

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA
OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA
DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO BASADO EN
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Autor: Francisco Javier Vázquez Jiménez

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO BASADO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Autor:

Francisco Javier Vázquez Jiménez

Tutor:

Manuel Felipe Rosa Iglesias

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO BASADO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Autor: Francisco Javier Vázquez Jiménez
Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mis padres

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 2. INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA | 4 |
| 2.1. La célula solar | 4 |
| 2.2. Ecuación característica del módulo fotovoltaico | 7 |
| 2.3. Modelado de la curva característica del módulo fotovoltaico | 10 |
| 2.4. Asociación en serie y paralelo de módulos fotovoltaicos | 13 |
| 2.4.1. Ventajas e inconvenientes de las instalaciones fotovoltaicas | 16 |
| 2.4.2. Criterio de selección de un módulo fotovoltaico | 17 |
| 2.5. Situación actual de la energía fotovoltaica en España | 17 |
| 3. ELECTRÓLISIS | 19 |
| 3.1. El hidrógeno | 19 |
| 3.2. Obtención del hidrógeno por electrólisis | 20 |
| 3.3. El electrolizador | 22 |
| 3.4. Modelado de la curva característica del electrolizador | 24 |
| 4. ACOPLAMIENTO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO CON EL ELECTROLIZADOR | 26 |
| 4.1. Especificaciones de los componentes del sistema | 26 |
| 4.2. Configuración óptima de paneles en serie y en paralelo de la instalación fotovoltaica | 28 |
| 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS | 33 |
| 5.1. Parámetros de la instalación fotovoltaica | 34 |
| 5.1.1. Parámetro R_s | 34 |
| 5.1.2. Parámetro R_{sh} | 38 |
| 5.1.3. Parámetro I_{ph} | 41 |
| 5.1.4. Parámetro I_r | 45 |
| 5.1.5. Parámetro a | 50 |
| 5.2. Parámetro del electrolizador | 53 |
| 5.2.1. Parámetro T_{sp} | 53 |
| 6. CONCLUSIONES | 56 |
| 7. ANEXOS (CÓDIGOS DE MATLAB) | 59 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA | 71 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Reparto entre diversos combustibles en 2013..... | 2 |
| Figura 2: Instalación fotovoltaica..... | 3 |
| Figura 3: Estructura simplificada de una célula fotovoltaica de unión p-n..... | 5 |
| Figura 4: Esquema resultante equivalente..... | 7 |
| Figura 5: Curva característica del módulo fotovoltaico dependiendo de la radiación solar..... | 10 |
| Figura 6: Curva característica de nuestro módulo fotovoltaico..... | 11 |
| Figura 7: Módulo fotovoltaico..... | 13 |
| Figura 8: Campo solar..... | 13 |
| Figura 9: Conexión en serie de dos módulos fotovoltaicos..... | 13 |
| Figura 10: Conexión en paralelo de dos módulos fotovoltaicos..... | 14 |
| Figura 11: Conexión en serie y paralelo de módulos fotovoltaicos..... | 15 |
| Figura 12: Potencia instalada en 2014 (MW de C. Cont.)..... | 18 |
| Figura 13: Potencia instalada acumulada (MW de CC)..... | 18 |
| Figura 14: Estructura cristalina del hidrógeno..... | 19 |
| Figura 15: Diagrama simplificado del proceso de electrólisis..... | 20 |
| Figura 16: Esquema simplificado de un electrolizador PEM..... | 22 |
| Figura 17: Principio de funcionamiento de un electrolizador alcalino..... | 23 |
| Figura 18: Curva I-V del electrolizador dependiendo de la temperatura de entrada del agua..... | 24 |
| Figura 19: Curva I-V del electrolizador de nuestro estudio..... | 25 |
| Figura 20: Diagrama de flujo del sistema de acoplamiento generador fotovoltaico- electrolizador..... | 26 |
| Figura 21: Definición de potencia máxima y potencia útil..... | 29 |
| Figura 22: 10 paneles en paralelo y 25 en serie en la instalación fotovoltaica..... | 29 |
| Figura 23: 25 paneles en paralelo y 10 en serie en la instalación fotovoltaica..... | 30 |
| Figura 24: 50 paneles en paralelo y 5 en serie en la instalación fotovoltaica..... | 30 |
| Figura 25: 63 paneles en paralelo y 4 en serie en la instalación fotovoltaica..... | 30 |
| Figura 26: 83 paneles en paralelo y 3 en serie en la instalación fotovoltaica..... | 31 |
| Figura 27: 125 paneles en paralelo y 2 en serie en la instalación fotovoltaica..... | 31 |
| Figura 28: Caso de referencia del acoplamiento de la instalación fotovoltaica con el electrolizador..... | 32 |
| Figura 29: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro R_s | 34 |
| Figura 30: Zoom de la figura anterior..... | 35 |
| Figura 31: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro R_s | 36 |
| Figura 32: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro R_{sh} | 38 |
| Figura 33: Zoom de la figura anterior..... | 39 |
| Figura 34: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro R_{sh} | 40 |
| Figura 35: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro I_{ph} | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro I_{ph} | 44 |
| Figura 37: Curva I-V del diodo y de la célula..... | 45 |
| Figura 38: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro I_r | 46 |
| Figura 39: Zoom 1 de la gráfica anterior | 46 |
| Figura 40: Zoom 2 de la gráfica anterior | 47 |
| Figura 41: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro I_r | 48 |
| Figura 42: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro a | 50 |
| Figura 43: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro a | 52 |
| Figura 44: Curvas características del electrolizador dependiendo del parámetro T_{sp} | 53 |
| Figura 45: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro T_{sp} | 55 |

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|--|---|
| R_s : Resistencia en serie. | N_p : Número de paneles en paralelo. |
| R_{sh} : Resistencia en paralelo. | T_{cielo} : Temperatura del cielo. |
| I_d : Intensidad que circula por el diodo. | v_v : velocidad del viento. |
| I_r : Intensidad de saturación inversa del diodo. | D_v : Dirección del viento. |
| I_{ph} : Intensidad fotogenerada. | C_m : Características térmicas y ópticas |
| J_{sc} : Densidad de corriente de cortocircuito. | TONC: Temperatura de operación |
| α_{sc} : Factor de temperatura. | nominal de la célula. |
| E: Radiación incidente. | T_{sp} : Temperatura entrada agua al |
| q: Carga del electrón. | electrolizador |
| γ : Factor de forma. | $P_{útil}$: Potencia útil. |
| T_c : Temperatura de la célula solar. | $\eta_{acoplamiento}$: Rendimiento de |
| k: Constante de Boltzman. | acoplamiento. |
| ε_G : Factor de "bandgap" o brecha energética. | $\eta_{energético}$: Rendimiento energético. |
| a: Actividad de especies. | PCS: Poder calorífico superior. |
| m: Factor de idealidad del diodo. | \dot{n}_{H_2} : Caudal de hidrógeno. |
| V_t : Voltaje térmico. | |
| PMP: Punto de máxima potencia. | |
| P_{PMP} : Potencia en el punto de máxima potencia. | |
| I_{PMP} : Intensidad en el punto de máxima potencia. | |
| V_{PMP} : Tensión en el punto de máxima potencia. | |
| I_{cc} : Intensidad de cortocircuito. | |
| U_{ca} : Tensión a circuito abierto. | |
| FF: Factor de forma. | |
| I_g : Intensidad generada por el generador. | |
| I_m : Intensidad del módulo fotovoltaico. | |
| V_g : Tensión generada por el generador. | |
| V_m : Tensión del módulo fotovoltaico. | |
| N_s : Número de paneles fotovoltaicos en serie. | |



Resumen

El presente estudio consiste en proporcionar una visión de un sistema para producir hidrógeno mediante un electrolizador alimentado por energía solar fotovoltaica.

Se parte de tener una instalación fotovoltaica con 250 módulos fotovoltaicos, los cuales tendremos que proporcionar una configuración óptima de paneles en serie y en paralelo para obtener el rendimiento máximo. Así podemos proporcionar una configuración base a partir de los parámetros de referencia de la ecuación característica de los módulos fotovoltaicos.

Una vez que se obtiene una configuración de referencia de la instalación fotovoltaica, se va a realizar un análisis de sensibilidad, siempre desde el punto de vista de diseño, al acoplarse la instalación fotovoltaica con el electrolizador. Este análisis va a consistir en variar los parámetros de referencia de las ecuaciones características de los módulos fotovoltaicos y del electrolizador y así poder comprobar la influencia que tiene cada parámetro en el sistema completo.



1. Introducción

Es algo conocido que la manera que se tiene de obtener energía eléctrica es “insuficiente” desde el punto de vista del crecimiento mundial y de sus necesidades. Pero el hecho de que se contamine demasiado para obtener dicha energía es más importante aún, debido a los efectos que produce sobre nuestro planeta.

Las emisiones causadas por la combustión de los combustibles fósiles son nocivas para la salud y para el medio ambiente, y el dióxido de carbono que producen es el mayor responsable del efecto invernadero. De ahí surge la necesidad de reimpulsar el uso de fuentes de energía alternativas y de estrategias de ahorro energético, que además permitan un desarrollo sostenible y amigable con el medio ambiente.

Por tanto, la situación energética actual evidencia la falta de un modelo energético sostenible, ya que gran parte del consumo energético mundial proviene de fuentes de energía no renovables (principalmente petróleo, gas natural o carbón).

La gráfica siguiente ilustra el reparto que hubo entre los diversos combustibles en 2013 expresada en TWh, así como el porcentaje sobre el total que representa cada una de ellas según el combustible de precedencia:

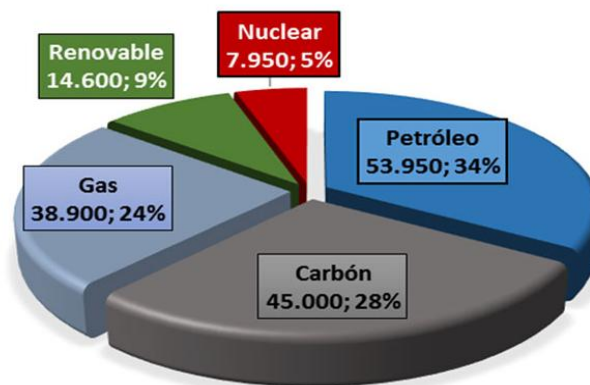


Figura 1: Reparto entre diversos combustibles en 2013

Para evitar el problema de la contaminación, una de las mejores alternativas es la obtención de energía a través de fuentes renovables y poco contaminantes como son las placas fotovoltaicas y la utilización del hidrógeno (ya sea como combustible directo en motores de combustión o como materia principal en las pilas de combustible).

El hidrógeno es el elemento más simple y más abundante del universo. El vector energético hidrógeno, que es como se conoce a estas formas intermedias de energía pues permite transportarla y convertirla después en otras formas de energía, producido a partir de energías renovables, está adquiriendo cada vez más protagonismo con respecto a un futuro basado en el desarrollo sostenible y se plantea para sustituir la dependencia actual de los combustibles sólidos por una fuente renovable.



Producir hidrógeno a partir de energía solar se presenta como una manera adecuada de almacenar, en forma de energía química, la energía procedente del sol. A partir del hidrógeno se obtiene energía eléctrica mediante una reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno, y por lo tanto se tiene una emisión de productos contaminantes nula. Con ello, se consigue subsanar uno de los principales obstáculos para el aprovechamiento de la energía solar, su carácter intermitente, ya que, aunque existen métodos de almacenamiento de dicha energía, todos tienen un rendimiento muy bajo.

Este sistema está compuesto por un generador fotovoltaico, un electrolizador y un equipo auxiliar. El acoplamiento entre los módulos fotovoltaicos y el electrolizador sigue siendo un reto porque la energía a la salida del generador fotovoltaico depende de muchos factores como la condición climática.



Figura 2: Instalación fotovoltaica



2. Instalación fotovoltaica

2.1. La célula solar

La célula solar es el dispositivo que transforma la radiación solar en energía eléctrica. El proceso por el cual se realiza esta conversión se denomina efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico puede producirse con elementos sólidos, líquidos o gases.

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el científico francés Henri Becquerel. Las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880, sin embargo, hasta 1950 no se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica.

El principio de funcionamiento, de forma simplificada, puede explicarse de la siguiente forma: el impacto de los fotones que provienen de la radiación solar es absorbido por el material semiconductor, y los electrones son golpeados por el fotón obteniendo la energía necesaria para salir de su banda correspondiente y circular libremente produciendo electricidad. Al mismo tiempo se van creando huecos (cargas positivas virtuales), que vayan fluyendo en el sentido contrario a los electrones. De esta manera, al final se consigue un voltaje constante entre los bornes del panel solar.

Este tipo de paneles producen electricidad en corriente continua y aunque su efectividad depende tanto de su orientación hacia el sol como de su inclinación con respecto a la horizontal, se suelen montar instalaciones de paneles con orientación e inclinación fija, por ahorros en mantenimiento. Tanto la inclinación como la orientación, al sur, se fija dependiendo de la latitud y tratando de optimizarla al máximo usando las recomendaciones de la norma ISO correspondiente.

Hay diferentes tipos de células solares en cuanto al proceso de fabricación, rendimiento y precio se refiere. Para la fabricación de células solares pueden utilizarse varios materiales, como el silicio, el germanio y el selenio. Las células de silicio son las más utilizadas y dependiendo de su proceso de fabricación pueden clasificarse en células de silicio monocristalino, células de silicio policristalino y células de silicio amorfo:

- Células de silicio monocristalino: Son células formadas por un único tipo de cristal (Silicio puro dopado con Boro) donde la estructura atómica del material es uniforme, ya que su estructura completa ha estado desarrollada por un único cristal. El silicio es uno de los materiales más abundantes de la Tierra pero no se encuentra en estado puro. Por tanto, tiene un coste elevado en el proceso de fabricación eliminar determinados elementos para formar un monocristalino, lo que se invierte mucho tiempo y energía, además, no se pueden fabricar grandes cantidades para abaratar el coste de la producción. No obstante, son los más utilizados en la actualidad ya que consiguen buenos rendimientos. La máxima eficiencia hoy en día para células de silicio monocristalino es del orden del 14%.



- Células de silicio policristalino: Son aquellas células obtenidas a partir de procesos que no necesitan un control exhaustivo de la temperatura en la solidificación del material de silicio, ni un crecimiento controlado de su red cristalina. Se les denomina policristalina por la solidificación del material, no en un único cristal, sino en múltiples. Una de las ventajas en la fabricación de este tipo de células es la posibilidad de producirlas directamente en forma cuadrada, con lo que facilita la fabricación de paneles solares compactos sin mecanizaciones de la célula posterior. Sin embargo tienen el problema de que no duran tanto tiempo como las de silicio monocristalino. Para módulos de células de silicio policristalino la eficiencia máxima a día de hoy es del orden del 13%.
- Células de silicio amorfo: Los sólidos amorfos, como el vidrio común, son materiales en los que los átomos no están situados en ningún orden especial, no forman estructuras cristalinas y contienen una gran variedad de defectos en la estructura y en los enlaces. Por lo tanto, las células amorfas no poseen una estructura definida y presenta muchos defectos donde los electrones se recombinan con vacíos en lugar de contribuir a la corriente generada. Son las células más económicas, menos duraderas y con rendimientos más bajos, del orden del 8%.

Las células solares de nuestros módulos fotovoltaicos a estudios serán **células de silicio policristalino** como se detallará en la página 27.

La estructura simplificada de una célula fotovoltaica se muestra en la siguiente figura y en ella podemos apreciar los principales elementos o secciones que la conforman:

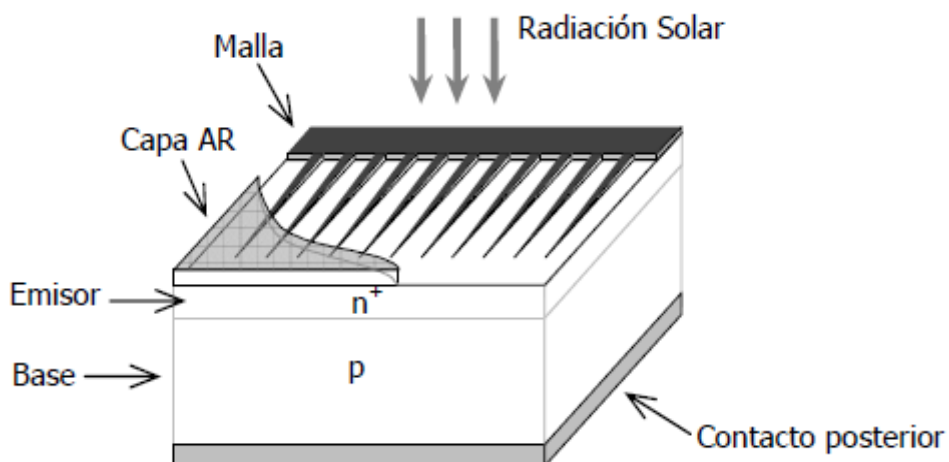


Figura 3: Estructura simplificada de una célula fotovoltaica de unión p-n



Desde el punto de vista de los fotones incidentes, encontramos por este orden:

- Una capa antirreflexiva (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. El espesor y el índice de refracción de esta capa (puede ser una capa compuesta de varias) se diseñan de forma que la reflectancia sea mínima a cierta longitud de onda y en un intervalo lo más amplio posible del espectro. Además de estas capas, muchas células presentan superficies dotadas de surcos, micro-pirámides y otras texturas creadas para reducir aún más las pérdidas por reflexión.
- Una malla de metalización, representada en forma de peine en la figura, pero que puede presentar formas diversas. El diseño de esta malla de metalización es crítico puesto que debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo. Su parámetro más característico es el *factor de sombra*, F_s , que mide la cantidad de superficie ocupada por los dedos metálicos respecto al área total del dispositivo.
- Las capas activas del material semiconductor, en el que distinguimos entre las dos regiones que forman la unión p-n (denominadas emisor y base). Habitualmente, estas capas activas aparecen depositadas o crecidas sobre un sustrato más grueso que confiere mayor resistencia mecánica al conjunto. Además del tipo y la calidad del semiconductor empleados, el espesor de las capas (emisor y base) y la densidad o concentración de impurezas influyen notablemente en el rendimiento final del dispositivo.
- El contacto metálico posterior, que suele realizarse metalizando toda la superficie del dispositivo cuando no existe el requisito de que ésta reciba luz por su parte posterior.

A partir de esta estructura básica, se han introducido en la estructura de la célula numerosas modificaciones e innovaciones con el fin de conseguir mayores eficiencias de conversión. Por ejemplo, como en el caso de algunas células de concentración o algunas realizadas con tecnologías de lámina delgada, dispositivos más sofisticados puede presentar más de una unión en su estructura (dispositivos *tándem* o *multiunión*), o una o varias uniones p-n formadas por distintos materiales semiconductores (dispositivos de *heterounión*). Aparecen además capas adicionales para mejorar el crecimiento de las secciones activas sobre un sustrato, acoplar constantes de red entre distintos materiales, permitir el crecimiento de unas células sobre otras, transferir portadores de carga de una a otra sección sin pérdidas, etc.

2.2. Ecuación característica del módulo fotovoltaico

El circuito equivalente de una célula solar ideal es una fuente de corriente en paralelo con un diodo. En una célula solar real hay que tener en cuenta además, por una parte, la resistencia de la zona neutra del semiconductor, por lo que hay que añadir una resistencia en serie R_s al circuito equivalente y, por otra parte, las posibles pérdidas en la barrera del diodo, que dan lugar a un efecto similar al que tendría una resistencia en paralelo R_{sh} con el diodo.

El esquema resultante equivalente de una célula fotovoltaica es el representado a continuación:

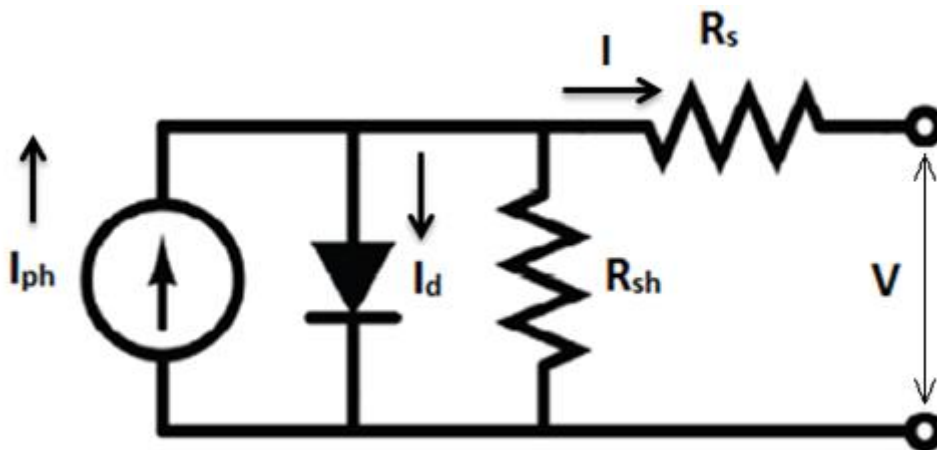


Figura 4: Esquema resultante equivalente

Se compone de un diodo conectado en paralelo a una fuente de corriente. Esta fuente de intensidad proporciona corriente al circuito a través de la resistencia en paralelo R_{sh} que hace que todo el voltaje se concentre en los bornes de la placa. La resistencia en serie R_s representa las pequeñas pérdidas que se producen en la generación. Normalmente la resistencia en serie es muy pequeña y la resistencia en paralelo de muy alto valor.

Cuando se ilumina un dispositivo como el de la figura 3 mientras está conectado a una carga externa, éste funciona como generador de energía y exhibe unos valores de corriente y tensión que son variables en función de las condiciones de operación (temperatura, irradiancia) y del punto de trabajo que impone la carga. La curva característica de la célula solar, detallada más adelante, responde a una ecuación ideal conocida como el modelo de una exponencial de la célula. Esta ecuación está basada en considerar como válido el *principio de superposición*, según el cual, la corriente de la célula ideal resulta del balance de la corriente producida por la luz incidente y la correspondiente al diodo de unión p-n que forma su núcleo:

$$I = I_{ph} - I_D$$

donde I representa la corriente de salida del módulo fotovoltaico; I_{ph} representa la corriente fotogenerada e I_D representa la corriente que circula por el diodo.



La corriente fotogenerada I_{ph} se determina con la siguiente expresión:

$$I_{ph} = \text{Área} \cdot \left(\frac{J_{sc} \cdot E}{1000} + \alpha_{J_{sc}} \cdot (T - 300) \right)$$

Esta corriente I_{ph} es función de las dimensiones del módulo (área) en cm^2 , de la densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} en A/cm^2 , de la temperatura de trabajo T en Kelvin, de un factor de temperatura $\alpha_{J_{sc}}$ en $\text{A}/^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ y de la irradiancia que incide sobre ella E en W/cm^2 .

La corriente que circula por el diodo I_d depende de los siguientes factores:

$$I_d = I_r \cdot \left(\exp \frac{q \cdot V}{\gamma \cdot k \cdot T_c} - 1 \right)$$

donde I_r es la corriente de saturación del diodo, q es la carga del electrón $1.602 \cdot 10^{-19}$ C, k es la constante de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K, γ es un factor de forma y T_c es la temperatura de la célula. La corriente de saturación inversa del diodo tiene la siguiente expresión:

$$I_r = D \cdot T_c^3 \cdot \exp \left(\frac{q \cdot \varepsilon_G}{A \cdot k \cdot T_c} \right)$$

donde D es el factor de difusión del diodo, prácticamente constante y ε_G es el factor de “bandgap” o brecha energética (1.12 eV para el Si y 1.35 eV para GaAs eV).

