centrales del día donde también se desvía pero menos que el modelo de King.

En cuanto al RMSE, el modelo de Servant vuelve a darnos muy buen resultado para las primeras y últimas horas del día, pero no tanto para las horas centrales. Como ya se ha comentado, esto es debido a que en las horas en las que más alta es la temperatura de célula, más afectan los fenómenos transitorios que tienen lugar en ella (inercia térmica, pérdida de calor por convección). El modelo de Risser vuelve a manifestar mediante el RMSE que no es un modelo adecuado para las horas extremas del día. En cuanto al modelo de King, este sigue una precisión menos acentuada que el modelo de Servant, pero sin llegar a ajustarse correctamente en ningún momento del día. Su RMSE total es además mayor que el obtenido para el Modelo de Servant (3,25 > 3,06).

Esto se debe a que los coeficientes y la construcción de la ecuación del modelo de Servant describen mejor la relación entre las variables de entrada y de salida y del fenómeno físico que se está dando. Por ello, y obviando el resultado del modelo de Ross, se deduce que el modelo de Servant es el que con mejor precisión predice la temperatura de célula.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Cálculo de la potencia real generada según la especificación del fabricante

Una vez que hemos decidido que el modelo de Servant es el que mejor se ajusta a la realidad de nuestra célula fotovoltaica, ya podemos calcular la potencia real que generaríamos bajo las condiciones de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento cualesquiera, mediante el coeficiente de temperatura de potencia máxima. En primer lugar vamos a sentar las bases sobre las que vamos a referir los porcentajes de potencia que es perdida. Para ello, vamos a diferenciar entre las dos condiciones de prueba estandarizadas para la medición de las especificaciones de la célula.

-*Condiciones de estándar de prueba:* irradiancia de 1000 W/m², temperatura ambiente de 25 °C y distribución espectral de 1.5 AM.

-*Condiciones nominales de operación:* irradiancia de 800 W/m², temperatura ambiente de 25 °C, velocidad del viento de 1 m/s y distribución espectral de 1.5 AM.

En segundo lugar, observamos en la ficha técnica que nuestra célula está diseñada para generar un total de 240 W para la primera de las condiciones.

En tercer lugar, debemos conocer el coeficiente temperatura de potencia máxima. El fabricante proporciona un único coeficiente, el cual supone válido tanto como para las condiciones estándar como para las condiciones nominales de operación. Su valor es de - 0,4 %/°C (ver *tabla 3*).

Una vez definido el punto de partida con los datos necesarios, procederemos al cálculo de la potencia real que podemos llegar a generar. Para ello, referiremos todos los valores a las *condiciones estándar de prueba*, y la potencia total generada mostrada en el final de los cálculos será respecto a la potencia máxima que podemos generar en dichas condiciones.

Supongamos un escenario en el que se tienen las mismas condiciones ambientales y una velocidad del viento nula:

- Irradiancia: 1000 W/m²
- Temperatura ambiente: 25°C
- Velocidad del viento: 0 m/s

Introduciendo los datos en la ecuación del modelo de Servant ajustada:

$$T_c = T_a + 0,053632 \cdot G \cdot (1 - 0,023971 \cdot T_a) \cdot (1 - 0,0052406 \cdot V)$$

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se obtiene el siguiente valor de temperatura de célula:

$$T_c = 46,49 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ahora, se puede calcular cual es la pérdida de potencia máxima en la célula debido al calentamiento. La célula empieza a generar menos potencia a partir de que su temperatura excede los 25 °C.

$$\text{Coeficiente de temperatura de potencia máxima: } K = -0,4 \text{ } \%/^\circ\text{C}$$

$$\text{Porcentaje de potencia máxima que se pierde: } K \cdot (46,49 - 25) = 8,6 \text{ } \%$$

$$\text{Potencia máxima a esta temperatura de célula: } P_{\max} = 240 \cdot (1 - 0,086) = 219,4 \text{ W}$$

Por lo tanto, debido al incremento de temperatura de célula, hemos pasado de poder generar 240 W a poder generar 219,4 W. Esto supone una reducción de potencia de 20,6 W, que es un valor considerablemente alto (el 8,6 % de la potencia por la que hemos pagado). Es cierto que en condiciones más realistas, tendríamos velocidad del viento y esto ayudaría a la refrigeración de la célula vía convección. Veamos esta mejora de la potencia para una velocidad del viento $V = 10 \text{ m/s}$ y suponiendo el resto de valores constantes.

