

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de  
sistemas de producción de hidrogeno a partir de  
energía solar fotovoltaica

Autor: Salvador Delgado Fernández

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Grado  
Grado en ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica**

Autor:

Salvador Delgado Fernández

Tutor:

Manuel Felipe Rosa Iglesias

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

# Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica

---

Trabajo Fin de Grado: Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica

Autor: Salvador Delgado Fernández

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, 2015

El Secretario del Tribunal

## Agradecimientos

En primer lugar, a Felipe Rosa, tutor del trabajo, por facilitarme la elaboración de este en los instantes acertados.

A muchos, que de una manera directa o indirecta, han amenizado y sazonado las innumerables horas dedicadas durante el devenir, y aún porvenir, de la formación como ingeniero.

Sin más dilación, a los más allegados, ya que han sido ellos los que han padecido los días turbios por delante de los brillantes. Mi más sincera gratitud.

## Resumen

La dependencia energética hacia los combustibles fósiles es una realidad con fecha de caducidad. Por un lado las fuentes de energía fósiles tienen una reserva limitada, aunque es cierto que la investigación de nuevos métodos de extracción que rentabilice estas fuentes nunca ha cesado, y por otro la emisión de gases de efecto invernadero cada vez es un tema de mayor calado social, con una mayor concienciación y una legislación más estricta.

Las energías renovables reúnen una serie de características que las posicionan como la solución a la dependencia energética de los países hacia los combustibles de hidrocarburos. Sin embargo, un rasgo que caracteriza a las energías renovables es su intermitencia, ya que estas están supeditadas a las condiciones climáticas. Es aquí donde aparece el hidrogeno como vector energético con la cualidad de poder homogeneizar la producción de las renovables para abastecer la demanda.

Ante este escenario se decide la elaboración de este trabajo. A partir de una de las principales fuentes de energía renovables, la solar, estudiar su trabajo en conjunto con el hidrogeno, analizando los parámetros de diseño que comprende un panel fotovoltaico para esclarecer en la incertidumbre que estos muestran, cuál de ellos adquiere protagonismo o requiere un trato más meticuloso a la hora del acople con un electrolizador para la obtención de hidrogeno.

# Índice

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	1
1.3. ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO.....	1
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUCCIÓN PANORAMA ENERGÉTICO ACTUAL .....	3
2.2. ENERGÍAS RENOVABLES .....	4
2.2.1. <i>Eólica</i> .....	5
2.2.2. <i>Solar</i> .....	7
2.2.2.1. Fotovoltaica.....	7
2.2.2.2. Termoelectrónica.....	10
2.2.3. <i>Geotérmica</i> .....	11
2.2.4. <i>Biomasa</i> .....	12
2.2.5. <i>Hidráulica</i> .....	12
2.2.6. <i>Oceánica</i> .....	14
2.3. ESTADO DEL ARTE DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA .....	14
2.4. EL HIDROGENO Y SISTEMAS HÍBRIDOS .....	17
2.4.1. <i>Electrólisis</i> .....	22
2.4.1.1. Electrólisis ácida .....	22
2.4.1.2. Electrólisis alcalina .....	24
2.4.2. <i>Electrolizador</i> .....	25
2.4.3. <i>Sistemas híbridos</i> .....	28
<b>3. MODELOS MATEMÁTICOS.....</b>	<b>30</b>
3.1. GENERADOR FOTOVOLTAICO .....	30
3.1.1. <i>Célula fotovoltaica</i> .....	30
3.1.1.1. Catálogo del fabricante.....	30
3.1.2. <i>Circuito equivalente básico</i> .....	32
3.1.3. <i>Circuito equivalente de partida</i> .....	35
3.1.3.1. Circuito equivalente .....	39
3.1.3.2. Método de resolución .....	40
3.1.3.3. Sistema de ecuaciones .....	41
3.2. ELECTROLIZADOR .....	44
3.2.1. <i>Modelo termodinámico</i> .....	44
3.2.2. <i>Modelo electroquímico</i> .....	46
3.2.3. <i>Modelo térmico</i> .....	48
<b>4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....</b>	<b>50</b>



Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica

---

4.1.	PUNTO DE FUNCIONAMIENTO NOMINAL .....	50
4.1.1.	<i>Electrolizador</i> .....	50
4.1.2.	<i>Módulos fotovoltaicos</i> .....	52
4.1.3.	<i>Acople</i> .....	56
4.2.	DESARROLLO DEL ANÁLISIS Y VALORES NUMÉRICOS .....	57
4.2.1.	<i>Parámetro <math>RS</math></i> .....	58
4.2.2.	<i>Parámetro <math>\lambda</math></i> .....	62
4.2.3.	<i>Parámetro <math>I_o</math></i> .....	67
4.2.4.	<i>Parámetro <math>IL</math></i> .....	72
5.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	77
5.1.	PARÁMETRO $RS$ .....	77
5.2.	PARÁMETRO $\lambda$ .....	78
5.3.	PARÁMETRO $I_o$ .....	80
5.4.	PARÁMETRO $IL$ .....	81
6.	CONCLUSIONES .....	83
ANEXO A: CÓDIGO EES.....		85
REFERENCIAS .....		96
BIBLIOGRAFÍA.....		97