Existen pues diversos mecanismos de pérdidas que son importantes conocer y controlar en la medida de lo posible. Además de los procesos de recombinación, una de las principales fuentes de pérdidas se debe a la existencia de la resistencia en serie R_s en el dispositivo. Esta resistencia tiene distintas contribuciones, presenta un carácter distribuido en el dispositivo y, además, no siempre mantiene un valor constante. En primer lugar, el propio material semiconductor ofrece una cierta resistencia al paso de la corriente, por lo que lo ideal sería fabricar células muy delgadas (pero sin que esto suponga reducir la capacidad de absorción, evidentemente). La base y el emisor de la célula suelen presentar distintos valores de R_s debido a las direcciones en que fluyen los portadores y las distintas concentraciones de impurezas. Los contactos entre metal y semiconductor también introducen caídas resistivas, por lo que se tiende a dopar en mayor proporción las zonas de contacto. Y finalmente, la propia malla de metalización frontal es uno de los principales contribuyentes. Una malla de metalización excesivamente fina (pequeña sección de contactor) introduce caídas resistivas grandes aunque permite una mejor captación de radiación. Por el contrario, reducir su resistencia en serie implica utilizar dedos de metalización más gruesos a costa de aumentar el factor de sombra y reducir la eficiencia de la célula. De ahí lo importante de su diseño.

Por otro lado, existen una serie de fugas de corriente adicionales que pueden producirse por diversas causas [Araújo, 1995] (imperfecciones de la unión p-n o defectos en la estructura cristalina como dislocaciones, fronteras de grano, etc. Por conducción por la superficie de los bordes de la célula o por pequeños cortocircuitos locales). Estas fugas de corriente suelen



caracterizarse como una resistencia en paralelo R_p con el dispositivo. Sin embargo, esta resistencia en paralelo suele tener un valor equivalente muy elevado y no tiene apenas importancia en el funcionamiento normal de muchos tipos de células como se demostrará en el análisis de sensibilidad.

La incorporación de todos estos efectos mediante elementos discretos de un circuito (resistencias) hace que podamos representar el circuito equivalente de una célula fotovoltaica, figura 4, y que podamos introducir una ecuación característica real de la célula que incorpore las pérdidas de corriente asociadas, en la forma:

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left(\exp \frac{V+I \cdot R_s}{a} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

donde I representa la corriente de salida del módulo fotovoltaico; V representa la tensión de salida del módulo fotovoltaico; I_{ph} representa la corriente fotogenerada de cortocircuito; I_r representa la corriente de saturación inversa del diodo; a representa la actividad de especies; R_s representa la resistencia en serie de la célula solar y R_{sh} representa la resistencia en paralelo de la célula solar.

La actividad de especies, a , se representaría en función del factor de idealidad del diodo m y en función del voltaje térmico V_t :

$$a = m \cdot V_t$$

$$V_t = K \cdot T/q$$

El comportamiento eléctrico del módulo fotovoltaico es similar al de la célula fotovoltaica. Un módulo fotovoltaico o panel solar es una asociación en serie y en paralelo de células solares. El objetivo de agrupar las células en un módulo es hacer asociaciones protegidas y vinculadas al exterior con elementos estructurales y electrónicos comunes.

Los parámetros de la ecuación característica de nuestro módulo fotovoltaico se encuentran en condiciones estándar. Estas condiciones estándar son las siguientes:

- Nivel de irradiancia $E = 1000 \text{ W/m}^2$.
- Temperatura del módulo fotovoltaico de 25° , con una tolerancia de $\pm 2^\circ$.
- Espectro de radiación definido (según norma IEC 60904-3) con masa de aire, $AM = 1.5$.



Por lo tanto, los parámetros de nuestro módulo fotovoltaico a estudio en estas condiciones estándar son los siguientes:

| Parámetros del módulo fotovoltaico en condiciones estándar | |
|--|----------------------------|
| Símbolo | Valor |
| I_{ph} | 5.341 A |
| I_r | $1.03819 \cdot 10^{-17}$ A |
| a | 0.116 |
| R_s | 0.0822 Ω |
| R_{sh} | 10000 Ω |

Estos parámetros son, además, los que vamos a estudiar en el análisis de sensibilidad.

2.3. Modelado de la curva característica del módulo fotovoltaico

La representación más útil del comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico la proporciona su curva característica. Ésta contiene los posibles puntos de trabajo en intensidad y tensión para un determinado valor de la radiación incidente y la temperatura del módulo.

La curva característica dependiendo de la radiación incidente sobre el módulo fotovoltaico está representada en la siguiente gráfica:

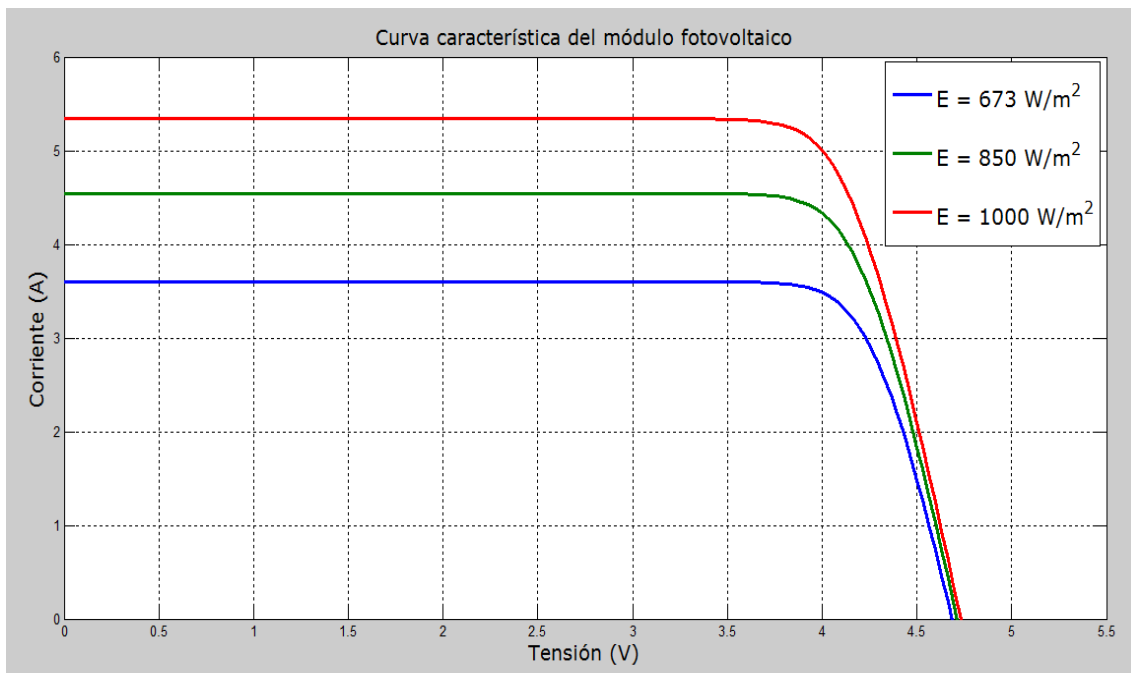


Figura 5: Curva característica del módulo fotovoltaico dependiendo de la radiación solar



La curva característica del módulo fotovoltaico viene determinada por la posición de tres puntos principalmente:

- Punto de máxima potencia, PMP: es el punto de la curva donde se produce la máxima cantidad de potencia del módulo. Viene dado para una intensidad I_{PMP} y una tensión U_{PMP} . En condiciones estándar, a la máxima potencia se le denomina “potencia pico” y se mide en vatios pico, Wp. La potencia pico da una idea de la máxima potencia que se puede extraer del módulo fotovoltaico.

$$P_{PMP} = I_{PMP} \cdot V_{PMP}$$

- Intensidad de cortocircuito, I_{cc} : es la intensidad que genera el módulo cuando la tensión a la que se le somete es nula. Suele tener un valor entre un 5% y un 15% mayor que la intensidad en el punto de máxima potencia.

$$I_{cc} \equiv I(V=0) = I_{ph}$$

- Tensión de circuito abierto, U_{ca} : es la tensión a la cual no se produce intensidad en el módulo.

A las condiciones estándar, la curva característica de nuestro modelo fotovoltaico queda representada en la siguiente gráfica:

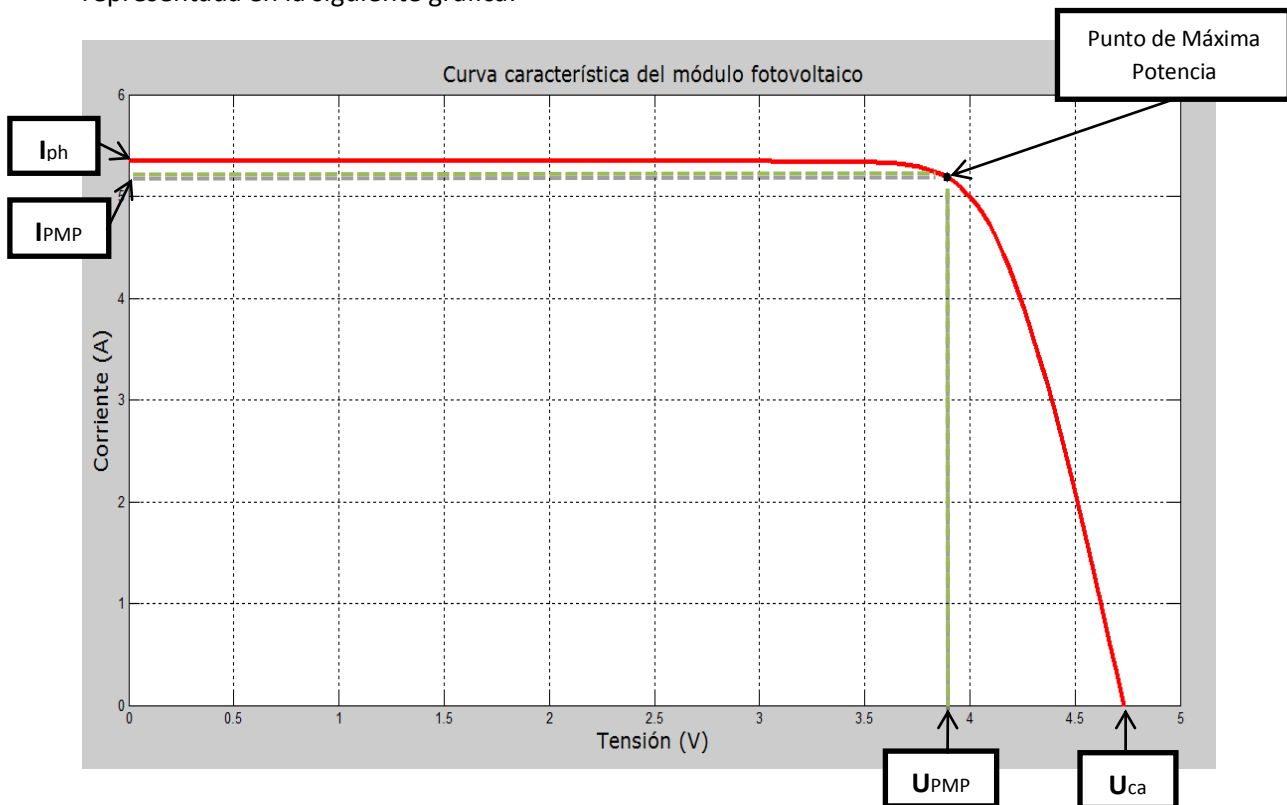


Figura 6: Curva característica de nuestro módulo fotovoltaico



Por tanto, tenemos los siguientes valores de los tres parámetros definidos anteriormente:

- $I_{PMP} = 3.891 \text{ A}$, $U_{PMP} = 5.189 \text{ V} \Rightarrow P_{PMP} = 20.1904 \text{ W}$
- $I_{ph} = 5.341 \text{ A}$
- $U_{ca} = 4.729 \text{ V}$

Un parámetro importante de la curva característica es el factor de forma, FF. El factor de forma mide lo cuadrada que es la curva característica del módulo fotovoltaico. Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste mejor cuánto más alto sea su factor de forma. Puede venir expresado en tanto por ciento o en tanto por 1, siendo el valor 100% el que correspondería a un hipotético perfil cuadrado, no real. Se define como el cociente entre la máxima potencia en condiciones estándar y el producto de la intensidad de cortocircuito y la tensión de circuito abierto en condiciones estándar:

$$FF = \frac{P_{PMP}}{I_{ph} \cdot U_{ca}}$$

Nuestro panel solar tiene un factor de forma de valor, **FF = 0.8**.

La eficiencia del módulo fotovoltaico, η , es la relación directa entre la potencia máxima que puede ofrecer el panel solar y la potencia máxima que en realidad recibe el panel solar en esas condiciones. Caracteriza la calidad del módulo como dispositivo transformador de energía solar en energía eléctrica. Se define como el cociente entre la máxima potencia que produce el módulo y la radiación solar que incide sobre él, donde A es el área del panel medida en m^2 y E es la irradiancia incidente medida en W/m^2 .

$$\eta = \frac{P_{PMP}}{A \cdot E}$$

Para un área de 0.15 m^2 , nuestro panel tiene una efectividad **$\eta = 0.135$** . Al tratarse de un panel de silicio policristalino, este resultado es bastante coherente.



2.4. Asociación en serie y paralelo de módulos fotovoltaicos

El grupo de módulos fotovoltaicos o paneles interconectados entre sí se denomina generador fotovoltaico o campo solar, cuyo fin es obtener una determinada cantidad de energía eléctrica.



Figura 7: Módulo fotovoltaico



Figura 8: Campo solar

Para el caso de un generador fotovoltaico, su característica eléctrica dependerá del número de paneles en serie y paralelo que posea.

- **Conexión en serie**

Si suponemos que todas los paneles constituyentes del generador fotovoltaico fuesen iguales, la intensidad generada por el generador, I_g , sería igual a la intensidad de un módulo, I_m . Sin embargo, la tensión generada por el generador, V_g , sería igual al voltaje de un módulo, V_m , multiplicada por el número de paneles en serie, N_s :

$$I_g = I_m$$

$$V_g = V_m \cdot N_s$$

Este tipo de terminal se basa en conectar el terminal positivo de un panel con el negativo del siguiente, de este modo y sucesivamente hasta acabar la serie completa. La salida será entre el terminal positivo del último panel conectado y el negativo del primer. En la siguiente figura se puede comprobar la conexión de dos módulos en serie, con dos cajas de conexión cada uno:

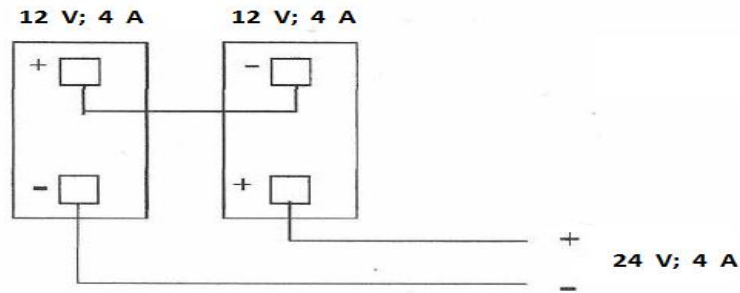


Figura 9: Conexión en serie de dos módulos fotovoltaicos

En la conexión en serie, la intensidad eléctrica que genera un módulo fotovoltaico ha de atravesar el resto de módulos, de manera que el aumento de potencia se basa en mantener la intensidad que puede dar un módulo y la suma de voltaje de los módulos conectados.

- **Conexión en paralelo**

Suponiendo también que los módulos constituyentes del generador fotovoltaico fuesen idénticas, la corriente generada por el generador, I_g , sería igual a la corriente de un módulo, I_m , multiplicado por el número de paneles en paralelo, N_p . No obstante, la tensión generada por el generador, V_g , sería igual a la tensión de un módulo, V_m .

$$I_g = I_m \cdot N_p$$

$$V_g = V_m$$

Este tipo de conexión se basa en conectar juntos los terminales positivos de todos los módulos y, de otro lado, todos los terminales negativos. La salida será en este caso el terminal positivo común y el negativo común también. En el siguiente ejemplo se puede comprobar la conexión en paralelo de dos módulos, con dos cajas de conexión cada uno:

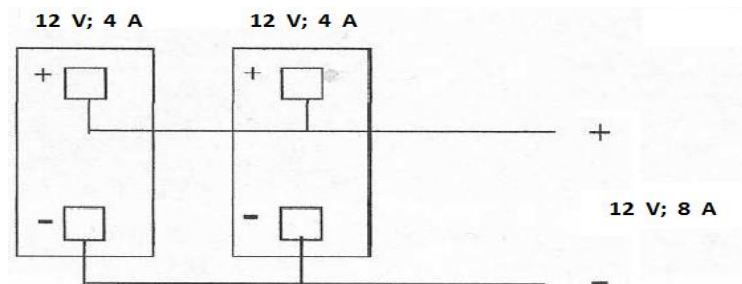


Figura 10: Conexión en paralelo de dos módulos fotovoltaicos

En la conexión en paralelo, la intensidad eléctrica que genera el módulo fotovoltaico se añade a las que generan los otros módulos, de forma que el aumento de potencia se basa en mantener el voltaje que pueda dar un módulo y la suma de intensidades que generan los módulos conectados.



A menudo, en las instalaciones solares, hace falta hacer conexiones en serie y en paralelo porque se quiere trabajar a un voltaje determinado y se tiene un número concreto de módulos. En estos casos, se conecta en serie el número de módulos (conectados en paralelo) que hagan falta para conseguir el voltaje de funcionamiento.

El conexionado eléctrico de módulos solares en serie y en paralelo está representado en la siguiente figura:

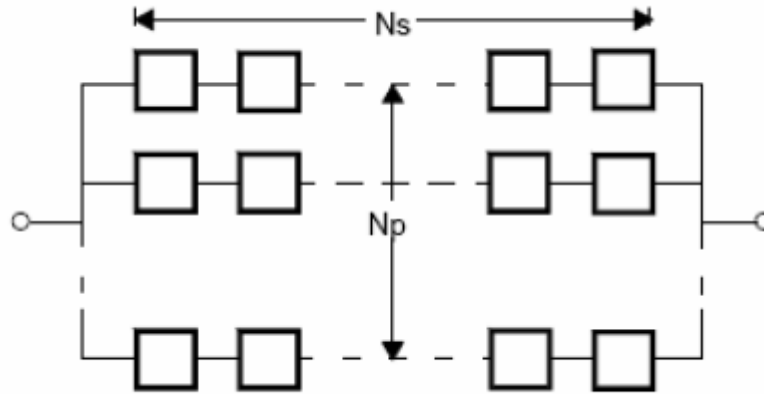


Figura 11: Conexionado en serie y paralelo de módulos fotovoltaicos

La ecuación característica del generador fotovoltaico tiene un comportamiento similar al que representa la curva característica de un módulo fotovoltaico. El comportamiento eléctrico para el generador fotovoltaico formado por paneles iguales tiene la siguiente representación:

$$I = N_p \cdot \left(I_{ph} - I_r \cdot \left(\exp\left(\frac{\frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p}}{a} \right) - 1 \right) - \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p}}{R_{sh}} \right)$$

En la página 32 se mostrará la configuración adecuada de paneles en serie y paralelo de nuestro estudio.

La temperatura de un módulo fotovoltaico T_m viene determinada por la irradiancia global incidente E , la temperatura equivalente de cielo T_{cielo} , la velocidad del viento v_v , la dirección del viento D_v , y las características térmicas y ópticas de los materiales que lo constituyen C_m :

$$T_m = f(E, T_{cielo}, v_v, D_v, C_m)$$

La temperatura del módulo fotovoltaico a estudio es de **298 K**, como se ha indicado anteriormente.

Se ha supuesto, por simplicidad, que los módulos fotovoltaicos están formados por células con características de funcionamiento idénticas. Esto no es así en la realidad, ya que las características de las células y los módulos presentan cierto grado de dispersión por las irregularidades en el desarrollo de los procesos de fabricación, aunque asociando las células se minimizan los efectos.



Las condiciones de operación también se suelen suponer constantes para todas las células y módulos. En grandes instalaciones pueden llegar a ser muy distintas entre los módulos que las conforman. En campos solares de gran extensión, las nubes o las construcciones colindantes pueden proyectar sombra en determinados momentos sobre algunos módulos y sobre otros no, entonces cada cual opera bajo condiciones distintas de irradiancia y temperatura. En estas ocasiones puede ocurrir que las células afectadas inviertan su polaridad, viéndose sometidas a la descarga de potencia procedente del conjunto de las células iluminadas. Si este efecto fuese importante, la temperatura de las células que soportan la carga aumentaría considerablemente, generando puntos calientes que podría llegar incluso a destruirlas. Los diodos pueden evitar este problema.

2.4.1. Ventajas e inconvenientes de las instalaciones fotovoltaicas.

Las instalaciones de generación de energía eléctrica fotovoltaica presentan las siguientes ventajas:

- Son sistemas modulares, lo que facilita su flexibilidad para adaptarse a diferentes tipos de aplicaciones, y su instalación es relativamente sencilla.
- Tienen una larga duración. La vida de una planta fotovoltaica, la define la vida útil de sus componentes, principalmente los módulos fotovoltaicos. Los módulos tienen una vida esperada de más de 40 años.
- No requieren apenas mantenimiento. El mantenimiento es escaso, y no solo es conveniente hacerlo en las horas nocturnas para tener una disponibilidad diurna máxima, sino que es necesario para evitar que existan tensiones en los generadores.
- Ofrecen una elevada fiabilidad. Las instalaciones fotovoltaicas son de una alta fiabilidad y disponibilidad operativa.
- No producen ningún tipo de contaminación ambiental, por lo que contribuyen a la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) al utilizarse como alternativa a otros sistemas generadores de energía eléctrica más contaminantes.
- Tienen un funcionamiento silencioso.

Sin embargo, para conseguir su plena incorporación a los hábitos de la sociedad, como una solución complementaria a los sistemas tradicionales de suministro eléctrico, es necesario superar ciertas barreras:

- A nivel económico, se deberá fomentar la reducción de los costes de fabricación y precio final de la instalación a partir de las innovaciones que se introduzcan en el sector y a las economías de escala generadas como consecuencia del aumento de la demanda y de los volúmenes de



producción. Del mismo modo, se deberán conseguir condiciones de financiación aceptables para abordar la inversión necesaria.

2.4.2. Criterio de selección de un módulo fotovoltaico

A la hora de comprar un módulo fotovoltaico se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Que esté homologado por organismos independientes. Además para un Código Técnico de la Edificación (CTE) que sea de clase II certificado.
- Garantías detalladas. Se valorará muy positivamente las garantías con avales.
- Relación $\text{€}/W_p$. Se debe especificar si es con cableado de interconexión de módulos incluido y sobre todo si se refiere a los W_p del catálogo o a los realmente comprados y medidos.
- Categoría de la compañía (recursos propios, experiencia demostrada, etc.).
- Menor tolerancia.
- Menor temperatura de operación nominal de la célula (TONC).
- Tensión de aislamiento adecuada (se recomienda 1000 V).
- Forma de producción, si es automática o manual.
- Degradación máxima garantizada.
- Si la empresa sólo ensambla células o además las produce.
- A igualdad de condiciones, es mejor el silicio monocristalino.
- Accesibilidad a la empresa.
- Calidad caja conectorado y de sus componentes.

2.5. Situación actual de la energía fotovoltaica en España

El desarrollo de la energía solar antes del año 2000 era muy escaso, y su venta a la red estaba fomentada mediante primas que cobraban los productores por cada kWh inyectado a la red sobre el precio del mercado. En 2004 la energía fotovoltaica representaba una parte muy pequeña del conjunto de las renovables, que en total suponían aproximadamente el 6.5% del consumo de energía primaria. Desde el año 2000, y con la aprobación del Plan de Fomento de Energías Renovables en 1999, la instalación de placas fotovoltaicas ha ido creciendo un 40% cada año. El objetivo es llegar a los 143000 KW instalados en 2010, cubrir al menos el 12% del consumo de energía primaria mediante renovables.