Introduciendo los datos en la ecuación del modelo de Servant, se obtiene el siguiente valor de temperatura de célula:

$$T_c = 45,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

Un viento con una velocidad de 10 m/s, la cual es una velocidad relativamente alta para un entorno con obstáculos a su trayectoria como donde puede estar situada nuestra placa fotovoltaica, solo ha podido disminuir la temperatura de célula en 1,12 °C. Esto supone que el porcentaje de potencia que perdemos es menor, concretamente un 0,43 % menor. Como consecuencia, la potencia generada realmente para estas condiciones y con la introducción de la velocidad del viento es mayor y ha pasado de ser 219,4 W, a ser 220,4 W.

En definitiva, se observa que la potencia que generaremos realmente, incluso para las condiciones estándar para las que se ha probado la placa, no va a acercarse a la indicada por el fabricante debido al sobrecalentamiento de la temperatura de célula.

Finalmente, pasemos a calcular la pérdida de potencia ante otras condiciones de irradiancia; por ejemplo:

METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Irradiancia: 600 W/m²
- Temperatura ambiente: 25 °C
- Velocidad del viento: 0 m/s

Introduciendo los datos en la ecuación del modelo de Servant ajustada se obtiene el siguiente valor de temperatura de célula:

$$T_c = 37,9 \text{ °C}$$

Como era de esperar, en este caso es menor debido a los 400 W/m² menos que recibe. Ahora, necesitamos conocer la referencia de potencia máxima respecto a la cual calcularemos nuestra pérdida. Es posible conocer este dato gracias a las curvas I-V proporcionadas por el fabricante (ver *figura 15*). Para calcularlo, basta con multiplicar los valores de intensidad y voltaje máximos disponibles en los extremos de la curva. La nueva potencia máxima de referencia es:

$$P_{\max_{\text{ref}}} = 182,5 \text{ W}$$

Acto seguido calculamos al igual que en el caso anterior el porcentaje de potencia pérdida y la potencia máxima real para nuestra temperatura de célula. Los resultados se muestran a continuación:

Coefficiente de temperatura de potencia máxima: $K = -0,4 \text{ \%}/\text{°C}$

Porcentaje de potencia máxima que se pierde: $K \cdot (37,9 - 25) = 5,16 \text{ \%}$

Potencia máxima a esta temperatura de célula: $P_{\max} = 182,5 \cdot (1 - 0,0516) = 173 \text{ W}$

En este caso la reducción de potencia ha sido menor debido a que el salto térmico entre la temperatura de célula y la temperatura de célula estándar era menor.

2.4 Planificación del proyecto. Diagrama de Gantt

En esta última sección correspondiente al bloque de Metodología de Trabajo, se van a detallar las fases y tareas llevadas a cabo en el proyecto en función del tiempo necesario a invertir en cada una de ellas, mediante un diagrama de Gantt. Las tareas mostradas en el diagrama y sus duraciones son las siguientes:

T.1: Planificación del proyecto. 10 días. Tiempo previo al inicio del proyecto necesario para establecer la metodología a seguir, datos de variables necesarias y concretar los objetivos que quieren conseguirse.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

T.2: Registro de datos. Tarea simultánea con T.1. 10 días. A la vez que se realiza la planificación del proyecto, ya es posible comenzar a obtener y crear el fichero en Excel con los datos de las variables necesarias. Estos datos pueden estar ya disponibles, como en nuestro caso, o pueden también ser recogidos in situ si se dispone de un modelo de célula real.

T.3: Cálculo de la temperatura de célula mediante el Modelo NOCT. 1 día. Una vez situados en el punto de partida, completadas las tareas 1 y 2, es necesario calcular la última de las variables necesarias para la siguiente fase. Gracias a la implementación en Matlab del algoritmo de este modelo, esta tarea se lleva a cabo en 1 día.

T.4: Determinación de los parámetros de los Modelos Clásicos. 4 días. Esta tarea se define para las regresiones lineales y no lineales que es necesario realizar para caracterizar los Modelos Clásicos a nuestra célula en concreto. Se ha tomado un tiempo prudente de 1 día para cada uno de los Modelos, sumando el total de 4 días para los 4 Modelos, en este orden: Ross, King, Servant y Risser.

T.5: Comparativa de resultados y obtención del error. 6 días. Esta tarea, una de las más importantes del proyecto, se lleva a cabo también en Matlab y nos proporcionará las bases para obtener un criterio que nos permita determinar las diferentes características de cada Modelo, mediante la prueba de cada uno sobre un conjunto de datos independientes (21 de Junio de 2016). Para ello, se obtendrá el error que comete cada uno

T.6: Cálculo de la potencia máxima real: 2 días. La última tarea de este proyecto corresponde con la obtención de la potencia máxima real de nuestra célula, mediante el coeficiente de temperatura de potencia máxima.