Entre 2004 y 2007, el consumo de energía a partir de renovables se incrementó en un 10%. Sin embargo, en términos relativos debido al mayor consumo de energía en este periodo, sólo se ha conseguido pasar de una aportación de las renovables del 6.5% al 7%, quedando por lo tanto un buen margen hasta el 12% planificado para 2010.



Durante el 2008 España se convirtió en el primer mercado fotovoltaico del mundo con más de 2500 MW instalados, superando con ello a Alemania, tradicional líder internacional en implantación de la energía solar. Sin embargo, a diferencia de lo que ha ocurrido en Alemania, el crecimiento en España no se ha producido de un modo sostenible y el Gobierno recortó su política de ayudas en el mes de Septiembre de 2010 al aprobar el Real Decreto 1578/2008.

De 2008 a 20013 España pasó de estar a la cabeza de Europa en el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas a situarse en la cola, según advierte el informe “Global Market Outlook for Solar Power”.

En 2014 se instalaron en España sistemas con capacidad de generar 22 MW de corriente continua, lo que sitúa a nuestro país muy lejos de la capacidad de producción de las naciones europeas punteras en el desarrollo de sistemas renovables. El motivo de esta caída es el borrador del Real decreto sobre autoconsumo propuesto por el Gobierno en septiembre de 2013, conocido como impuesto al sol, que ha paralizado las iniciativas individuales y asociativas en este sector. La versión revisada de este reglamento, que el Ministerio de Industria sacó a consulta, no sólo mantiene el llamado peaje de respaldo, que obliga al autoconsumidor a pagar un canon por cada kWh que produzca su instalación, sino que introduce nuevas tasas específicas para regular el uso de baterías como la Tesla Powerwall.

El crecimiento actual de las instalaciones solares fotovoltaicas está limitado por la falta de dos motivos principalmente. El principal motivo es la falta de financiación. Los bancos se lo piensan cada vez más antes de dar un crédito, ante la falta de liquidez. El segundo de los motivos es la especulación. Dada la congelación del mercado español, que supuso durante 2008 la mitad del mercado fotovoltaica internacional, la caída de la demanda ha provocado una correspondiente caída de los precios del material.

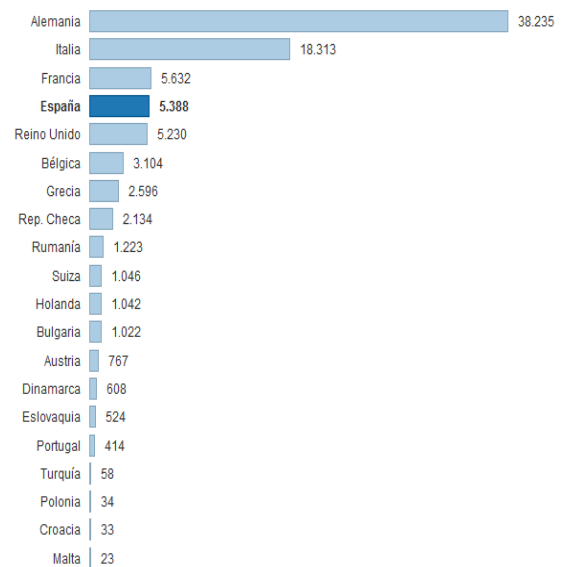
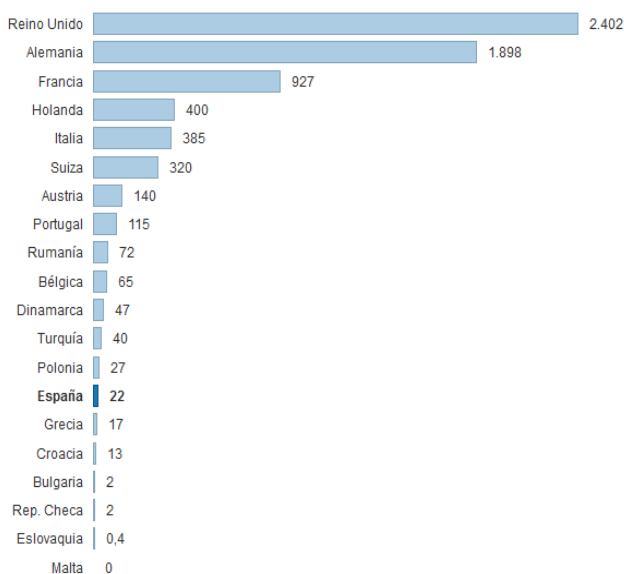


Figura 12: Potencia instalada en 2014 (MW de C. Cont.)

Figura 13: Potencia instalada acumulada (MW de CC)



3. Electrólisis

3.1. El hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico de número atómico 1. A temperatura ambiente es un gas diatómico inflamable, incoloro, sin olor y es el elemento químico más ligero (pesa catorce veces menos que el aire) y más abundante en el universo.

Aparece en multitud de sustancias, como por ejemplo el agua y los compuestos orgánicos, y es capaz de reaccionar con la mayoría de elementos.

En alta presión, como la que se produce en el núcleo de las estrellas gigantes de gas, las moléculas cambian su naturaleza y el hidrógeno se convierte en un líquido metálico. A muy baja presión, como la del espacio, el hidrógeno tiende a existir en átomos individuales, simplemente porque la probabilidad de que se combine es muy baja.

El hidrógeno tiene una función fundamental en el universo, ya que mediante la fusión estelar (combinación de átomos de hidrógeno del que resulta un átomo de Helio) proporciona grandes cantidades de energía. Este elemento tiene una electronegatividad intermedia (2,2) por lo que puede formar compuestos en los que sea el elemento con mayor o menor carácter metálico.

Tanto con los elementos metálicos de los grupos 1 y 2, como con los no metálicos de los grupos 15, 16 y 17 forma hidruros. Con los primeros está presente en forma de H^- mientras que en los segundos está presente como ión H^+ , por este motivo tienen carácter ácido.

Algunos compuestos binarios son amoníaco (NH_3), hidracina (N_2H_4), agua (H_2O), agua oxigenada (H_2O_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), etc.

Con el carbono (elemento del grupo 14) forma una inmensa cantidad de compuestos, los hidrocarburos y derivados que son objeto de estudio de la química orgánica.

En la siguiente figura se puede apreciar la estructura cristalina del hidrógeno:

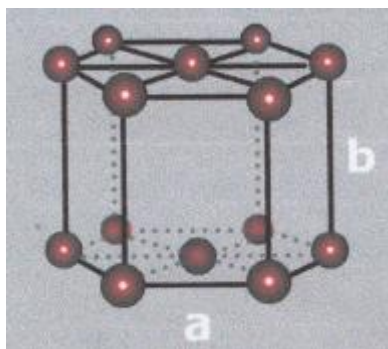


Figura 14: Estructura cristalina del hidrógeno



Las ventajas que presenta el hidrógeno respecto a otros combustibles son las siguientes:

- Muy buenas propiedades energéticas.
- Su poder calorífico es tres veces superior al de los combustibles fósiles.
- Posee un gran contenido energético por unidad de peso.
- Se encuentra presente en la naturaleza en el agua y en cantidades ilimitadas.
- Como resultado de su combustión, se obtiene vapor de agua. Por lo tanto, no llegaría a consumir reservas de agua ni perjudicaría el medio ambiente.

Los inconvenientes principales que tiene son:

- Tiene una temperatura de licuación extremadamente baja (-253°C).
- Baja energía por unidad de volumen como gas y como líquido.
- El transporte en estado gaseoso es menor eficiente que otros gases.
- Los depósitos de almacenaje deben ser grandes.
- Es extremadamente inflamable.

3.2. Obtención del hidrógeno por electrólisis

La electrólisis es un método de separación de los elementos que forman un compuesto aplicando electricidad. Se producen en primer lugar la descomposición en iones, seguido de diversos efectos o reacciones secundarias según los casos concretos.

La palabra electrólisis proviene de “electro” que hace referencia a la electricidad y “lisis” que significa división.

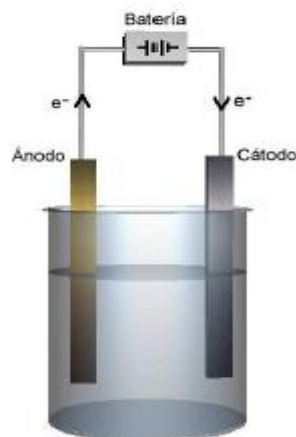


Figura 15: Diagrama simplificado del proceso de electrólisis



El proceso consiste en lo siguiente:

- Se funde o se disuelve el electrolito en un determinado disolvente, con el fin de que dicha sustancia se separe en iones (ionización).
- Se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica y sumergidos en la disolución. El electrodo conectado al polo negativo se conoce como cátodo, y al conectado al positivo como ánodo.
- Cada electrodo mantiene atraídos a los iones de carga opuesta. Así, los iones negativos o aniones son atraídos al ánodo, mientras que los iones positivos o cationes se desplazan hacia el cátodo.

La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos es aportada por la fuente de alimentación eléctrica. En los electrodos se produce una transferencia de electrones entre éstos y los iones, produciéndose nuevas sustancias. Los aniones ceden electrones al ánodo(+) y los cationes toman electrones del cátodo(-).

En definitiva, lo que ocurre es una reacción de oxidación-reducción, donde la fuente de alimentación eléctrica ha sido la encargada de aportar la energía necesaria. Si el agua no es destilada, la electrólisis no sólo separa el oxígeno y el hidrógeno, sino los demás componentes que estén presentes como sales, metales y algunos otros minerales.

Es importante tener en cuenta varios puntos:

- Nunca se deben juntar los electrodos, ya que la corriente eléctrica no va a hacer su proceso y la batería se va a sobrecalentar y se quemará.
- Se debe utilizar siempre corriente continua, nunca corriente alterna.
- La electrólisis del catión debe hacerse de tal manera que los dos gases desprendidos no entren en contacto, de lo contrario se juntarían de nuevo produciendo una mezcla peligrosamente explosiva.

La electrólisis no depende del calor, aunque se puede producir en un proceso electrolítico. Por lo tanto, la electrólisis no está sujeta a los límites termodinámicos de eficiencia, por lo que en un proceso electrolítico esta eficiencia puede estar próxima al 100%.



3.3. El electrolizador

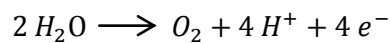
Para generar el hidrógeno utilizaremos un electrolizador. El electrolizador opera a la inversa que una pila de combustible. La electricidad proveniente del convertidor de tensión es utilizada para separar moléculas de agua, obteniendo hidrógeno y oxígeno.

Existen, principalmente, dos tipos diferentes de electrolizadores dependiendo del electrolito utilizado:

- Electrolizador tipo PEM (membrana de intercambio de protones):

En un electrolizador tipo PEM se utiliza un polímero como electrolito. Cuando se hace pasar la corriente eléctrica entre los electrodos, el agua reacciona en el ánodo liberando oxígeno e iones de hidrógeno cargados positivamente. Los electrones a través del circuito externo, y los iones a través de la membrana, fluyen hasta el cátodo, donde se combinan para formar el hidrógeno. Los PEM son compactos, pueden trabajar con presiones de varios cientos de bares, manejan densidades de corriente elevada y su diseño aumenta la vida útil de las membranas. La temperatura del proceso es entre 80 y 100°C.

La reacción en el ánodo sería:



Y en el cátodo:

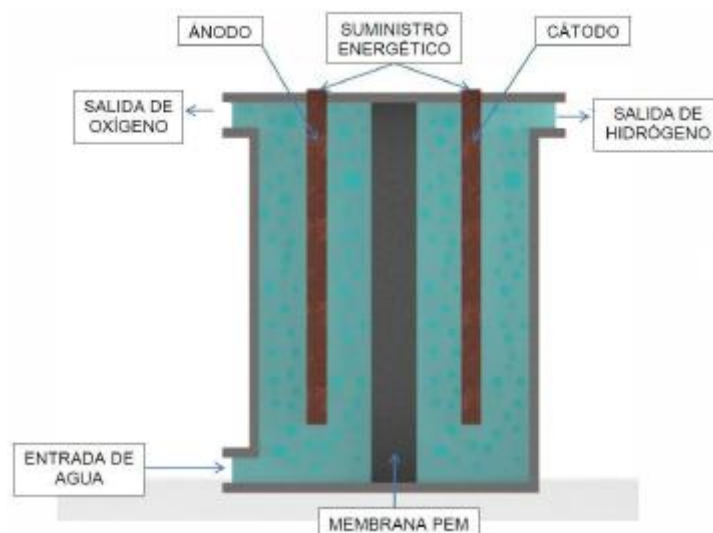
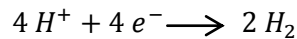


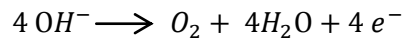
Figura 16: Esquema simplificado de un electrolizador PEM



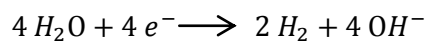
- Electrolizador tipo alcalino:

Los electrolizadores alcalinos son similares a los PEM pero como electrolito usan una solución alcalina, sea hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. El proceso es el mismo que en un PEM pero a una temperatura más alta (entre 100 y 150°C), y las reacciones en los electrodos difieren. Los electrolizadores alcalinos son más económicos y duraderos y pueden trabajar con presiones de hasta 25 bar.

En el ánodo la reacción es la siguiente:



Y en el cátodo:



El electrolizador que utilizaremos en nuestro estudio será un electrolizador tipo **PEM** como comentaremos en la página 28.

En cuanto al funcionamiento del electrolizador, primero se rellenará con agua mezclada con el residuo (pueden ser sacarosas, glicerinas, etc.). A continuación, se empieza a proporcionar tensión mediante los electrodos situados en el fondo del recipiente, los cuales están colocados en serie. Suele haber cuatro electrodos por electrolizador, los cuales pueden o no estar catalizados. Si lo están, esto ayudará al electrodo a que se produzcan las correspondientes reacciones químicas por las cuales obtendremos hidrógeno y otros gases, y según el tipo de soluto que se tenga se obtendrá una cosa u otra como pueden ser mezclas de hidrógeno, metano y otros muchos tipos de gases que todavía no se han conseguido separar, ya que el electrolizador se encuentra en fase de experimentación.

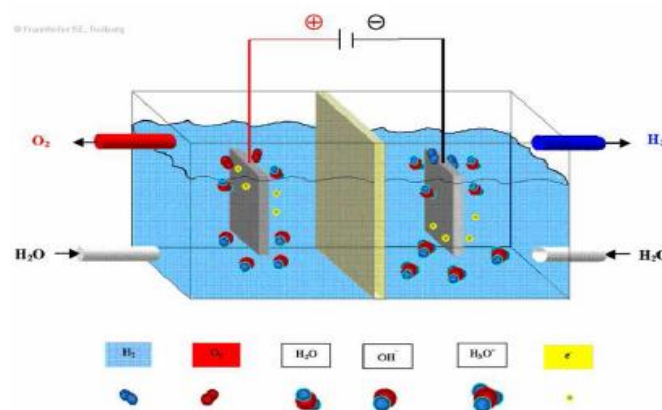


Figura 17: Principio de funcionamiento de un electrolizador alcalino



3.4. Modelado de la curva característica del electrolizador

El funcionamiento de un electrolizador puede ser descrita por una curva I-V que se obtiene por ajuste polinomial. Su estado de funcionamiento exacto depende de la energía suministrada.

La pila consta de 5 celdas electrolíticas cableadas en serie. La información detallada sobre este electrolizador se presentará en la página 28.

La resistencia del electrolizador puede ser tratada como un valor constante a cierta temperatura del agua de entrada. Con la temperatura del agua en aumento, la resistencia del electrolizador disminuye resultando en la reducción de pérdidas de energía eléctrica.

La ecuación para ajustar la curva I-V tiene las siguientes expresiones dependiendo de la temperatura del agua a la entrada del electrolizador:

$$I = 2.462 \cdot U - 19.35 \quad \text{para } T_{sp} = 289 \text{ K}$$

$$I = 2.712 \cdot U - 20.81 \quad \text{para } T_{sp} = 300 \text{ K}$$

$$I = 2.949 \cdot U - 22.29 \quad \text{para } T_{sp} = 308 \text{ K}$$

$$I = 3.381 \cdot U - 25.65 \quad \text{para } T_{sp} = 318 \text{ K}$$

En estas ecuaciones, I representa la corriente a través del electrolizador y U representa el voltaje que la instalación fotovoltaica suministra al electrolizador. Se puede comprobar mediante la ecuación como la relación entre I-V es lineal.

La curva I-V del electrolizador dependiendo de la temperatura de entrada del agua, T_{sp} , se muestra en la siguiente gráfica:

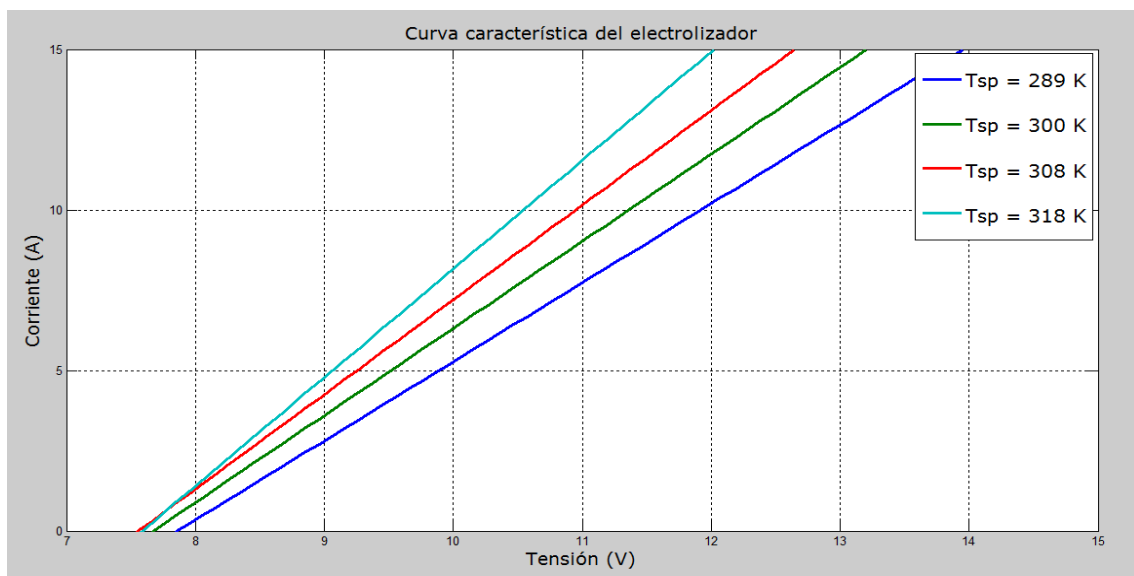


Figura 18: Curva I-V del electrolizador dependiendo de la temperatura de entrada del agua



Nuestro estudio está basado en una temperatura de entrada del agua de **308 K**, con lo que nos quedará la siguiente representación gráfica de la curva I-V del electrolizador:

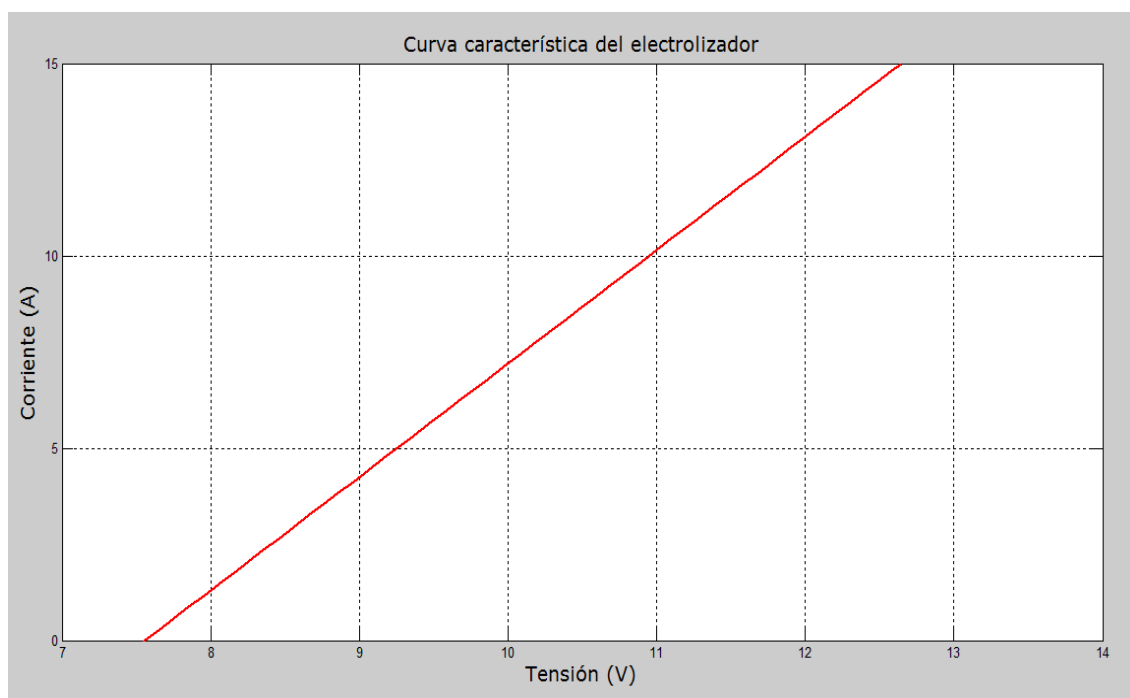


Figura 19: Curva I-V del electrolizador de nuestro estudio



4. Acoplamiento del generador fotovoltaico con el electrolizador

4.1. Especificaciones de los componentes del sistema

Este estudio se lleva a cabo para verificar el modelo del sistema de acoplamiento directo entre el generador fotovoltaico y el electrolizador. En la siguiente figura podemos apreciar el esquema del sistema completo:

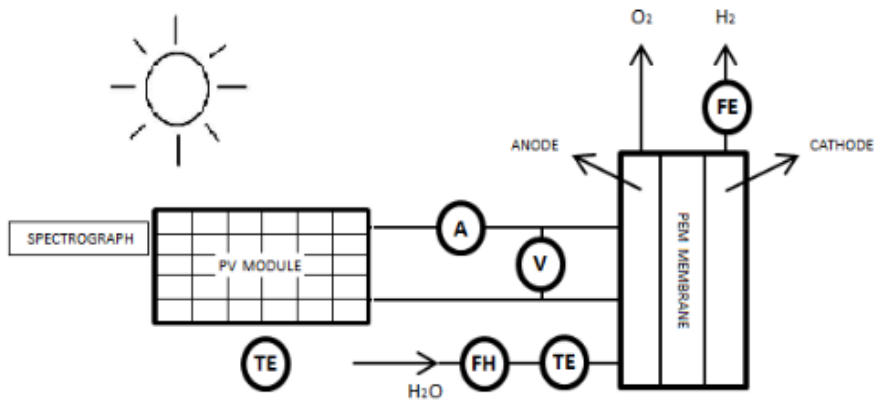


Figura 20: Diagrama de flujo del sistema de acoplamiento generador fotovoltaico-electrolizador

Componentes del sistema:

- El generador fotovoltaico.
- El electrolizador.
- 2 multímetros digitales, A y V.
- 1 calentador, FH.
- 2 medidores de temperatura, TE.
- 1 medidor de flujo de gas, FE.
- 1 espectrógrafo

Instalación del sistema:

- El generador fotovoltaico se conecta directamente al electrolizador a través de tuberías.
- Dos multímetros digitales se conectan al circuito para medir el voltaje e intensidad de entrada del electrolizador.



- Un calentador y un medidor de temperatura se instalan a la entrada del agua del electrolizador para controlar la temperatura del agua de la entrada.
- Otro medidor de temperatura se instala para medir la temperatura ambiente.
- Un medidor de flujo de gas se conecta a la salida del electrolizador para medir la velocidad del flujo del hidrógeno producido.
- El espectrógrafo fue instalado en la superficie paralela al panel fotovoltaico para medir la radiación del sol.

Cada módulo fotovoltaico consta de 4 células solares conectadas en paralelos y 6 células solares conectadas en serie, con lo que hace un total de 36 células por módulo. La célula fotovoltaica (4V1250 MA) está hecha de silicio policristalino, fabricada por Guangzhou Zhaotian Solar Energy Technology Co.,Ltd. En la siguiente tabla se muestran especificaciones del módulo fotovoltaico:

| Especificaciones del módulo fotovoltaico en condiciones estándar | | |
|--|----------|------------|
| Parámetros del módulo | Símbolo | Valor |
| Área efectiva de cada módulo | A | 0.15 m^2 |
| Potencia pico | P_m | 20 W |
| Tensión en potencia pico | V_m | 3.82 V |
| Intensidad en potencia pico | I_m | 5.235 A |
| Intensidad cortocircuito | I_{sc} | 5.43 A |
| Tensión a circuito abierto | V_{oc} | 4.78 V |

El electrolizador tipo PEM en este estudio consiste en una pila con cinco celdas conectadas en serie, que fue producido por el Instituto de Shandong de la Industria Química. Dado que el valor de la fuerza electromotriz reversible de cada célula es 1.2 V, el valor de la tensión de partida de este electrolizador es de más de 6 V. Las especificaciones del electrolizador se muestran en la siguiente tabla:



| Especificaciones del electrolizador tipo PEM | |
|--|--------------------|
| Parámetros | Valor |
| Máximo caudal de hidrógeno en condiciones normales | 500 ml/min |
| Presión de salida máxima | 4 atm |
| Temperatura de funcionamiento máxima | 333 K |
| Área del electrodo | 64 cm ² |
| Propiedad del electrodo | Ti |
| Propiedad de la membrana | Nafion 117 |
| Espesor de la membrana | 110 μm |

Los parámetros del sistema se midieron por los dispositivos de la siguiente manera:

- La tensión y la corriente de los módulos fotovoltaicos y el electrolizador se midieron utilizando los multímetros digitales con una precisión de 0.01 V y 0.01 A.
- La temperatura del agua suministrada al electrolizador se midió por el termopar PT100 con una precisión de 1 K.
- La velocidad de flujo de la producción de hidrógeno se midió utilizando un flujo de gas métrico (500SCCM) con una precisión de 0.1 ml/min y un rango de medición de 0-500 ml/min. Fue fabricado por Sailsors Instruments LTD., Beijing.
- El espectrógrafo (AvaSpec-2048-USB2) para medir la radiación solar fue fabricado por Beijing Avantes Company. Se fija en la estructura del módulo fotovoltaico y paralela a la superficie del módulo.
- El ambiente y la temperatura de operación del módulo fotovoltaico se midieron usando el termopar PT100.

4.2. Configuración óptima de paneles en serie y en paralelo de la instalación fotovoltaica

En condiciones estándar, el máximo caudal de hidrógeno del electrolizador es de 500 ml/min como indica la anterior, que en unidades de potencia son 150 W. Ya que este parámetro es muy bajo para nuestro estudio hemos decidido aumentarlo a 5000 W.

Como de cada módulo fotovoltaico se obtiene una potencia pico de 20 W, esta modificación implica que necesitamos un total de 250 paneles en la instalación fotovoltaica para llegar a esos 5 KW.



La curva característica del electrolizador también se verá afectada por el aumento del flujo de hidrógeno del electrolizador. Para que la curva característica sea correcta y podamos compararla con la instalación fotovoltaica es necesario multiplicar la ecuación por 5000 y dividirla por 150:

$$I = 98.3 \cdot U - 743, \quad \text{para } T_{sp} = 308 K$$

Para comprobar la configuración óptima de paneles en serie y paralelo de nuestro sistema en condiciones estándar, es necesario calcular la relación entre la potencia máxima que puede dar la instalación fotovoltaica y la potencia útil.

Elegiremos aquella configuración de paneles cuya relación entre potencia útil y potencia máxima sea la mayor de todas.

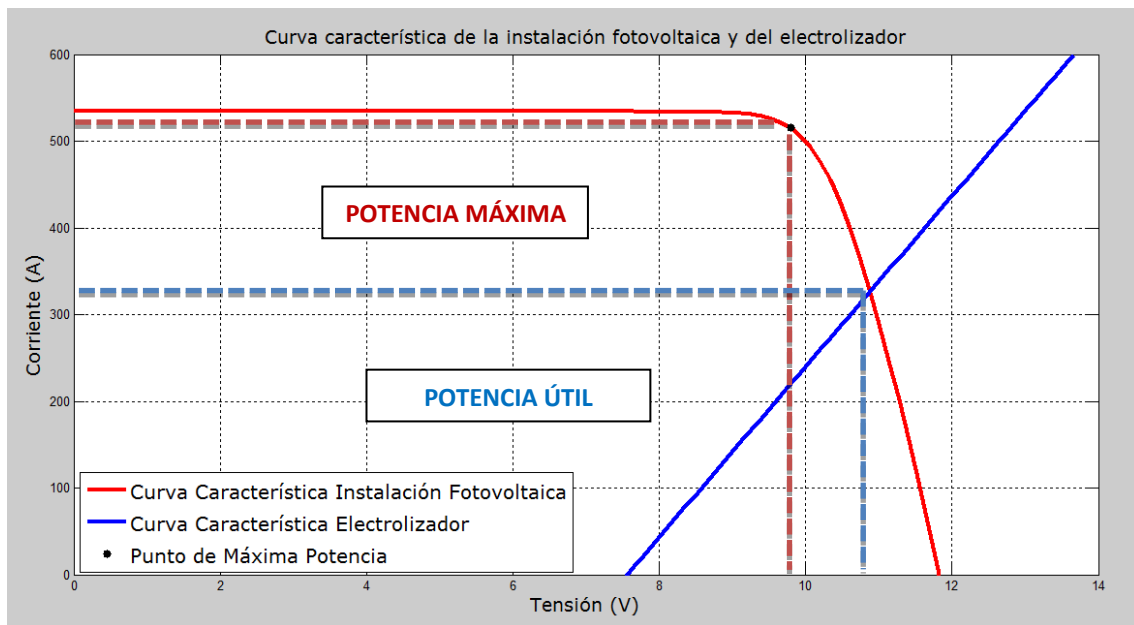
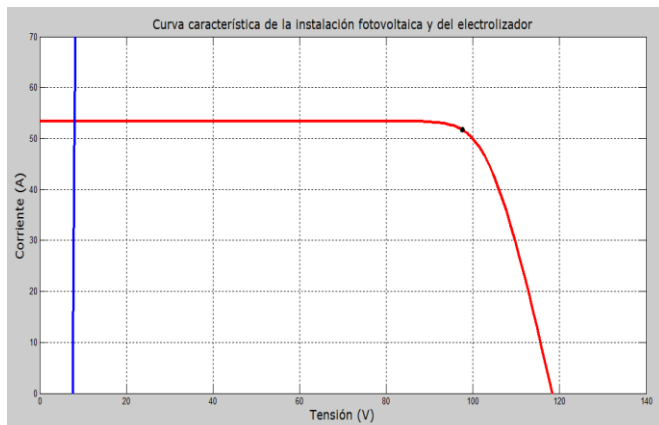


Figura 21: Definición de potencia máxima y potencia útil

A continuación, se expondrán varias configuraciones hasta obtener la configuración óptima:



10 paneles en paralelo y 25 en serie:

| $P_{\text{útil}}$ (W) | $P_{\text{máx}}$ (W) | $P_{\text{útil}}/P_{\text{máx}}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 433 | 5049 | 0.086 |

Figura 22: 10 paneles en paralelo y 25 en serie en la instalación fotovoltaica

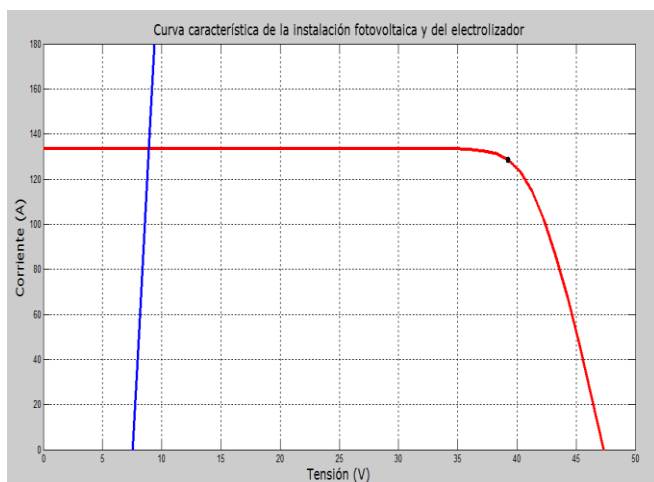


Figura 23: 25 paneles en paralelo y 10 en serie en la instalación fotovoltaica

25 paneles en paralelo y 10 en serie:

| $P_{\text{útil}}$ (W) | $P_{\text{máx}}$ (W) | $P_{\text{útil}}/P_{\text{máx}}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1191 | 5047 | 0.236 |

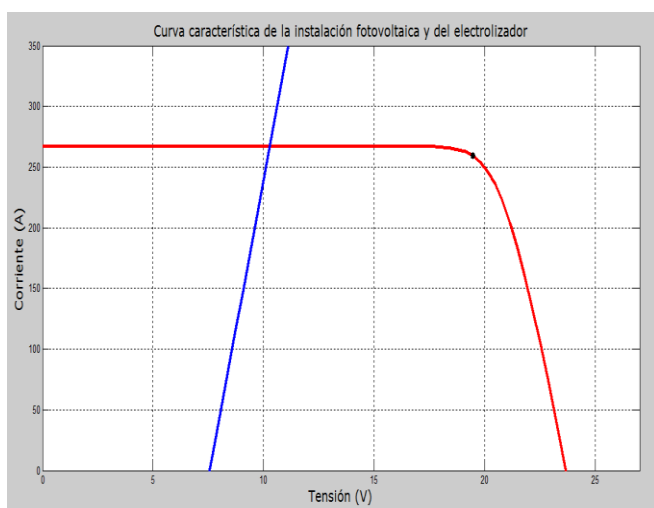


Figura 24: 50 paneles en paralelo y 5 en serie en la instalación fotovoltaica

50 paneles en paralelo y 5 en serie:

| $P_{\text{útil}}$ (W) | $P_{\text{máx}}$ (W) | $P_{\text{útil}}/P_{\text{máx}}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 2744 | 5044 | 0.544 |

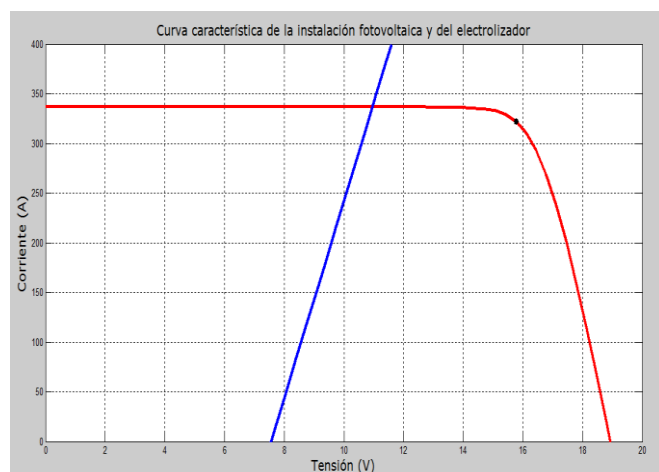


Figura 25: 63 paneles en paralelo y 4 en serie en la instalación fotovoltaica

63 paneles en paralelo y 4 en serie:

| $P_{\text{útil}}$ (W) | $P_{\text{máx}}$ (W) | $P_{\text{útil}}/P_{\text{máx}}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 3686 | 5088 | 0.724 |

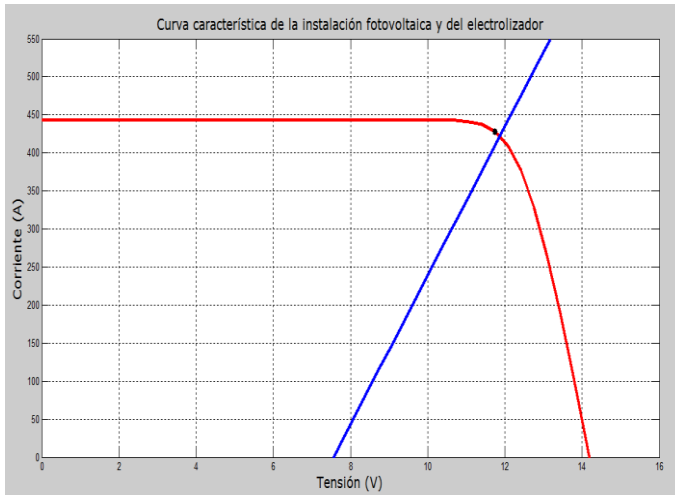


Figura 26: 83 paneles en paralelo y 3 en serie en la instalación fotovoltaica

83 paneles en paralelo y 3 en serie:

| $P_{\text{útil}}$ (W) | $P_{\text{máx}}$ (W) | $P_{\text{útil}}/P_{\text{máx}}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 5013.2 | 5027.8 | 0.997 |

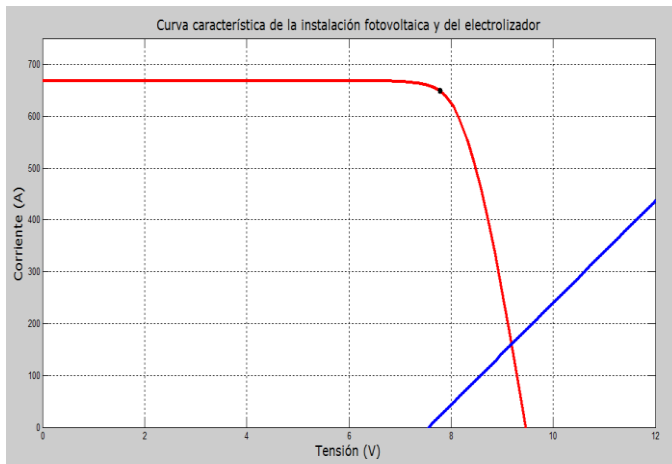


Figura 27: 125 paneles en paralelo y 2 en serie en la instalación fotovoltaica

125 paneles en paralelo y 2 en serie:

| $P_{\text{útil}}$ (W) | $P_{\text{máx}}$ (W) | $P_{\text{útil}}/P_{\text{máx}}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1469.6 | 5043.32 | 0.291 |

Como podemos comprobar, la configuración de 83 paneles en paralelo y 3 paneles en serie nos da el máximo valor de la relación entre potencia útil y potencia máxima, 0.997. Por tanto, en condiciones estándar elegiremos esta configuración para realizar los cálculos oportunos.

Se puede observar en los ejemplos anteriores que al aumentar los paneles en serie en la instalación fotovoltaica, aumenta los valores de la tensión, y al aumentar los paneles en paralelo en la instalación fotovoltaica, aumenta los valores de la intensidad. Esto coincide con lo explicado en el apartado 2.4.

La recta lineal del electrolizador es la misma en todos los ejemplos anteriores. Parece que la pendiente de esta recta varía de un ejemplo a otro, pero esto es debido a que los valores de los ejes cambian de una configuración a otra para poder ajustar nuestras curvas.



Configuración de referencia: 83 paneles en paralelo y 3 serie

Gráfica de la configuración base de nuestro sistema de estudio:

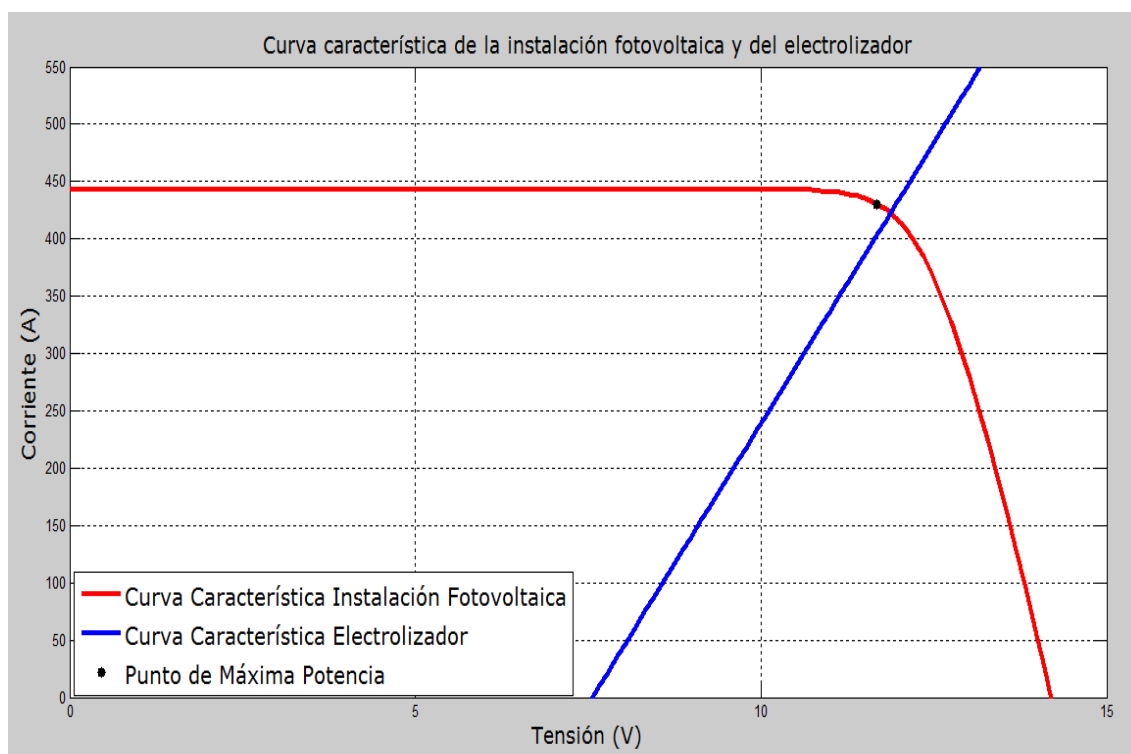


Figura 28: Caso de referencia del acoplamiento de la instalación fotovoltaica con el electrolizador

Parámetros de la configuración base:

| | |
|-----------------------|---------|
| $I_{punto,corte}$ | 422.3 A |
| $U_{punto,corte}$ | 11.9 V |
| $P_{\acute{u}til}$ | 5013 W |
| I_{PMP} | 430.5 V |
| U_{PMP} | 11.7 A |
| P_{PMP} | 5028 W |
| $\eta_{acoplamiento}$ | 99.72 % |



5. Análisis de sensibilidad de los parámetros

A continuación, se va a empezar con el análisis de sensibilidad de los parámetros de nuestro estudio con el fin de proporcionar una visión de cómo varía la curva característica de una instalación fotovoltaica y del electrolizador al variar los parámetros de la ecuación característica de ambos. Se va a estudiar cada parámetro individualmente con un rango de variación de los parámetros de un 10 % superior y un 10 % inferior con respecto a los valores en las condiciones de referencia.

En la instalación fotovoltaica se van a estudiar los parámetros del esquema resultante equivalente, es decir: R_s , R_{sh} , I_{ph} , I_r y a .

En el electrolizador se va a estudiar la temperatura de entrada al electrolizador T_{sp} que afecta a la curva característica de este dispositivo.

Además, de cada parámetro se hará un estudio para comprobar la configuración óptima de paneles en serie y en paneles en paralelo de la instalación fotovoltaica según el rango de variación de los parámetros.

El estudio va a consistir en discutir los valores de la potencia, del rendimiento y del caudal de hidrógeno obtenido según la variación de los parámetros.

El rendimiento del acoplamiento de la instalación fotovoltaica con el electrolizador es directamente proporcional a la potencia del sistema. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_{acoplamiento} = \frac{\text{Potencia útil del sistema [W]}}{\text{Potencia máxima del sistema [W]}}$$

Para calcular el caudal de hidrógeno vamos a tener en cuenta que 4.4 kWh de energía nos proporciona 82 gramos de hidrógeno, dicho de otro forma, para una potencia dada de 4400 W obtenemos 82 gramos/h. Así que dependiendo de la potencia útil que nos proporciona la instalación fotovoltaica obtendremos más o menos caudal de hidrógeno. Este caudal lo pasaremos a unidades de g/mol. Consideraremos la masa atómica del hidrógeno de 1.00797 g/mol.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el rendimiento energético. Lo calcularemos a través del caudal de hidrógeno de la siguiente manera, donde el poder calorífico superior son 141860 J/mol:

$$\eta_{energético} = \frac{\dot{n}_{H_2} \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] \cdot PCS \left[\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]}{1000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot N_p \cdot A \left[\text{m}^2 \right]}$$



5.1. Parámetros de la instalación fotovoltaica

5.1.1. Parámetro R_s

El parámetro R_s de la célula fotovoltaica indica la resistencia en serie que representa las pequeñas pérdidas que se producen en la generación. Normalmente esta resistencia es de un valor pequeño, concretamente en la configuración base de nuestro estudio $R_s = 0.0822 \Omega$.

La resistencia en serie de una célula solar se debe a:

- Paso de la corriente a través del emisor y la base de la célula solar.
- La resistencia de contacto entre el metal y el silicio.
- La resistencia de los contactos de metal frontales y traseros.

El principal efecto de la resistencia en serie es el de reducir el FF. A valores excesivamente altos también pueden reducir la intensidad de cortocircuito.