Para la consecución total de este proyecto se han invertido un total de **23 días**, que empleando 7 horas de trabajo en cada uno de ellos, nos da un total de **161 horas** trabajadas.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

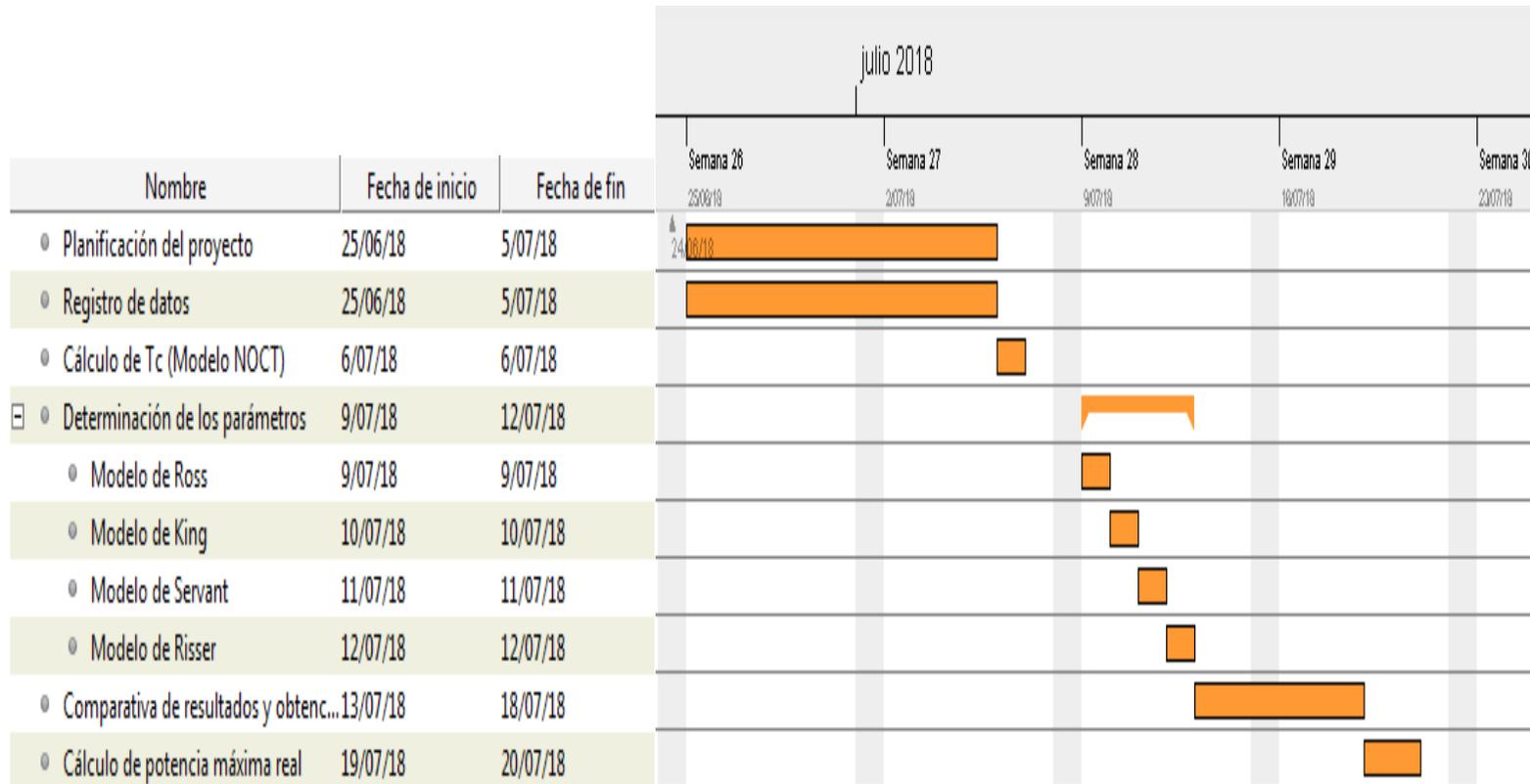


Figura 27. Diagrama de Gantt del proyecto

3. CONCLUSIONES

Este proyecto ha podido concluir gracias al desarrollo realizado, que la potencia máxima real generada mediante una célula o módulo fotovoltaico nunca será la señalada por el fabricante ya que esta ha sido medida para condiciones nominales. Esto es debido a que si la irradiancia es de 1000 W/m^2 , la temperatura de trabajo se disparará hasta alrededor de los $47 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que si la temperatura de célula son $25 \text{ }^\circ\text{C}$, esto querrá decir que la irradiancia no llega siquiera a acercarse al valor estándar de operación. Se ha comprobado que la potencia máxima generada depende principalmente de la temperatura de trabajo, pudiendo alcanzarse descensos en torno al 5-8% en la potencia.