La curva característica de la instalación fotovoltaica varía de la siguiente forma dependiendo de aumentar o disminuir este parámetro un 10%:

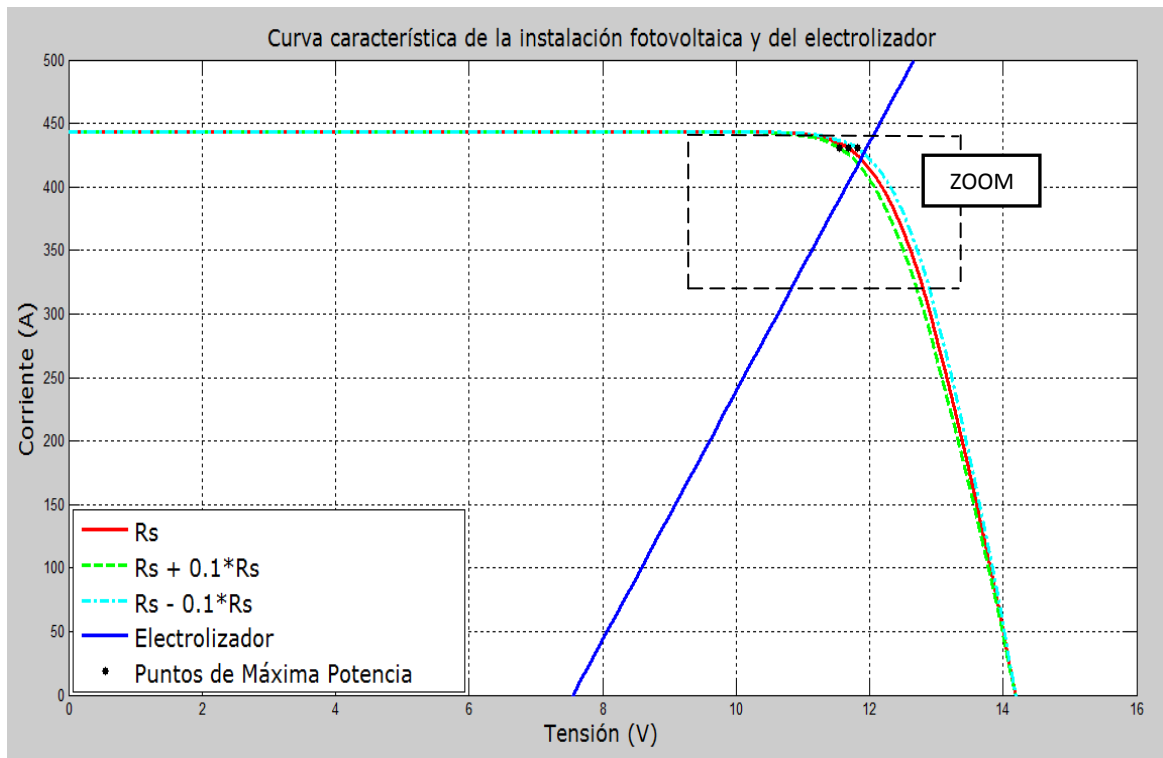


Figura 29: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro R_s



En el zoom de la figura anterior se muestra más claramente la variación de la curva característica:

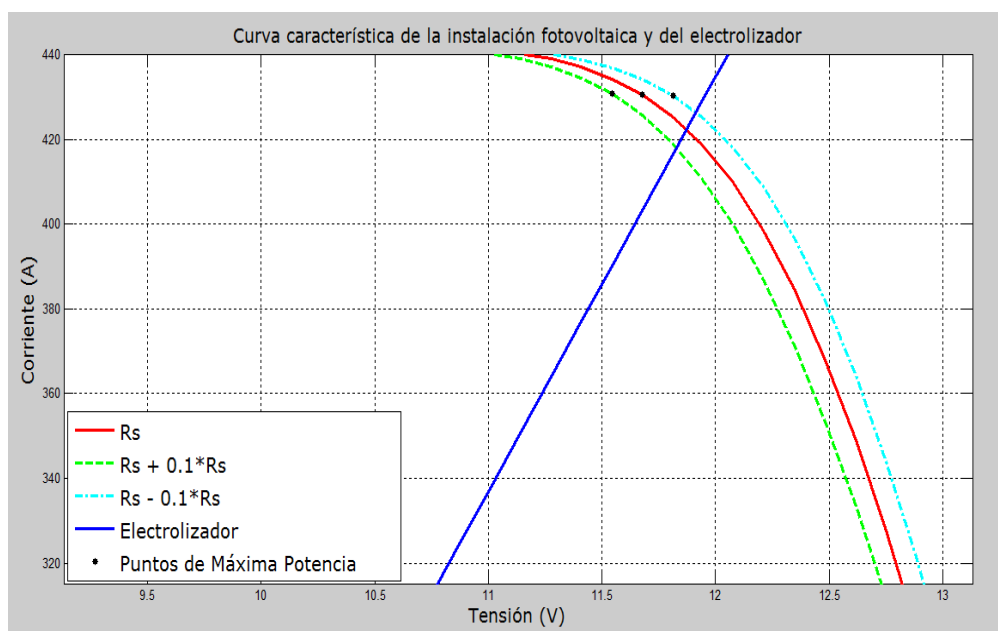


Figura 30: Zoom de la figura anterior

Los resultados que obtenemos son los siguientes:

| | $R_s - 10\%$ | R_s | $R_s + 10\%$ |
|----------------------------------|--------------|--------|--------------|
| R_s (Ω) | 0.074 | 0.0822 | 0.0904 |
| $I_{\text{punto,corte}}$ (V) | 426.3 | 422.3 | 417.9 |
| $V_{\text{punto,corte}}$ (A) | 11.9 | 11.87 | 11.82 |
| $P_{\text{útil}}$ (W) | 5079 | 5013 | 4944 |
| I_{PMP} (V) | 430.3 | 430.5 | 430.7 |
| V_{PMP} (A) | 11.8 | 11.7 | 11.5 |
| P_{PMP} (W) | 5083 | 5028 | 4972 |
| $\eta_{\text{acoplamiento}}$ (%) | 99.91 | 99.72 | 99.43 |
| \dot{n}_{H_2} (mol/s) | 0.013 | 0.0129 | 0.0127 |
| $\eta_{\text{energético}}$ (%) | 9.99 | 9.86 | 9.72 |



Como se puede comprobar en la figura 29, al variar este parámetro R_s un 10% ascendente o descendente no se modifica la intensidad de cortocircuito ni el voltaje de circuito abierto.

Al aumentar R_s un 10% la curva de la instalación fotovoltaica se contrae y por tanto la potencia útil y la potencia máxima son las menores de los tres casos estudiados, no llegando a los 5000 W que necesita el electrolizador. El rendimiento de acoplamiento que se alcanza también es el menor, un 99.43%, debido a que la diferencia entre la potencia máxima y la potencia útil es el mayor de todos. El caudal de hidrógeno que obtenemos de esta configuración es el menor de los tres casos estudiados ya que la potencia útil es la menor de los tres. Se obtienen 0.0127 mol/s de hidrógeno. Por tanto, el rendimiento energético también es el menor de los tres casos, un 9.72%.

Al disminuir R_s un 10% la curva de la instalación fotovoltaica se expande y la potencia máxima es la mayor de los tres casos. Esto es debido a que la tensión en el punto de máxima potencia es la mayor de todas aunque su intensidad en dicho punto sea sensiblemente inferior. Por tanto, el rendimiento del acoplamiento en este caso es el mayor de todos llegando a ser un 99.91%. El caudal de hidrógeno que obtenemos en este caso es 0.013 mol/s que es la mayor cantidad de hidrógeno que se obtiene en el estudio de este parámetro. Por consecuencia, el rendimiento energético es el mayor de los tres casos obteniendo un 9.99%.

En la siguiente gráfica se muestra la variación del rendimiento en función del parámetro R_s y los distintos paneles en serie y paralelo:

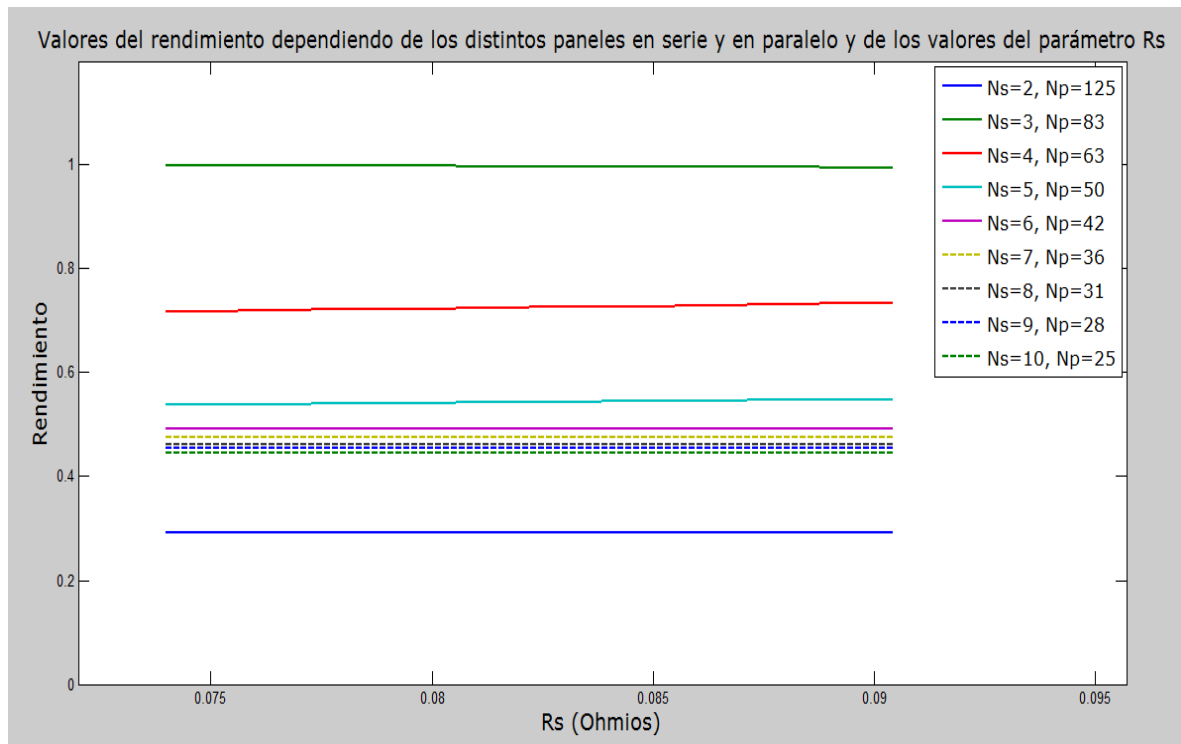


Figura 31: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro R_s



Al visualizar la figura 31 de paneles en serie y paralelo, vemos claramente que en el rango de valores del estudio de R_s siempre vamos a tener la configuración óptima de 3 paneles en serie y 83 en paralelo de referencia, y en ningún caso vamos a tener otra configuración que mejore el rendimiento al disminuir o aumentar esta resistencia en serie un 10%. La configuración de 2 paneles en serie y 125 en paralelo es la configuración que menos rendimiento nos proporciona. Es importante observar que al aumentar los paneles en serie cada vez varía menos el rendimiento al acoplarse de una configuración a otra, llegando a ser el rendimiento prácticamente idéntico en las configuraciones de los paneles en serie más elevados de los casos que se plantean en la figura. Estas dos últimas observaciones comentadas se van a repetir en los otros parámetros estudiados.

Por tanto, podemos decir que la resistencia en serie R_s tiene muy poca influencia en el rango estudiado.



5.1.2. Parámetro R_{sh}

El parámetro R_{sh} representa la resistencia en paralelo de la célula solar. El valor de esta resistencia en paralelo es mucho mayor que la resistencia en serie, en el caso base de nuestro estudio $R_{sh} = 10000 \Omega$. Esta resistencia hace que todo el voltaje se concentre en los bornes de la placa.

La resistencia en paralelo provoca la pérdida de energía en las células solares, proporcionando una ruta alternativa a la corriente generada por la luz. Esta desviación reduce la cantidad de corriente fluyendo a través de la unión de células solares y reduce el voltaje de la célula solar.

El efecto de R_{sh} es particularmente grave en los niveles bajos de luz, ya que habrá menos corriente fotogenerada y la pérdida de parte de esta corriente en la derivación tiene un impacto mayor.

Como se puede observar en la siguiente gráfica, al variar el parámetro R_{sh} ascendentemente o descendentemente un 10% no se aprecia variación alguna:

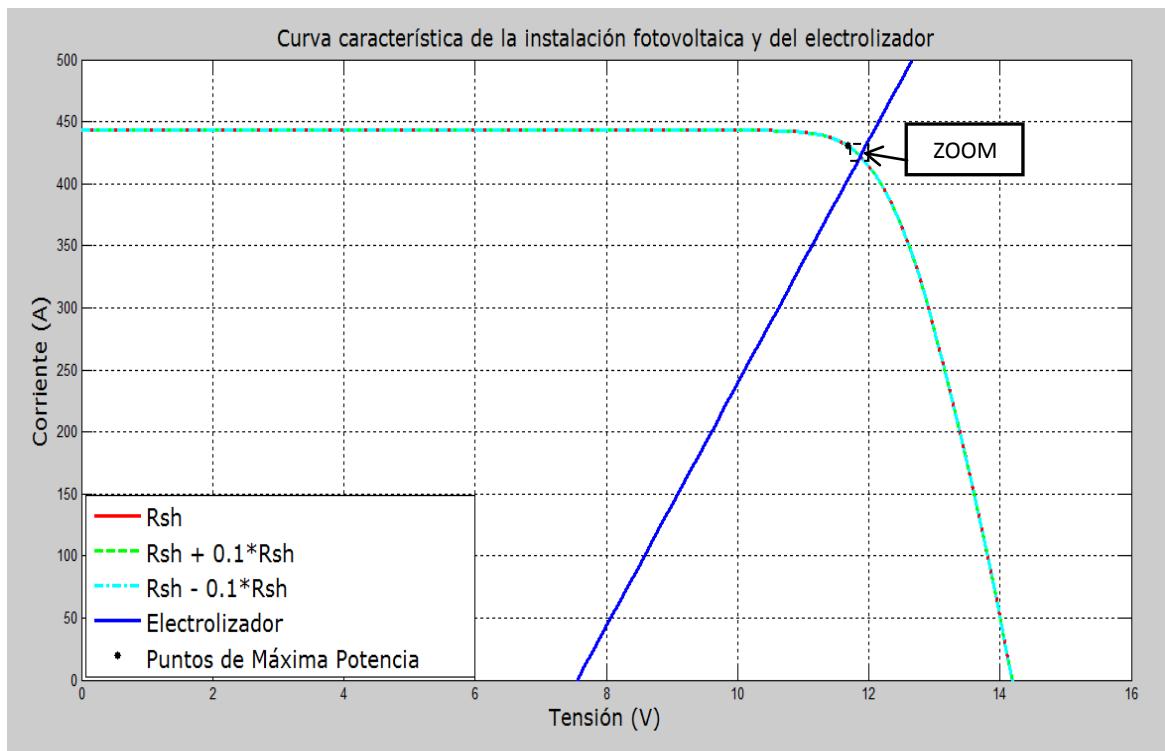


Figura 32: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro Rsh



Se aprecia en el siguiente zoom como la variación es casi nula:

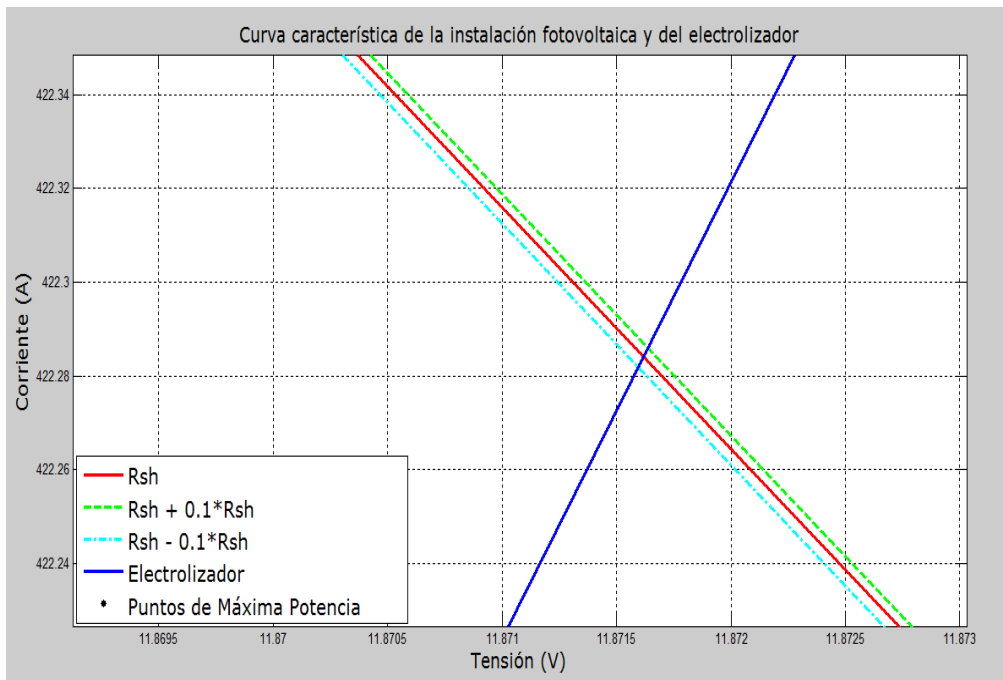


Figura 33: Zoom de la figura anterior

Vemos como los resultados obtenidos son prácticamente iguales:

| | $R_{sh} - 10\%$ | R_{sh} | $R_{sh} + 10\%$ |
|----------------------------------|-----------------|----------|-----------------|
| $R_{sh} (\Omega)$ | 9000 | 10000 | 11000 |
| $I_{punto,corte} (V)$ | 422.3 | 422.3 | 422.3 |
| $V_{punto,corte} (A)$ | 11.9 | 11.9 | 11.9 |
| $P_{\acute{u}til} (W)$ | 5013 | 5013 | 5013 |
| $I_{PMP} (V)$ | 430.5 | 430.5 | 430.5 |
| $V_{PMP} (A)$ | 11.7 | 11.7 | 11.7 |
| $P_{PMP} (W)$ | 5028 | 5028 | 5028 |
| $\eta_{acoplamiento} (\%)$ | 99.71 | 99.72 | 99.71 |
| $\dot{n}_{H_2} (mol/s)$ | 0.0129 | 0.0129 | 0.0129 |
| $\eta_{energ\acute{e}tico} (\%)$ | 9.86 | 9.86 | 9.86 |



Como se puede apreciar en la tabla anterior, al aumentar o disminuir R_{sh} un 10% no observamos variación alguna.

La potencia útil se mantiene en 5013 W y la potencia máxima también se mantiene en 5028 W, por tanto el rendimiento del acoplamiento no varía del caso base que era 99.72%.

El caudal de hidrógeno no cambia de 0.0129 mol/s y por consecuencia el rendimiento energético sigue siendo 9.86%.

En la siguiente gráfica observamos como el rendimiento apenas varía dependiendo de los distintos paneles en serie y del rango de valores de R_{sh} :

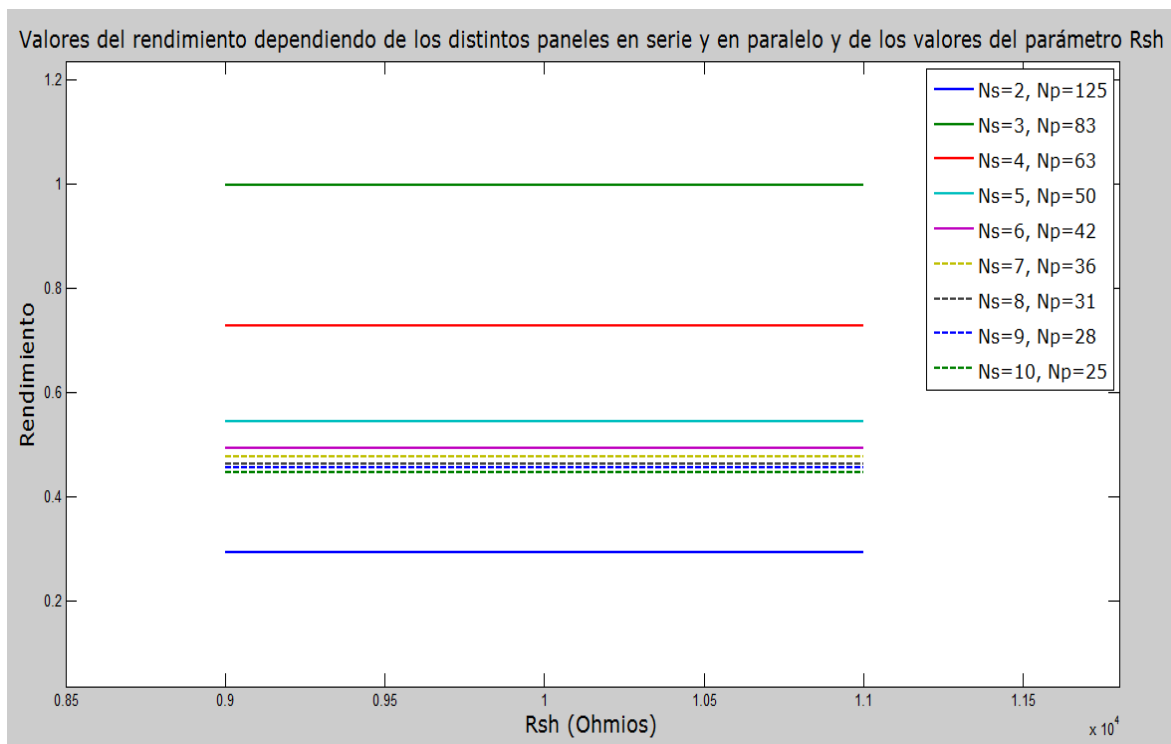


Figura 34: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro Rsh

Se mantiene durante todo el rango de valores de R_{sh} la configuración óptima de 3 paneles en paralelo y 83 en serie y no se aprecia en la gráfica que esta configuración pueda cambiar si variamos la resistencia R_{sh} con un rango mayor de $\pm 10\%$.

Por tanto, la variación de la resistencia en paralelo R_{sh} tiene una influencia nula en nuestro estudio.



5.1.3. Parámetro I_{ph}

La corriente fotogenerada o de cortocircuito I_{ph} es la corriente a través de la célula solar cuando el voltaje entre sus terminales es cero (es decir, cuando la célula solar está cortocircuitada). La corriente de cortocircuito se debe a la generación y recolección de los portadores de carga generados.

Para una célula solar ideal la corriente de cortocircuito y la generada por luz son idénticas. Por lo tanto, la corriente de cortocircuito es la mayor corriente que puede extraerse de la célula solar.

La corriente de cortocircuito depende de una serie de factores:

- El área de la célula solar. Para eliminar esta dependencia se define la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc} en mA/cm^2) en lugar de la corriente de cortocircuito. Las células solares de silicio bajo un espectro AM = 1.5 tienen una densidad de corriente de cortocircuito teórica máxima $J_{sc} = 46 \text{ mA}/\text{cm}^2$.
- El número de fotones (es decir, la potencia de la fuente de luz incidente). La intensidad de cortocircuito de una célula solar depende directamente de la intensidad de la luz.
- El espectro de la luz incidente. Para la medición de células solares se utiliza el espectro normalizado AM = 1.5.
- Las propiedades ópticas (absorción y reflexión) de la célula solar.
- La probabilidad de generación de carga de la célula solar que depende principalmente de la pasivación de superficie y el tiempo de vida de los portadores minoritarios en la base.

Como se indica en el apartado 2.2, la intensidad de cortocircuito la podemos obtener de la siguiente ecuación:

$$I_{ph} = \text{Área} \cdot (J_{sc} \cdot E/1000 + \alpha_{J_{sc}} \cdot (T - 300))$$



La curva característica de la instalación fotovoltaica varía de la siguiente manera al aumentar o disminuir un 10% el parámetro I_{ph} :

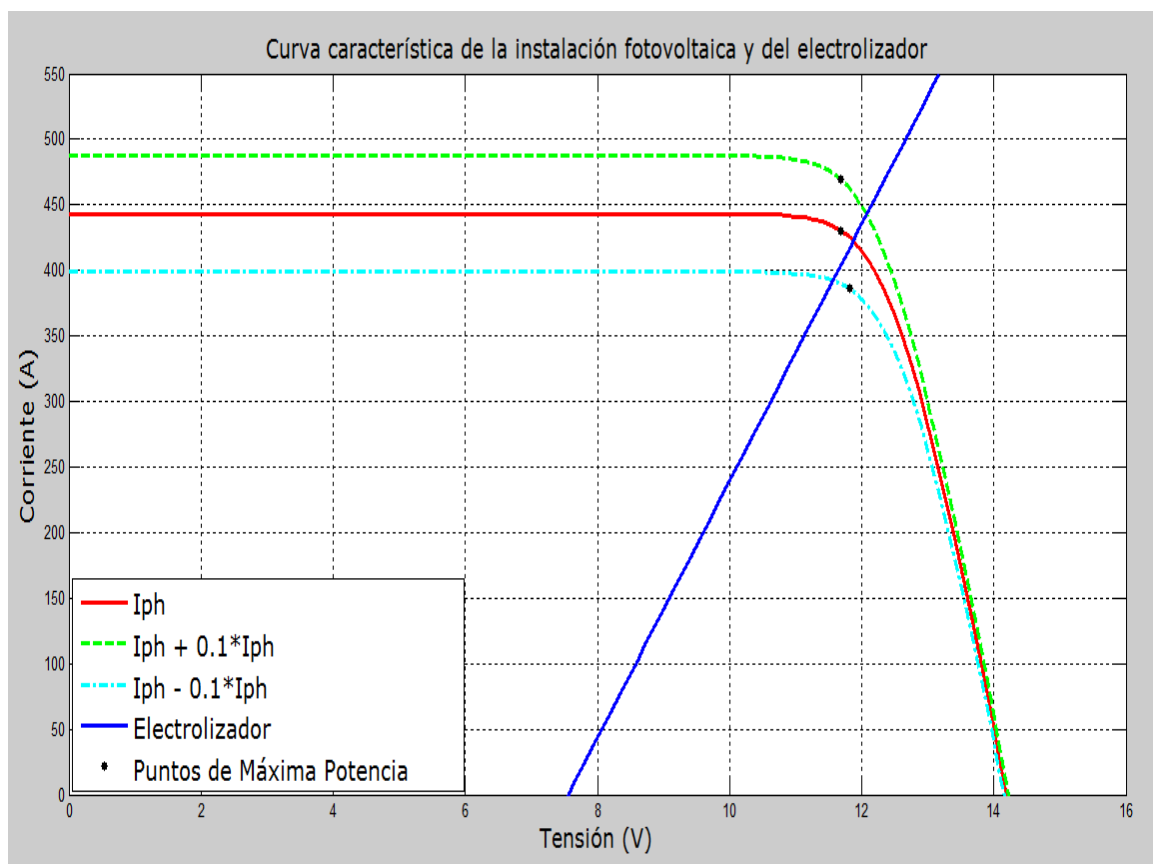


Figura 35: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro I_{ph}



Los resultados que obtenemos son los siguientes:

| | $I_{ph} - 10 \%$ | I_{ph} | $I_{ph} + 10 \%$ |
|----------------------------------|------------------|----------|------------------|
| $I_{ph} (\Omega)$ | 4.8 | 5.3 | 5.9 |
| $I_{punto,corte} (V)$ | 392.3 | 422.3 | 442.7 |
| $V_{punto,corte} (A)$ | 11.6 | 11.9 | 12.1 |
| $P_{\acute{u}til} (W)$ | 4536 | 5013 | 5348 |
| $I_{PMP} (V)$ | 386.1 | 430.5 | 469.8 |
| $V_{PMP} (A)$ | 11.8 | 11.7 | 11.7 |
| $P_{PMP} (W)$ | 4561 | 5028 | 5486 |
| $\eta_{acoplamiento} (\%)$ | 99.46 | 99.72 | 97.48 |
| $\dot{n}_{H_2} (mol/s)$ | 0.0116 | 0.0129 | 0.0137 |
| $\eta_{energ\acute{e}tico} (\%)$ | 8.92 | 9.86 | 10.51 |

Al observar la figura 35 podemos comprobar que al variar la intensidad de cortocircuito no modifica el voltaje de circuito abierto.

Al aumentar I_{ph} un 10% la curva de la instalación fotovoltaica se expande. Por tanto su potencia útil y su potencia máxima son la mayor de los tres casos estudiados y superan sobradamente los 5000 W que necesita el electrolizador. Sin embargo, el rendimiento del acoplamiento es 97.48% que es el menor rendimiento de los tres casos debido a que la diferencia entre la potencia útil y la potencia máxima es la mayor de todas y como se puede observar en la figura 35, el punto de máxima potencia en este caso es el más alejado de la curva del electrolizador. Obtenemos un caudal de hidrógeno de 0.0137 mol/s que es el mayor caudal de los tres casos debido a que la potencia útil es mayor. Esto trae como consecuencia un rendimiento energético bastante alto, 10.51%.

Al disminuir I_{ph} un 10% la curva de la instalación fotovoltaica se contrae. Por tanto, tiene como consecuencia que la potencia útil y potencia máxima son las menores de todas, no llegando a los 5000 W que necesita el electrolizador. Tiene un rendimiento de acoplamiento bastante alto del 99.46% aunque el caudal de hidrógeno que obtenemos es de 0.0116 mol/s.



Debido a que tiene un caudal de hidrógeno bajo también tenemos el peor rendimiento energético de los tres casos, 8.92%.

El rendimiento varía de la siguiente manera según tengamos los distintos paneles en serie y paralelo y la siguiente variación del parámetro I_{ph} :

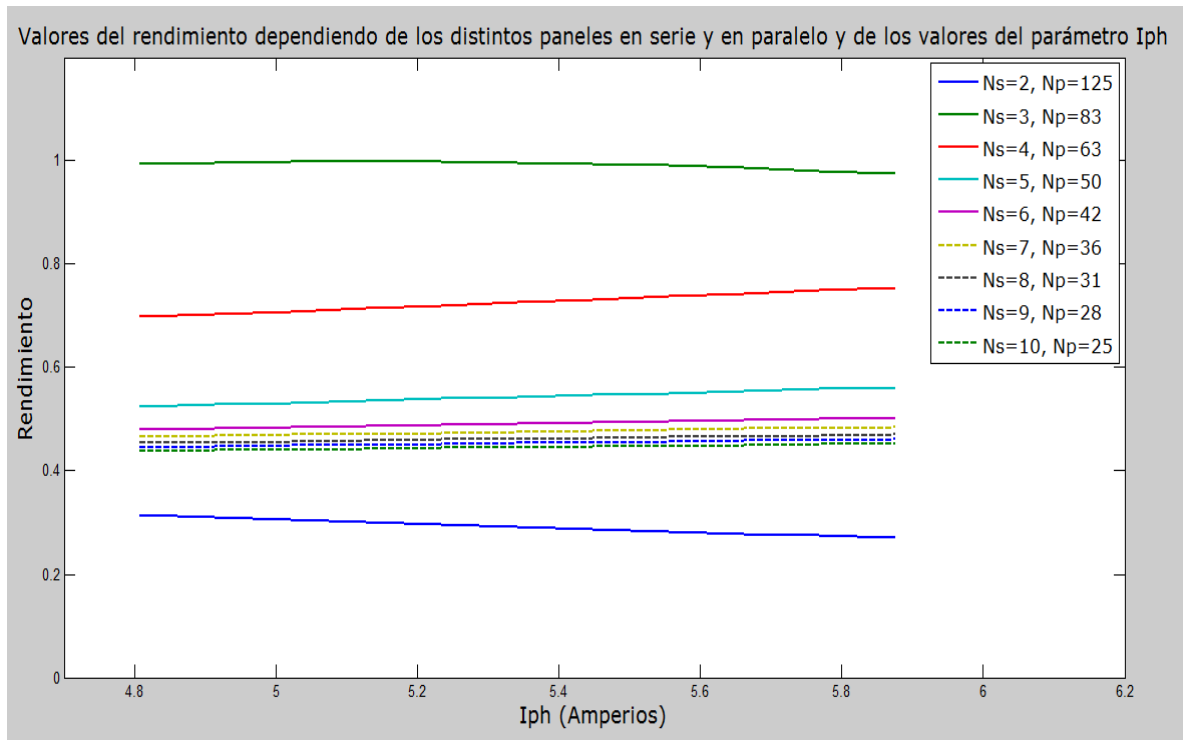


Figura 36: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro I_{ph}

Se puede comprobar en la figura anterior que la configuración óptima a lo largo del rango de valores de I_{ph} es la configuración base de 3 paneles en serie y 83 en paralelo. Sin embargo, si nos fijamos en la pendiente de la configuración de 4 paneles en serie y 63 en paralelo y la comparamos con la configuración base podemos indicar que si seguimos aumentando el parámetro I_{ph} a valores mayores de un 10% podría llegar el momento en que la configuración óptima de la instalación solar será la de 4 paneles en serie y 83 en paralelo. Estos valores de I_{ph} no serían necesarios calcularlos debido a que no pertenecen a nuestro estudio.

Por tanto podemos concluir que la intensidad fotogenerada o de cortocircuito I_{ph} tiene más influencia en nuestro estudio que las resistencias anteriormente estudiadas pero tampoco tiene una influencia muy importante en dicho estudio.



5.1.4. Parámetro I_r

Como se ha indicado en el apartado 2.2, la intensidad de saturación inversa del diodo se obtiene con la siguiente expresión:

$$I_r = D \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot \varepsilon_G}{A \cdot k \cdot T_c}\right)$$

La corriente que transcurre por el diodo es la que crea la forma característica de la curva I-V de la célula fotovoltaica y la que traslada esta curva al primer cuadrante como se puede observar en la siguiente figura:

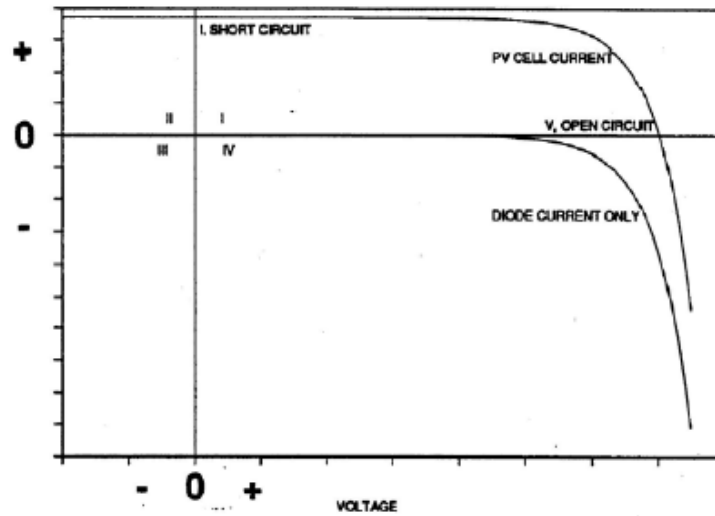


Figura 37: Curva I-V del diodo y de la célula



A continuación se muestra como varía la curva característica de la instalación fotovoltaica al aumentar o disminuir el parámetro I_r :

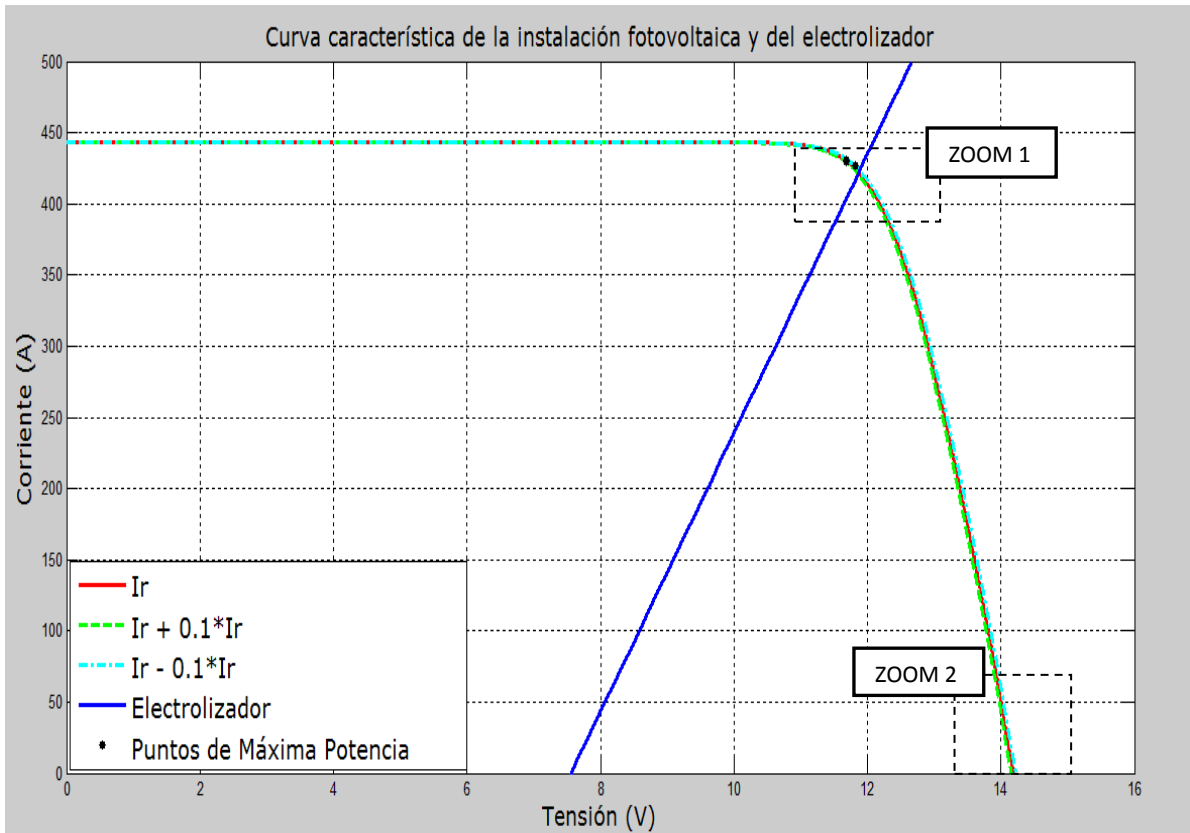


Figura 38: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro I_r

Zoom 1 anterior:

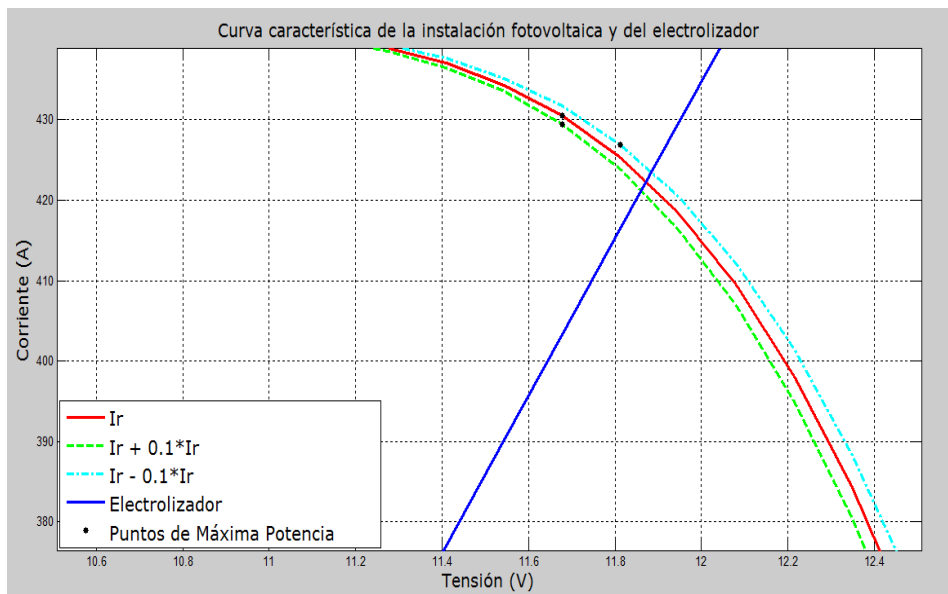


Figura 39: Zoom 1 de la gráfica anterior



Zoom 2 anterior:

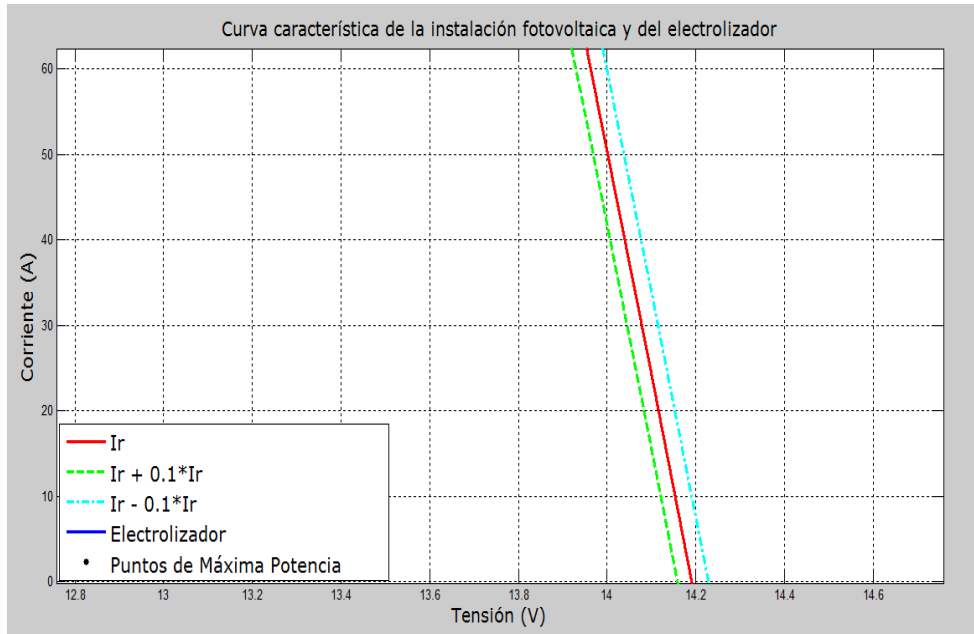


Figura 40: Zoom 2 de la gráfica anterior

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

| | $I_r - 10\%$ | I_r | $I_r + 10\%$ |
|----------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| I_r (A) | $0.9 \cdot 10^{-17}$ | $1 \cdot 10^{-17}$ | $1.1 \cdot 10^{-17}$ |
| $I_{\text{punto,corte}}$ (V) | 423.5 | 422.3 | 421.2 |
| $V_{\text{punto,corte}}$ (A) | 11.9 | 11.9 | 11.9 |
| $P_{\text{útil}}$ (W) | 5033 | 5013 | 4995 |
| I_{PMP} (V) | 426.9 | 430.5 | 429.4 |
| V_{PMP} (A) | 11.8 | 11.7 | 11.7 |
| P_{PMP} (W) | 5043 | 5028 | 5015 |
| $\eta_{\text{acoplamiento}}$ (%) | 99.80 | 99.72 | 99.61 |
| \dot{n}_{H_2} (mol/s) | 0.0129 | 0.0129 | 0.0128 |
| $\eta_{\text{energético}}$ (%) | 9.90 | 9.86 | 9.82 |



Si visualizamos la figura 38, podemos comprobar como la intensidad de cortocircuito de la instalación solar no cambia al variar el parámetro I_r , sin embargo el voltaje de circuito abierto varía mínimamente como indica el zoom 2 de la gráfica.

Al aumentar I_r un 10% la curva característica de la instalación fotovoltaica se contrae mínimamente. La potencia útil no llega a los 5000 W necesarios para el electrolizador aunque la potencia máxima sí los supera teniendo 5015 W. El rendimiento del acoplamiento es el menor de los tres casos con un 99.61% y el caudal de hidrógeno también es el menor con 0.0128 mol/s. Por tanto, al tener menor caudal de hidrógeno también tenemos menor rendimiento energético, un 9.82%.

Al disminuir I_r un 10% la curva característica de la instalación fotovoltaica se expande mínimamente. La potencia útil y la potencia máxima superan los 5000 W que necesita el electrolizador. Tiene el mayor rendimiento del acoplamiento con un 99.80% debido a que la diferencia entre ambas potencias es la menor de los tres casos. Sin embargo el caudal de hidrógeno es prácticamente igual que en los otros casos con 0.0129 mol/s, aunque podríamos decir que es mínimamente superior ya que la potencia útil es la mayor. Por tanto, el rendimiento energético es el mayor de todos, un 9.90%.

El rendimiento apenas varía al depender de los distintos paneles en serie y del parámetro I_r :

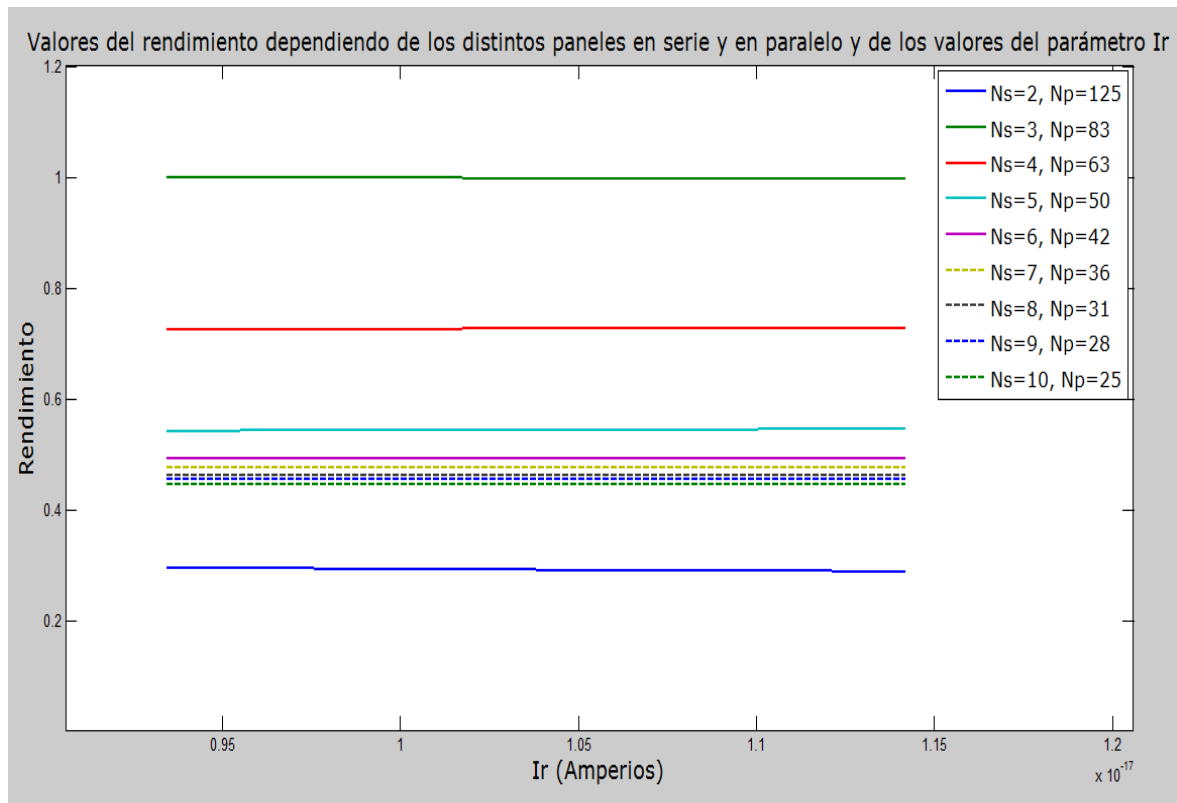


Figura 41: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro I_r



Como vemos en esta figura, la configuración óptima de paneles en serie y en paralelo siempre va a ser de 3 paneles en serie y 83 paneles en paralelo. El rendimiento varía muy poco dependiendo de los valores de I_r por lo que parece que esta configuración de paneles comentada anteriormente va a ser la óptima para cualquier valor de I_r .

Podemos concluir que la intensidad de saturación inversa del diodo I_r afecta muy poco a nuestro estudio.