Los Modelos Clásicos de Temperatura han demostrado ser un método aceptable para el cálculo de esta temperatura. Pese a presentar un error de unos 3°C , presentan la ventaja de poder aplicarlos a distintas condiciones ambientales y son innegablemente sencillas y convenientes para usar si no es necesaria una precisión mayor.

Además, se ha comprobado que el valor calculado mediante Modelos Clásicos es siempre unos grados centígrados menor que la real, por lo que se conoce también que estos métodos cometen error por defecto.

Englobando el resultado de este proyecto en una frase podría decirse que se ha analizado, ajustado y llevado a cabo el cálculo de la temperatura real de trabajo mediante un método que presenta una precisión relativamente baja, pero que es útil gracias a su sencillez y en el caso de que una determinación más precisa no sea necesaria, para calcular la potencia máxima real generada.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ayers, D. (1986). *English words from Latin and Greek elements*. University of Arizona Press.
- [2] Sadek, I. (2016). *Simulación por el método de los elementos finitos de la temperatura de trabajo de un módulo fotovoltaico bajo condiciones ambientales realistas*. Universidad de Málaga.
- [3] Luque, A. y Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons Ltd.
- [4] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2009). *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red*. Autor.
- [5] Montoya, C. (2010). *Master profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental*. Escuela de Organización Industrial.
- [6] Turrillas, E. (2014). *Estudio comparativo de la eficiencia energética en seguidores solares*. Universidad Pública de Navarra.
- [7] Agencia Internacional de la Energía (2018). *Snapshot of global photovoltaic markets*. Autor.
- [8] Instituto de Energía Solar (2017). *Gráficos significativos energía solar fotovoltaica*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (2016). *Photovoltaics report*. Autor.
- [10] Skoplaki, E. y Palyvos, J.A. (2009). *Operating temperature of photovoltaic modules: A survey or pertinent correlations*. National Technical University of Athens.
- [11] U.S. Department of Energy (1986). *Flat-Plate Solar Array Project Final Report*. Jet Propulsion Laboratory.
- [12] Moran, J. y Shapiro, N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Editorial Reverte.
- [13] Basore, P. (1994). *Defining terms of crystalline silicon solar cells*. John Wiley & Sons. Ltd.
- [14] Perpiñan, O. (2010). *Célula solar. Energía fotovoltaica*. Autor.
- [15] Jiménez, M. y Granda-Gutiérrez, E. (2013). *Modelado y simulación de celdas y paneles solares*. Instituto Tecnológico de Saltillo.
- [16] Skoplaki, E. y Palyvos, J.A. (2008). *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*. National Technical University of Athens.

BIBLIOGRAFÍA

- [17] SunFields Europe (2014). *Energía Fotovoltaica – Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP*. Autor
- [18] Ross, R. G. (1976). *Interface design considerations for terrestrial solar cell modules*. California Institute of Technology
- [19] Servant, J-M. (1986). *Calculation of the cell temperature for photovoltaic modules from climatic data*. Centre d'Études Nucléaires.
- [20] Departamento de Ingeniería Eléctrica (2017). *Master Universitario "Integración de las Energías Renovables en el Sistema Eléctrico". Anexo I. Datos climatológicos por hora*. Universidad del País Vasco (UPV-EHU).
- [21] Matlab (2014). *Generalized Linear Regression Model Class*. Autor. Consultado el 14 de Julio de 2018.
<file:///C:/Program%20Files/MATLAB/R2014a/help/stats/generalizedlinearmodel-class.html>
- [22] Matlab (2014). *Fit Nonlinear Regression Model*. Autor. Consultado el 14 de Julio de 2018.
<http://www.mathworks.com/help/releases/R2014a/stats/fitnlm.html>
- [23] Parra, D. (2015). *Métricas de Evaluación*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

ANEXO I

Código programado para la determinación de los parámetros de los Modelos Clásicos de Temperatura