5.1.5. Parámetro α

El parámetro α denominado actividad de especies se representa en función del factor de idealidad del diodo m y en función del voltaje térmico V_t como ya se comentó en el apartado 2.2:

$$\alpha = m \cdot V_t$$

$$V_t = K \cdot T/q$$

La curva característica de la instalación fotovoltaica toma la siguiente forma al variar el parámetro α como se muestra en la siguiente gráfica:

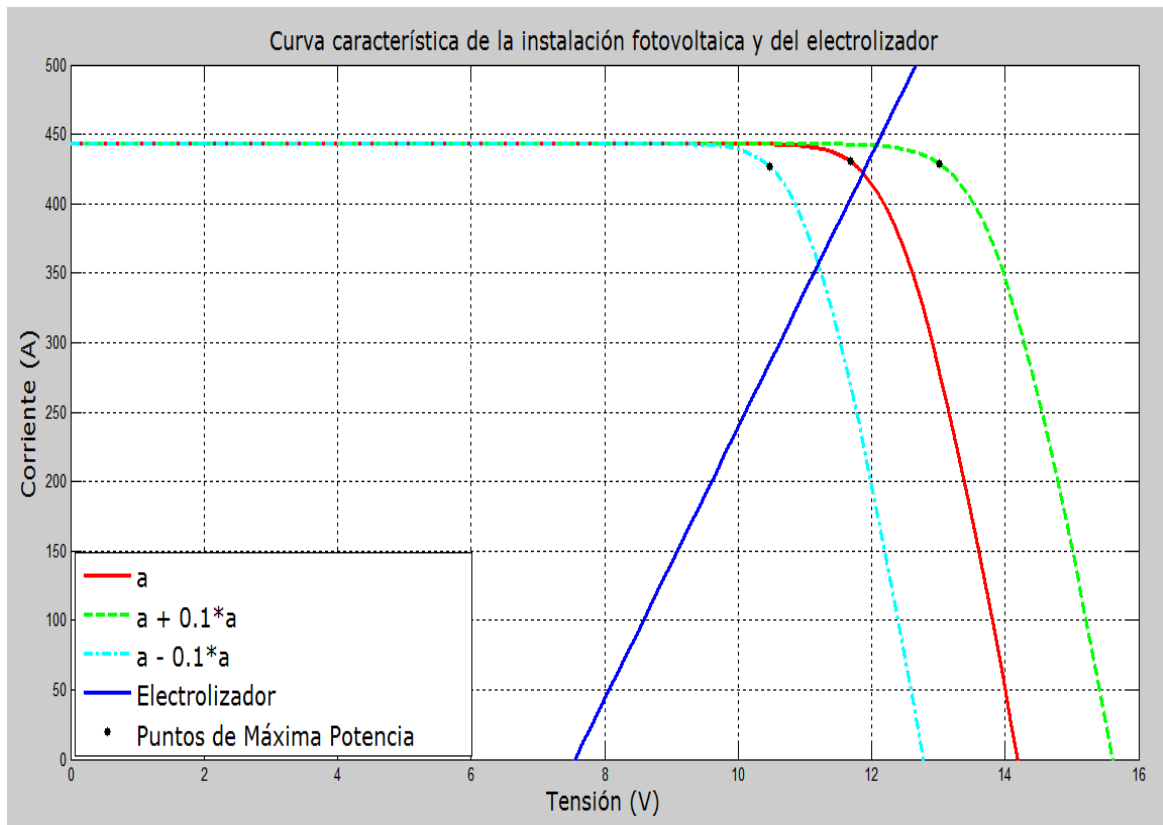


Figura 42: Variación de la curva característica de la instalación fotovoltaica dependiendo del parámetro α



Los resultados que se obtienen son los siguientes:

| | a - 10 % | a | a + 10 % |
|----------------------------------|----------|--------|----------|
| a | 0.104 | 0.116 | 0.128 |
| $I_{\text{punto,corte}}$ (V) | 356.6 | 422.3 | 442.0 |
| $V_{\text{punto,corte}}$ (A) | 11.2 | 11.9 | 12.1 |
| $P_{\text{útil}}$ (W) | 3994 | 5013 | 5336 |
| I_{PMP} (V) | 427.0 | 430.5 | 429.06 |
| V_{PMP} (A) | 10.5 | 11.7 | 13.0 |
| P_{PMP} (W) | 4471 | 5028 | 5586 |
| $\eta_{\text{acoplamiento}}$ (%) | 89.33 | 99.72 | 95.51 |
| \dot{n}_{H_2} (mol/s) | 0.0103 | 0.0129 | 0.0137 |
| $\eta_{\text{energético}}$ (%) | 7.85 | 9.86 | 10.49 |

Al observar la figura 41, podemos ver que la intensidad de cortocircuito no varía al modificar el parámetro a, sin embargo el voltaje de circuito abierto varía significativamente.

Si aumentamos el parámetro a un 10% la curva característica de la instalación fotovoltaica se expande notoriamente. La potencia útil supera los 5000 W que necesita el electrolizador, llegando a alcanzar 5336 W y la potencia máxima llega hasta 5586 W que es el mayor valor de los tres casos estudiados. Sin embargo, se obtiene un rendimiento de un 95.51% que no es el máximo rendimiento que se obtiene ya que la diferencia de potencias es mayor en este caso que en el caso base donde se obtiene un rendimiento de acoplamiento del 99.72%. El caudal de hidrógeno en este caso es bastante alto con 0.0137 mol/s de hidrógeno. Aunque el rendimiento de acoplamiento no es el mayor de los tres casos estudiados, sí lo es el rendimiento energético, 10.49%. Esto es debido a que la intensidad de corriente es mayor y por tanto el caudal de hidrógeno que se obtiene es mayor, por lo que obtenemos un rendimiento energético mayor.

Si disminuimos el parámetro a un 10% la curva característica de la instalación fotovoltaica se contrae significativamente. Se obtiene un valor de potencia útil muy bajo de 3994 W y un valor



de potencia máxima también bajo de 4471 W por lo que este valor del parámetro no es adecuado para nuestro electrolizador. Se alcanza un rendimiento de acoplamiento bastante bajo también con un 89.33%. El caudal de hidrógeno obtenido solo alcanza 0.0103 mol/s de hidrógeno y es el menor caudal que obtenemos en los tres casos estudiados. Por tanto, el valor del rendimiento energético que se obtiene es el menor de los tres casos, 7.85%.

El rendimiento varía de la siguiente manera al depender de los distintos paneles en serie y paralelo y del parámetro a:

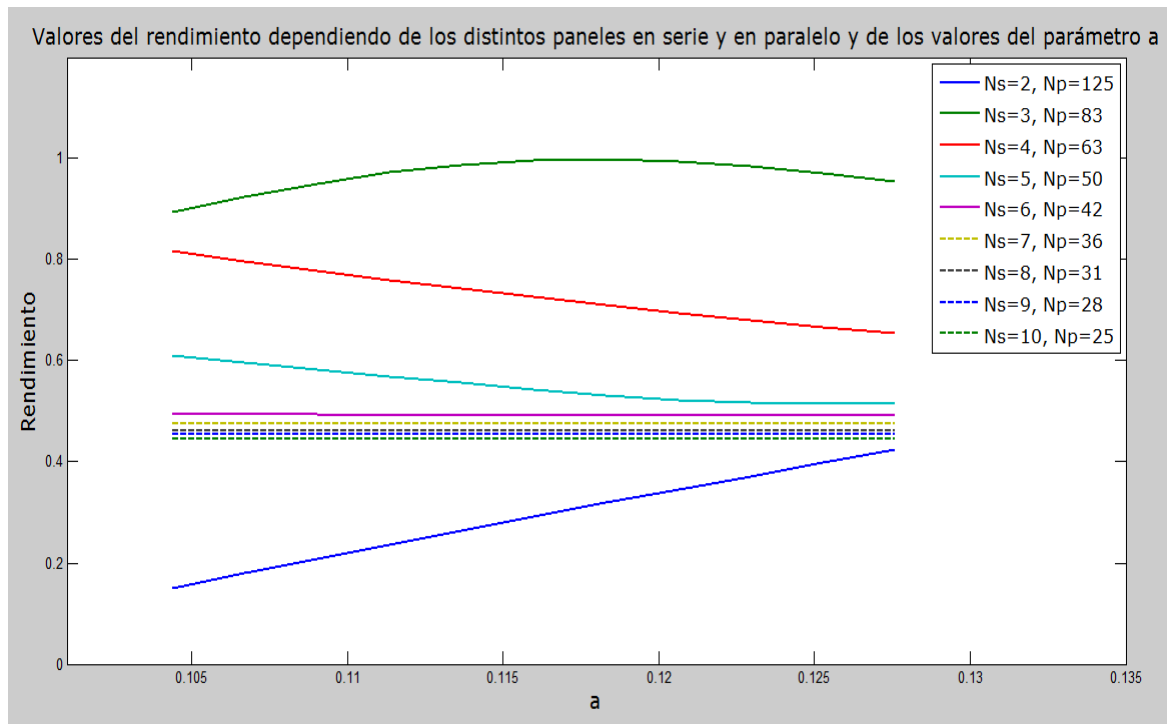


Figura 43: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro a

Al analizar la figura anterior podemos observar que en el rango de valores estudiados del parámetro a la configuración óptima de paneles en serie y paralelo es 83 paneles en paralelo y 3 en serie. Sin embargo, si observamos la tendencia del rendimiento de esta configuración con la tendencia del rendimiento de la configuración de 4 paneles en serie y 83 paneles en paralelo podemos concluir que para valores menores a los estudiados de a, podría llegar un valor de a donde la configuración óptima de la instalación fotovoltaica sea la de 4 paneles en serie y 83 en paralelo. Este valor del parámetro a no sería necesario calcularlo debido a que no están en el alcance de nuestro estudio.

Podemos concluir que el parámetro a es el que tiene mayor influencia en nuestro estudio. Variando mínimamente este parámetro obtenemos grandes variaciones de potencia e incluso en algún momento podría llegar a modificarse la configuración óptima de paneles en serie y paralelo en la instalación fotovoltaica.



5.2. Parámetro del electrolizador

5.2.1. Parámetro T_{sp}

En el caso del electrolizador vamos a estudiar la temperatura de entrada del agua al mismo tomando como temperaturas 35°C, que es el caso de referencia, 45°C, 55°C, 65°C y 75°C. Por tanto tenemos las siguientes expresiones y la siguiente variación en la curva característica del electrolizador:

$$I = 2.949 \cdot U - 22.29 \quad \text{para } T_{sp} = 308 \text{ K} \quad (\text{Caso de referencia})$$

$$I = 3.381 \cdot U - 25.65 \quad \text{para } T_{sp} = 318 \text{ K}$$

$$I = 3.813 \cdot U - 29.01 \quad \text{para } T_{sp} = 328 \text{ K}$$

$$I = 4.245 \cdot U - 32.37 \quad \text{para } T_{sp} = 338 \text{ K}$$

$$I = 4.677 \cdot U - 35.73 \quad \text{para } T_{sp} = 348 \text{ K}$$

Las curvas del electrolizador quedarían de la siguiente manera:

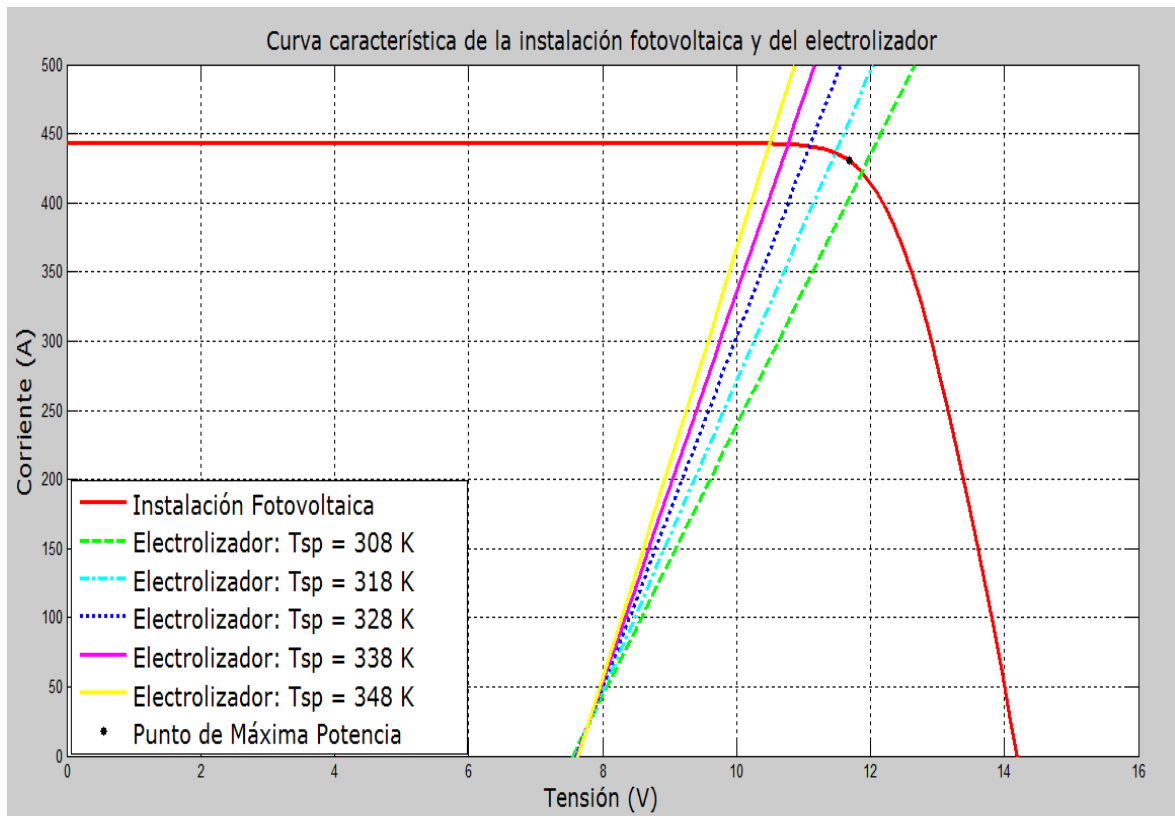


Figura 44: Curvas características del electrolizador dependiendo del parámetro T_{sp}



Los resultados que se obtienen son los siguientes:

| | $T_{sp} = 308 \text{ K}$ | $T_{sp} = 318 \text{ K}$ | $T_{sp} = 328 \text{ K}$ | $T_{sp} = 338 \text{ K}$ | $T_{sp} = 348 \text{ K}$ |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $I_{\text{punto,corte}} \text{ (V)}$ | 422.3 | 435.8 | 440.7 | 442.3 | 442.8 |
| $V_{\text{punto,corte}} \text{ (A)}$ | 11.9 | 11.5 | 11.1 | 10.8 | 10.5 |
| $P_{\text{útil}} \text{ (W)}$ | 5013 | 4999 | 4887 | 4760 | 4646 |
| $\eta_{\text{acoplamiento}} \text{ (\%)}$ | 99.71 | 99.42 | 97.20 | 94.68 | 92.40 |
| $\dot{n}_{\text{H}_2} \text{ (mol/s)}$ | 0.0129 | 0.0128 | 0.0125 | 0.0122 | 0.0119 |
| $\eta_{\text{energético}} \text{ (\%)}$ | 9.86 | 9.83 | 9.61 | 9.36 | 9.13 |

A medida que aumenta la temperatura de entrada del electrolizador, la pendiente de su curva característica aumenta. Esto implica una significativa disminución en la potencia útil.

Partimos de una potencia de 5013 W en el caso de referencia a una temperatura de entrada al electrolizador de 308 K. Al aumentar esta temperatura de entrada a 318 K nos encontramos con una potencia útil de 4999 W por lo que ya no llega a los 5000 W que necesita el electrolizador. Si seguimos aumentando la temperatura de entrada llegamos a unos valores de potencia útil de 4887 W para 328 K, 4760 W para 338 K y 4646 W para 348 K.

Por tanto, el mayor rendimiento en el acoplamiento se va a alcanzar para el caso de referencia, 99.71%. Al disminuir la potencia útil, disminuye el rendimiento de acoplamiento lógicamente, ya que la potencia máxima de la instalación fotovoltaica se mantiene constante, en un valor de 5028 W.

Se obtienen valores similares de caudal de hidrógeno, aunque en el caso de referencia se obtiene el mayor caudal, 0.0129 mol/s de hidrógeno. Aumentando la temperatura de entrada al electrolizador hasta 318 K, este caudal varía mínimamente a 0.0128 mol/s. Si seguimos aumentando la temperatura de entrada obtenemos 0.0125 mol/s para una temperatura de 328 K, 0.0122 mol/s para 338 K y 0.0119 mol/s para 348 K.

Al variar poco el caudal de hidrógeno obtenido, también varía poco el rendimiento energético. El mayor rendimiento energético se obtiene en el caso base, 9.86 % y el menor rendimiento energético se alcanza en la temperatura más alta estudiada, 9.13%.



Al variar los distintos paneles en serie paralelo y el parámetro T_{sp} tenemos los siguientes valores del rendimiento:

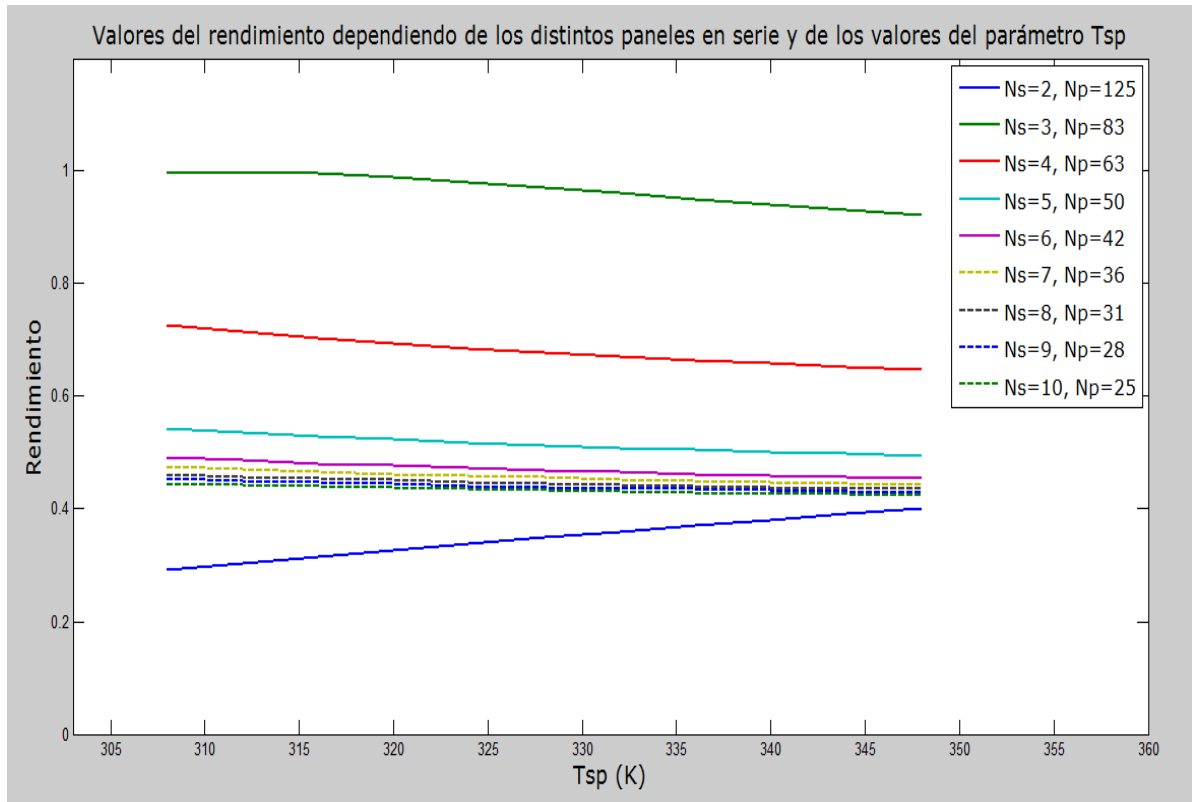


Figura 45: Variación del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en serie y del parámetro Tsp

Observando la gráfica anterior, podemos concluir que en el rango de valores de temperaturas de entrada al electrolizador estudiado, la configuración óptima de paneles en serie y paralelo de la instalación fotovoltaica es de 3 paneles en serie y 83 paneles en paralelo y no se aprecia en la gráfica que dicha configuración pueda cambiar en algún momento.

Por tanto, el parámetro T_{sp} no influye apenas en nuestro estudio.



6. Conclusiones

Variando los parámetros un 10% ascendente o descendientemente hay parámetros cuya variación apenas influye en nuestro estudio.

En ningún caso de los estudiados se obtiene una configuración que proporcione mayor rendimiento al acoplarse la instalación fotovoltaica con el electrolizador que la configuración base, 3 paneles en serie y 83 en paralelo, aunque en algunos casos esta configuración podría cambiar si variamos nuestros parámetros más de un 10%.

Se obtienen las siguientes conclusiones de los parámetros estudiados:

- **Resistencia en serie R_s :**

La curva característica de la instalación fotovoltaica se contrae si aumentamos este parámetro un 10% y se expande si lo disminuimos un 10% como muestra su gráfica Corriente-Voltaje. Por tanto, al disminuir este parámetro y en el caso base obtenemos más de los 5000 W que necesita el electrolizador, pero al aumentarlo no se alcanzan los 5000 W necesarios. El rendimiento de acoplamiento y el energético apenas varían del caso de referencia.

Siempre se va a tener la configuración óptima de 3 paneles en serie y 83 en paralelo.

Por tanto, se puede concluir que las modificaciones de esta resistencia en serie R_s no influyen en nuestro estudio.

- **Resistencia en paralelo R_{sh} :**

Al modificar este parámetro no se aprecia variación alguna en su curva Corriente-Voltaje y los valores de potencias y rendimientos que se obtienen al aumentar o disminuir este parámetro son idénticos a los del caso base.

La configuración de 3 paneles en serie y 83 en paralelo siempre va a ser la óptima.

Como conclusión se puede decir que las variaciones de esta resistencia en paralelo R_{sh} no influyen en nada en nuestro estudio, siendo el parámetro que menos modifica dicho estudio.

- **Corriente fotogenerada o de cortocircuito I_{ph} :**

Lógicamente, al aumentar este parámetro la curva característica de la instalación fotovoltaica se expande y al disminuir este parámetro la curva característica de la instalación fotovoltaica se contrae. Por tanto, si disminuimos este parámetro un 10% no se alcanza los 5000 W que necesita el electrolizador, pero en el caso base y al aumentar este parámetro un 10% si se



alcanzan dichos 5000 W. En el caso de referencia es cuando se obtiene un mayor rendimiento de acoplamiento, aunque es al aumentar el parámetro un 10% cuando se obtiene mayor rendimiento energético debido a que se obtiene mayor caudal de hidrógeno.

La configuración óptima siempre va a ser de 3 paneles en serie y 83 en paralelo aunque al observar la curva Rendimiento- I_{ph} podemos concluir que si aumentamos este parámetro más de un 10% podría llegar el momento en que esta configuración óptima cambie a 4 paneles en paralelo y 63 en serie.

Se puede concluir que las modificaciones de esta corriente fotogenerada I_{ph} no influyen en el rango de nuestro estudio, aunque podría influir en mayores variaciones de rango de este parámetro.

- **Corriente inversa de saturación del diodo I_r :**

Al visualizar la gráfica Corriente-Voltaje no se aprecia variación en la curva característica, pero si visualizamos los zoom podemos ver que al aumentar este parámetro un 10% la curva característica de la instalación fotovoltaica se contrae y al disminuir este parámetro un 10% la curva característica se expande. Por tanto, si aumentamos este parámetro no alcanzamos los 5000 W necesarios de potencia útil que sí obtenemos en el caso base y al disminuir el parámetro. Los mayores valores de rendimientos se obtienen al disminuir un 10% este parámetro.

Se observa en la gráfica Rendimiento- I_r que la configuración óptima de paneles va a ser la configuración base.

Concluimos que las variaciones de esta corriente de saturación inversa del diodo I_r no influyen en nuestro estudio.

- **Actividad de especies a:**

Al aumentar este parámetro, la curva característica de la instalación fotovoltaica se expande significativamente y al disminuir el parámetro la curva se contrae notoriamente. Esto implica que si disminuimos el parámetro un 10% nos faltaría mucho para obtener los 5000 W necesarios del electrolizador. Estos 5000 W sí los obtenemos en el caso base y al aumentar el parámetro. Se obtienen unos rendimientos muy bajos al disminuir el parámetro y, aunque, en el caso de referencia se obtiene el mayor rendimiento de acoplamiento, es al aumentar el parámetro cuando se obtiene el mayor rendimiento energético debido a que se obtiene un caudal de hidrógeno mayor en este caso porque la intensidad de corriente es mayor.

Las curvas rendimiento-a tienen una variación bastante significativa. En el rango de valores de a estudiado se mantiene la configuración óptima de 3 paneles en serie y 83 en paralelo, pero se puede observar que esta configuración podría cambiar a 4 paneles en serie y 64 en paralelo si seguimos disminuyendo el parámetro.



Se concluye que este parámetro es el que más influye en el estudio realizado y es el que hay que tener más en cuenta.

- **Temperatura de entrada al electrolizador T_{sp} :**

Al visualizar la figura 48 observamos cómo aumenta la pendiente de la curva característica del electrolizador al aumentar la temperatura de entrada al electrolizador. La potencia útil disminuye al aumentar dicha temperatura y a partir de 318 K no se alcanzan los 5000 W que necesita el electrolizador. El rendimiento de acoplamiento también disminuye. El caudal de hidrógeno obtenido disminuye al aumentar la temperatura y por consiguiente disminuye el rendimiento energético.

Se mantiene a lo largo del rango de valores estudiados la configuración óptima de 3 paneles en serie y 83 en paralelo.

Se concluye que no es bueno aumentar la temperatura de entrada al electrolizador T_{sp} en nuestro estudio, aunque no modifica la configuración de referencia de paneles en serie y paralelo.



7. Anexos (Códigos de Matlab)

```
%CURVA CARACTERÍSTICA DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO DEPENDIENDO DE LA
%RADIACIÓN SOLAR
%FIGURA 5

G_v=[673,850,1000];
Iph_v=5.325*10^(-3)*G_v+0.016275;

Ir=1.03819e-17;
a=0.116;
Rs=0.0822;
Rsh=10000;

x_vector=linspace(0,5,150);
y_vector=zeros(3,length(x_vector));

for i=1:3;
    f=@(x,y) Iph_v(i)-Ir*(exp((x+y*Rs)/a)-1)-(x+y*Rs)/Rsh-y;

    n=length(x_vector);
    opt=optimset('display','off');

    y_vector(i,1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);
for j=2:1:n
    y_vector(i,j)=fzero(@(y) f(x_vector(j),y),y_vector(i,j-1),opt);
end

end

plot(x_vector,y_vector(1,:),x_vector,y_vector(2,:),x_vector,y_vector(3
,:), 'LineWidth',2.5)
grid
ylim([0 6])
xlim([0 5])

title('Curva característica del módulo
fotovoltaico','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize',14);

leyenda=legend('E = 673 W/m^2','E = 850 W/m^2','E = 1000 W/m^2');
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',15);
```



%CURVA CARACTERÍSTICA MÓDULO FOTOVOLTAICO

%FIGURA 6

```
G=1000;
Iph=5.325*10^(-3)*G+0.016275;
Ir=1.03819e-17;
a=0.116;
Rs=0.0822;
Rsh=10000;

x_vector=linspace(0,5,150);
y_vector=zeros(size(x_vector));

f=@(x,y) Iph-Ir*(exp((x+y*Rs)/a)-1)-(x+y*Rs)/Rsh-y;

n=length(x_vector);
opt=optimset('display','off');

y_vector(1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);
for j=2:1:n
    y_vector(j)=fzero(@(y) f(x_vector(j),y),y_vector(j-1),opt);
end

Pot=x_vector.*y_vector;
Pot_max=max(Pot)
[Pot,indice]=max(Pot);
I_max=x_vector(indice)
V_max=y_vector(indice)

plot(x_vector,y_vector,'r','LineWidth',3)
hold on
plot(I_max,V_max,'k.','MarkerSize',20)
hold off
grid

ylim([0 6])
xlim([0 5])

title('Curva característica del módulo
fotovoltaico','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize',14);
```




%CURVA CARACTERÍSTICA DEL ELECTROLIZADOR DEPENDIENDO DE LA TEMPERATURA
%DE ENTRADA DE AGUA AL ELECTROLIZADOR

%FIGURA 18

```
x_vector=linspace(0,15,150);
l=@(x) 2.462*x-19.35;
h=@(x) 2.712*x-20.81;
m=@(x) 2.949*x-22.29;
q=@(x) 3.381*x-25.65;

plot(x_vector,l(x_vector),x_vector,h(x_vector),x_vector,m(x_vector),x_
vector,q(x_vector),'LineWidth',2.5)
grid

ylim([0 15])
xlim([7 15])
title('Curva característica del
electrolizador','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize',14);

leyenda=legend('Tsp = 289 K','Tsp = 300 K','Tsp = 308 K','Tsp = 318
K');
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',15);
```

%CURVA CARACTERÍSTICA DEL ELECTROLIZADOR DE NUESTRO ESTUDIO Tsp=308 K

%FIGURA 19

```
x_vector=linspace(0,15,150);
l=@(x) 2.949*x-22.29;

plot(x_vector,l(x_vector),'r','LineWidth',2)
grid

ylim([0 15])
xlim([7 14])

title('Curva característica del
electrolizador','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize',14);
```



% DISTINTAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA
% DEPENDIENDO DE LAS CONFIGURACIONES DE PANELES EN SERIE Y PARALELO
 % FIGURAS 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28

```
Np=83; %Variamos los distintos paneles en paralelo de las
configuraciones
Ns=3; %Variamos los distintos paneles en serie de las configuraciones
Nt=Np*Ns;
```

```
G=1000;
Iph=5.325*10^(-3)*G+0.016275;
Ir=1.03819e-17;
a=0.116;
Rs=0.0822;
Rsh=10000;
```

```
x_c=10;
```

```
f=@(x,y) Np*Iph-Np*Ir*(exp((x/Ns+y*Rs/Np)/a)-1)-
Np*(x/Ns+y*Rs/Np)/Rsh-y;
```

```
x_vector=linspace(0,20,150);
n=length(x_vector);
opt=optimset('display','off');
y_vector=zeros(size(x_vector));
y_vector(1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);
for i=2:1:n
    y_vector(i)=fzero(@(y) f(x_vector(i),y),y_vector(i-1),opt);
end
```

```
Pm=20;
Pfv=Pm*Nt;
Phid=150;
l=@(x) (2.949*Pfv/Phid)*x-22.29*Pfv/Phid;
```

```
x_c=fzero(@(x) interp1(x_vector,y_vector,x)-l(x),x_c,opt)
y_c=l(x_c)
P_c=x_c*y_c
```

```
Pot=x_vector.*y_vector;
Pot_max=max(Pot)
[Pot,indice]=max(Pot);
I_max=x_vector(indice)
V_max=y_vector(indice)
```

```
plot(x_vector,y_vector,'r',x_vector,l(x_vector),'b','LineWidth',3)
hold on
plot(I_max,V_max,'k.','MarkerSize',20)
hold off
grid
```

```
ylim([0 550])
xlim([0 15])
```

```
title('Curva característica de la instalación fotovoltaica y del
electrolizador','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize',14);
```



```
leyenda=legend('Curva Característica Instalación Fotovoltaica','Curva  
Característica Electrolizador','Punto de Máxima Potencia');  
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',15);
```

```
%ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE LOS  
%PARÁMETROS ESTUDIADOS  
%FIGURA 29, 32, 35, 38 y 41
```

```
Nt=249;  
Ns=3;  
Np=83;  
  
G=1000;  
Iph=5.325*10(-3)*G+0.016275;  
Iph_pos=1.1*Iph;  
Iph_neg=0.9*Iph;  
  
Ir=1.03819e-17;  
Ir_pos=1.1*Ir;  
Ir_neg=0.9*Ir;  
  
a=0.116;  
a_pos=1.1*a;  
a_neg=0.9*a;  
  
Rs=0.0822;  
Rs_pos=1.1*Rs;  
Rs_neg=0.9*Rs;  
  
Rsh=10000;  
Rsh_pos=1.1*Rsh;  
Rsh_neg=0.9*Rsh;  
  
Pm=20;  
Phid=150;  
Phid_v=Phid-Phid/10:Phid/50:Phid+Phid/10;  
  
x_vector=linspace(0,20,150);  
n=length(x_vector);  
opt=optimset('display','off');  
y_vector=zeros(size(x_vector));  
  
xp_vector=linspace(0,20,150);  
np=length(xp_vector);  
optp=optimset('display','off');  
yp_vector=zeros(size(xp_vector));  
  
xn_vector=linspace(0,20,150);  
nn=length(xn_vector);  
optn=optimset('display','off');  
yn_vector=zeros(size(xn_vector));
```



```

x_c=10;

%A continuación se van modificando los distintos parámetros estudiados
f=@(x,y) Np*Iph-Np*Ir*(exp((x/Ns+y*Rs/Np)/a)-1)-
Np*(x/Ns+y*Rs/Np)/Rsh-y;
y_vector(1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);
for i=2:1:n
    y_vector(i)=fzero(@(y) f(x_vector(i),y),y_vector(i-1),opt);
end

g=@(xp,yp) Np*Iph-Np*Ir*(exp((xp/Ns+yp*Rs/Np)/a_pos)-1)-
Np*(xp/Ns+yp*Rs/Np)/Rsh-yp;
yp_vector(1)=fzero(@(yp) g(xp_vector(1),yp),3.5,optp);
for i=2:1:n
    yp_vector(i)=fzero(@(yp) g(xp_vector(i),yp),yp_vector(i-1),optp);
end

h=@(xn,yn) Np*Iph-Np*Ir*(exp((xn/Ns+yn*Rs/Np)/a_neg)-1)-
Np*(xn/Ns+yn*Rs/Np)/Rsh-yn;
yn_vector(1)=fzero(@(yn) h(xn_vector(1),yn),3.5,optn);
for i=2:1:n
    yn_vector(i)=fzero(@(yn) h(xn_vector(i),yn),yn_vector(i-1),optn);
end

l=@(x) (2.949*Pm*Nt/Phid)*x-22.29*Pm*Nt/Phid;

x_c=fzero(@(x) interp1(x_vector,y_vector,x)-l(x),x_c,opt)
y_c=l(x_c)
P=x_c*y_c
rend=P/(Nt*20.1904)
npunto=P*0.0112988/4400
PCS=141860;
rend_ener=(PCS*npunto*2.01594)/(1000*249*0.15)

Pot=x_vector.*y_vector;
Pot_max=max(Pot)
[Pot,indice]=max(Pot);
V_max=x_vector(indice)
I_max=y_vector(indice)

xp_c=fzero(@(xp) interp1(xp_vector,yp_vector,xp)-l(xp),x_c,opt)
yp_c=l(xp_c)
Pp=xp_c*yp_c
npunto_pos=Pp*0.0112988/4400
rend_ener_pos=(PCS*npunto_pos*2.01594)/(1000*249*0.15)

Pot_pos=xp_vector.*yp_vector;
Pot_maxp=max(Pot_pos)
[Pot_pos,indice_pos]=max(Pot_pos);
Vp_max=xp_vector(indice_pos)
Ip_max=yp_vector(indice_pos)

rendp=Pp/Pot_maxp

xn_c=fzero(@(xn) interp1(xn_vector,yn_vector,xn)-l(xn),x_c,opt)
yn_c=l(xn_c)

```



```
Pn=xn_c*yn_c
npunto_neg=Pn*0.0112988/4400
rend_ener_neg=(PCS*npunto_neg*2.01594)/(1000*249*0.15)

Pot_neg=xn_vector.*yn_vector;
Pot_maxn=max(Pot_neg)
[Pot_neg, indice_neg]=max(Pot_neg);
Vn_max=xn_vector(indice_neg)
In_max=yn_vector(indice_neg)

rendn=Pn/Pot_maxn

plot(x_vector,y_vector,'-r','LineWidth',2.5)
hold on
plot(xp_vector,yp_vector,'--g','LineWidth',2.5)
plot(xn_vector,yn_vector,'-.c','LineWidth',2.5)
plot(x_vector,l(x_vector),'-b','LineWidth',2.5)
plot(V_max,I_max,'k.','MarkerSize',15)
plot(Vp_max,Ip_max,'k.','MarkerSize',15)
plot(Vn_max,In_max,'k.','MarkerSize',15)
hold off
grid

ylim([0 500])
xlim([0 16])
title('Curva característica de la instalación fotovoltaica y del
electrolizador','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize',14);
leyenda=legend('a','a + 0.1*a','a - 0.1*a','Electrolizador','Puntos de
Máxima Potencia');
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',15);
```



%RENDIMIENTO DEPENDIENDO DE CADA PARÁMETRO DE LA INSTALACIÓN
%FOTOVOLTAICA Y DE LA CONFIGURACIÓN DE PANELES EN SERIE Y PARALELO
%FIGURAS 31, 34, 36, 40 y 42

```
G=1000;
Iph=5.325*10^(-3)*G+0.016275;
Iph_v=Iph-Iph/10:Iph/50:Iph+Iph/10;

Ir=1.03819e-17;
Ir_v=Ir-Ir/10:Ir/50:Ir+Ir/10;

a=0.116;
a_v=a-a/10:a/50:a+a/10;

Rs=0.0822;
Rs_v=Rs-Rs/10:Rs/50:Rs+Rs/10;

Rsh=10000;
Rsh_v=Rsh-Rsh/10:Rsh/50:Rsh+Rsh/10;

x_vector=linspace(0,20,150);
n=length(x_vector);
opt=optimset('display','off');
y_vector=zeros(size(x_vector));

x_c=10;
cont_i2=1;

for i_2=2:1:10
    Ns=i_2;
    Nt=250;
    Np=round(Nt/Ns);

    for i_1=1:1:11
        %A continuación se van modificando los parámetros estudiados
        f=@(x,y) Np*Iph-Np*Ir*(exp((x/Ns+y*Rs_v(i_1)/Np)/a)-1)-
        Np*(x/Ns+y*Rs/Np)/Rsh-y;

        y_vector(1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);
    for i=2:1:n
        y_vector(i)=fzero(@(y) f(x_vector(i),y),y_vector(i-1),opt);
    end

        l=@(x) (2.949*Pm*Nt/Phid)*x-22.29*Pm*Nt/Phid;

        x_c=fzero(@(x) interp1(x_vector,y_vector,x)-l(x),x_c,opt);
        y_c=l(x_c);

        Q(cont_i2,i_1)=x_c*y_c;
        Pot=x_vector.*y_vector;
        Pot_max=max(Pot);
        P(cont_i2,i_1)=Pot_max;

    end
    cont_i2=cont_i2+1;
end
```



```
rend=Q./P;
plot(Rs_v,rend(1:5,:), '-',Rs_v,rend(6:cont_i2-1,:), '--','LineWidth',2)

ylim([0 1.2])
title('Valores del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en
serie y en paralelo y de los valores del parámetro
Rs','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Rs (Ohmios)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Rendimiento','FontName','Verdana','FontSize',14);

leyenda=legend('Ns=2, Np=125','Ns=3, Np=83','Ns=4, Np=63','Ns=5,
Np=50','Ns=6, Np=42','Ns=7, Np=36','Ns=8, Np=31','Ns=9, Np=28','Ns=10,
Np=25');
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',13);
```

%CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL ELECTROLIZADOR DEPENDIENDO DE LAS
%TEMPERATURAS DE ENTRADA AL ELECTROLIZADOR
%FIGURA 43

```
Tsp=289;

Nt=249;
Ns=3;
Np=83;

G=1000;
Iph=5.325*10^(-3)*G+0.016275;
Ir=1.03819e-17;
a=0.116;
Rs=0.0822;
Rsh=10000;
Pm=20;
Phid=150;

x_vector=linspace(0,20,150);
n=length(x_vector);
opt=optimset('display','off');
y_vector=zeros(size(x_vector));

x_c=10;
x35_c=10;
x45_c=10;
x55_c=10;
x65_c=10;
x75_c=10;

f=@(x,y) Np*Iph-Np*Ir*(exp((x/Ns+y*Rs/Np)/a)-1)-
Np*(x/Ns+y*Rs/Np)/Rsh-y;
y_vector(1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);
for i=2:1:n
    y_vector(i)=fzero(@(y) f(x_vector(i),y),y_vector(i-1),opt);
end
```



```

l=@ (x) (2.949*Pm*Nt/Phid) *x-22.29*Pm*Nt/Phid;
g=@ (x) (3.381*Pm*Nt/Phid) *x-25.65*Pm*Nt/Phid;
h=@ (x) (3.813*Pm*Nt/Phid) *x-29.01*Pm*Nt/Phid;
m=@ (x) (4.245*Pm*Nt/Phid) *x-32.37*Pm*Nt/Phid;
t=@ (x) (4.677*Pm*Nt/Phid) *x-35.73*Pm*Nt/Phid;

Pot=x_vector.*y_vector;
Pot_max=max(Pot)
[Pot, indice]=max(Pot);
I_max=x_vector(indice)
V_max=y_vector(indice)

x35_c=fzero(@ (x) interp1(x_vector,y_vector,x)-l(x),x35_c,opt)
y35_c=l(x35_c)
P35=x35_c*y35_c
npunto35=P35*0.0112988/4400
PCS=141860000;
rend35=P35/Pot_max
rend_ener35=(PCS*npunto35*2.01594/1000)/(1000*249*0.15)

x45_c=fzero(@ (x) interp1(x_vector,y_vector,x)-g(x),x45_c,opt)
y45_c=g(x45_c)
P45=x45_c*y45_c
npunto45=P45*0.0112988/4400
rend45=P45/Pot_max
rend_ener45=(PCS*npunto45*2.01594/1000)/(1000*249*0.15)

x55_c=fzero(@ (x) interp1(x_vector,y_vector,x)-h(x),x55_c,opt)
y55_c=h(x55_c)
P55=x55_c*y55_c
npunto55=P55*0.0112988/4400
rend55=P55/Pot_max
rend_ener55=(PCS*npunto55*2.01594/1000)/(1000*249*0.15)

x65_c=fzero(@ (x) interp1(x_vector,y_vector,x)-m(x),x65_c,opt)
y65_c=m(x65_c)
P65=x65_c*y65_c
npunto65=P65*0.0112988/4400
rend65=P65/Pot_max
rend_ener65=(PCS*npunto65*2.01594/1000)/(1000*249*0.15)

x75_c=fzero(@ (x) interp1(x_vector,y_vector,x)-t(x),x75_c,opt)
y75_c=t(x75_c)
P75=x75_c*y75_c
npunto75=P75*0.0112988/4400
rend75=P75/Pot_max
rend_ener75=(PCS*npunto75*2.01594/1000)/(1000*249*0.15)

plot(x_vector,y_vector,'-r','LineWidth',2.5)
hold on
plot(x_vector,l(x_vector),'--g','LineWidth',2.5)
plot(x_vector,g(x_vector),'-.c','LineWidth',2.5)
plot(x_vector,h(x_vector),':b','LineWidth',2.5)
plot(x_vector,m(x_vector),'-m','LineWidth',2.5)

```




```

plot(x_vector,t(x_vector),'-y','LineWidth',2.5)
plot(I_max,V_max,'k.','MarkerSize',15)
hold off
grid

ylim([0 500])
xlim([0 16])
xlabel('Tensión (V)','FontName','Verdana','FontSize', 14);
ylabel('Corriente (A)','FontName','Verdana','FontSize', 14);
title('Curva característica de la instalación fotovoltaica y del
electrolizador','FontName','Verdana','FontSize', 14);
leyenda=legend('Instalación Fotovoltaica','Electrolizador: Tsp = 308
K','Electrolizador: Tsp = 318 K','Electrolizador: Tsp = 328
K','Electrolizador: Tsp = 338 K','Electrolizador: Tsp = 348 K','Punto
de Máxima Potencia');
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',15);

```

%RENDIMIENTO DEPENDIENDO DE LA TEMPERATURA DE ENTRADA AL
%ELECTROLIZADOR Y DE LOS PANELES EN SERIE Y PARALELO
%FIGURA 44

```

cp=14.30;
Tsp=308;
Tsp_v=Tsp:(348-308)/10:348
Tmax=333;
Tmax_v=Tmax-Tmax/10:Tmax/50:Tmax+Tmax/10;

G=1000;
Iph=5.325*10^(-3)*G+0.016275;
Iph_v=Iph-Iph/10:Iph/50:Iph+Iph/10;
Ir=1.03819e-17;
Ir_v=Ir-Ir/10:Ir/50:Ir+Ir/10;
a=0.116;
a_v=a-a/10:a/50:a+a/10;
Rs=0.0822;
Rs_v=Rs-Rs/10:Rs/50:Rs+Rs/10;
Rs_pos=1.1*Rs;
Rsh=10000;
Rsh_v=Rsh-Rsh/10:Rsh/50:Rsh+Rsh/10;

Pm=20;
Pm_v=Pm-Pm/10:Pm/50:Pm+Pm/10;
Phid=150;
Phid_v=Phid-Phid/10:Phid/50:Phid+Phid/10;

L=2.949;
L_v=2.949:(4.677-2.949)/10:4.677;

M=22.29;
M_v=22.29:(35.73-22.29)/10:35.73;

x_vector=linspace(0,20,150);

```



```

n=length(x_vector);
opt=optimset('display','off');
y_vector=zeros(size(x_vector));

x_c=10;
cont_i2=1;

for i_2=2:1:10
    Ns=i_2;
    Nt=250;
    Np=round(Nt/Ns);

    for i_1=1:1:11

        f=@(x,y) Np*Iph-Np*Ir*(exp((x/Ns+y*Rs/Np)/a)-1)-
        Np*(x/Ns+y*Rs/Np)/Rsh-y;
        y_vector(1)=fzero(@(y) f(x_vector(1),y),3.5,opt);

    for i=2:1:n
        y_vector(i)=fzero(@(y) f(x_vector(i),y),y_vector(i-1),opt);
    end

    l=@(x) (L_v(i_1)*Pm*Nt/Phid)*x-M_v(i_1)*Pm*Nt/Phid;

    x_c=fzero(@(x) interp1(x_vector,y_vector,x)-l(x),x_c,opt);
    y_c=l(x_c);

    Q(cont_i2,i_1)=x_c*y_c;
    Pot=x_vector.*y_vector;
    Pot_max=max(Pot);
    P(cont_i2,i_1)=Pot_max;

end
    cont_i2=cont_i2+1;
end

rend=Q./P;

plot(Tsp_v,rend(1:5,:),'-',Tsp_v,rend(6:cont_i2-1,:),'--',
'LineWidth',2)

ylim([0 1.2])
title('Valores del rendimiento dependiendo de los distintos paneles en
serie y de los valores del parámetro
Tsp','FontName','Verdana','FontSize',14);
xlabel('Tsp (K)','FontName','Verdana','FontSize',14);
ylabel('Rendimiento','FontName','Verdana','FontSize',14);

leyenda=legend('Ns=2, Np=125','Ns=3, Np=83','Ns=4, Np=63','Ns=5,
Np=50','Ns=6, Np=42','Ns=7, Np=36','Ns=8, Np=31','Ns=9, Np=28','Ns=10,
Np=25');
set(leyenda,'FontName','Verdana','FontUnits','points','FontSize',13);

```



8. Bibliografía

- Ziyun Su, Shuiting Ding, Zhiwen Gan, Xioayi Yang (2014). "Optimization and sensitivity analysis of a photovoltaic-electrolyser direct-coupling system in Beijing". International journal of hydrogen energy 39 7202-7215.
- Isidoro Lillo Bravo (2014). *Teoría y problemas "Instalaciones Fotovoltaicas"*. Universidad de Sevilla.
- Luis Muñoz Sánchez (2011). *"Medida y caracterización de la generación fotovoltaica de hidrógeno por electrólisis asistida con residuos orgánicos"*. Proyecto fin de carrera. Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Juan David Velásques Piedrahíta, Jonh Fredy Quinceno Castañeda (2013). *"Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis"*. Proyecto fin de carrera. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Resu Iturri Buzunáriz (2011). *"Revisión bibliográfica y caracterización de células solares en polarización inversa"*. Proyecto fin de carrera. Universidad Pública de Navarra.
- José Luis Balenzategui Manzanares (2007). *"Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica: La Célula Solar"*. Máster en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008. Módulo: Gestión Eficiente de la Energía
- *"Parámetros de la célula solar"*. LuQentia.
- Natalia López Podestá (2006). *"Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de agua"*. Proyecto fin de carrera. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.
- Pedro José Débora. *"Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil"*. Proyecto fin de carrera. Universidad de Madrid.
- Salvador Delgado Fernández (2015). *"Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica"*. Trabajo fin de grado. Universidad de Sevilla.