Modelo de Ross

```

ModeloRoss=fitglm(TRAIN(:,[1 2]),TNOCT,'Tc~G-1','VarNames',{'G','Ta','Tc'],'Offset',TRAIN(:,2))
TcRoss = T21JUNIO + 0.028685.*G21JUNIO;
x=5:20;
hold on
plot(x,Tc,'g');
plot(x,Tc,'*');
plot(x,TcRoss,'r');
plot(x,TcRoss,'*');

xlabel('Hora (h)');
ylabel('Temperatura de célula (°C)');
title('Comparativa con el modelo de Ross');
grid on
hold off
  
```

Modelo de King

```

Q=[TRAIN Vviento];
F=TNOCT;
K_inicial=[0 0];
King = @(K,Q)(Q(:,2)+Q(:,1).*exp(K(1)+K(2).*Vviento));

ModeloKing=fitnlm(Q,F,King,K_inicial)

TcKing = T21JUNIO + G21JUNIO.* exp(-3.4782 - 0.0057135.*V21JUNIO);
x=5:20;
hold on
plot(x,Tc,'g');
plot(x,Tc,'*');
plot(x,TcKing,'r');
plot(x,TcKing,'*');
xlabel('Hora (h)');
ylabel('Temperatura de célula (°C)');
title('Comparativa con el modelo de King');
grid on
  
```

Modelo de Servant

```

Q=[TRAIN Vviento];
F=TNOCT;
K_inicial=[0 0 0];
Servant = @(K,Q) (Q(:,2)+K(1).*Q(:,1).*(1 + K(2).*Q(:,2)).*(1-K(3).*Q(:,3)));

ModeloServant=fitnlm(Q,F,Servant,K_inicial)

TcServant = T21JUNIO + 0.053632.*G21JUNIO.*(1-0.023971.*T21JUNIO).*(1-0.0052406.*V21JUNIO);
x=5:20;
hold on
plot(x,Tc,'g');
plot(x,Tc,'*');
plot(x,TcServant,'r');
plot(x,TcServant,'*');

xlabel('Hora (h)');
ylabel('Temperatura de célula (°C)');
title('Comparativa con el modelo de Servant');
grid on
hold off
  
```

Modelo de Risser

```

Q=[TRAIN Vviento];
F=TNOCT;

ModeloRisser=fitglm(Q(:,[1 2 3]),F(:,1),'Tc~1+G+Ta+Ws','VarNames',{'G','Ta','Ws','Tc'})
TcRisser = 9.0645 + 0.029117.*G21JUNIO + 0.49185.*T21JUNIO - 0.038086.*V21JUNIO;
x=5:20;
hold on
plot(x,Tc,'g');
plot(x,Tc,'*');
plot(x,TcRisser,'r');
plot(x,TcRisser,'*');

xlabel('Hora (h)');
ylabel('Temperatura de célula (°C)');
title('Comparativa con el modelo de Risser');
grid on
hold off
  
```

Anexo II

Ficha técnica

Módulo Fotovoltaico Policristalino PRAMAC LUCE MC

Ficha Técnica

Características generales y parámetros eléctricos

Tipo de celdas/módulo	Silicio policristalino (mc-Si)				
Clases de Potencia	220 W	225 W	230 W	235 W	240 W
Rango de Potencia (W)	± 3%				
Potencia máxima P_{mpp} (W)	220	225	230	235	240
Tensión punto de max. Potencia V_{mpp} (V)	29,8	29,9	30,0	30,1	30,2
Corriente punto de max. Potencia I_{mpp} (A)	7,40	7,53	7,67	7,81	7,95
Tensión de circuito abierto V_{oc} (V)	36,5	36,7	36,8	38,8	37,0
Corriente de corto circuito I_{sc} (A)	8,12	8,18	8,34	8,44	8,54
Factor de llenado FF (%)	74,4	75,0	75,0	75,7	76,0
Eficiencia del módulo η (%)	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5
Potencia específica (W/m^2)	133	136	139	142	145

Características generales y parámetros eléctricos

Coefficiente temperatura a P_{mpp} %/°C	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40
Coefficiente temperatura a V_{oc} %/°C	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38
Coefficiente temperatura a I_{sc} %/°C	+0,04	+0,04	+0,04	+0,04	+0,04
NOCT °C	45	45	45	45	45

STC: 1000W/m², temperatura de célula 25°C, AM 1,5 - Todos los parámetros eléctricos varían en ± 3%

Dimensiones y Curvas I-V