## Índice de figuras

<i>Figura 2-1: Potencia eléctrica de origen eólico instalada a nivel mundial (GWEC, 2013)</i>	6
<i>Figura 2-2: Potencia eléctrica de origen eólico acumulada a nivel mundial (GWEC, 2013)</i>	6
<i>Figura 2-3: Generación eólica onshore y proyección a medio plazo ( Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013, OECD/IEA )</i>	7
<i>Figura 2-4: Generación eólica offshore y proyección a medio plazo ( Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013, OECD/IEA )</i>	7
<i>Figura 2-5: Evolución de la potencia PV instalada en todo el mundo ( IEA. 2013)</i>	8
<i>Figura 2-6: Precio del panel fotovoltaico de panel plano (en euros por vatio pico) en función de la producción acumulada (Marta Victoria y Rodrigo Moretón, 2013)</i>	9
<i>Figura 2-7: Número de unidades de PV manufacturadas por distintas naciones (SPV Market Research (2014), Photovoltaic manufacturer Shipments: Capacity, Price &amp; Revenues 2013)</i>	9
<i>Figura 2-8: Cobertura de la demanda mediante energía PV en 2013 (IEA, 2013)</i>	10
<i>Figura 2-9:Potencia solar térmica generada y proyecto a medio plazo por regiones (IEA, 2013)</i>	10
<i>Figura 2-10: Potencia eléctrica geotérmica instalada en los principales países productores en 2013 (EPI, 2013 )</i>	11
<i>Figura 2-11: Estimación del crecimiento de la potencia instalada de biomasa (IEA, 2013)</i>	12
<i>Figura 2-12: Potencia hidroeléctrica generado y proyecto a medio plazo por regiones (IEA, 2013)</i>	13
<i>Figura 2-13: Potencia oceánica generado y proyecto a medio plazo por regiones (IEA, 2013)</i>	14
<i>Figura 2-15: Distintos tipos de pilas de combustibles existentes (Agencia Andaluza de la Energía, 2010)</i>	20
<i>Figura 2-16: Hoja de ruta para una economía del hidrogeno (Directorate-General for Reserach, European Commision, 2003; Pino, 201</i>	21
<i>Figura 2-17: Cadena de producción del hidrogeno (Agencia Andaluza de la Energía, 2010)</i>	22
<i>Figura 2-18: Sistema energético basado en la electricidad y hidrogeno como vectores energéticos (Sherif, Barbir, &amp; Vezirolu, 2005; Pino, 2010)</i>	20
<i>Figura 2-19: Principio de operación y esquema básico de la célula electrolítica de un electrolizador PEM (R. García-Valverde, 2011)</i>	23
<i>Figura 2-20:Principio de operación y esquema básico de una célula de un electrolizador alcalino (Ulleberg, 2003)</i>	25
<i>Figura 2-21: Esquema de conexión de un electrolizador unipolar (Ulleberg, 2003)</i>	26
<i>Figura 2-22: Esquema de conexión de un electrolizador bipolar (Ulleberg, 2003)</i>	27
<i>Figura 3-1:Curva característica de una célula fotovoltaica en condiciones estándar (Townsend, 1989)</i>	31
<i>Figura 3-2: Esquema de componentes físicos y principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica</i>	33
<i>Figura 3-3: Circuito equivalente de una célula fotovoltaica ideal (Townsend, 1989)</i>	33
<i>Figura 3-4:Curva I-V del diodo y de la célula (Townsend, 1989)</i>	35
<i>Figura 3-5:Circuito equivalente distribuido (Townsend, 1989)</i>	36
<i>Figura 3-6:Circuito equivalente de partida (Townsend, 1989)</i>	36
<i>Figura 3-7:Efecto de la resistencia en paralelo a altos niveles de irradiancia (Townsend, 1989)</i>	38
<i>Figura 3-8:Efecto de la resistencia en paralelo a bajos niveles de irradiancia (Townsend, 1989)</i>	38
<i>Figura 3-9: Circuito equivalente “UP” (Townsend, 1989)</i>	39
<i>Figura 3-10: Valores de los parámetros obtenidos a través de los métodos de resolución de la curva I-V (Townsend, 1989)</i>	41
<i>Figura 3-11: Curva I-V para una célula fotovoltaica a diferentes temperaturas (Ulleberg, 2003)</i>	45

<i>Figura 3-12:Influencia de la temperatura en la eficiencia de Faraday (Pino, 2010)</i>	47
<i>Figura 4-1: Curva característica I-V electrolizador a diferentes temperaturas</i>	52
<i>Figura 4-2: Curva característica módulo fotovoltaico a 25°C.</i>	53
<i>Figura 4-3: Conexión serie-paralelo módulos fotovoltaicos</i>	54
<i>Figura 4-4: Posibles configuraciones serie-paralelo de los módulos fotovoltaicos</i>	55
<i>Figura 4-5: Acople curvas características de los módulos fotovoltaicos y el electrolizador</i>	56
<i>Figura 4-6:Variación parámetro <b>RS</b>, curvas características.</i>	59
<i>Figura 4-7: Zoom - Variación parámetro <b>RS</b>, curvas características.</i>	59
<i>Figura 4-8: Curvas características nueva configuración caso <b>RS</b>.</i>	60
<i>Figura 4-9: Zoom curvas características nueva configuración caso <b>RS</b>.</i>	61
<i>Figura 4-10: Variación parámetro <math>\lambda</math>, curvas características.</i>	63
<i>Figura 4-11: Curvas características nueva configuración caso <math>\lambda</math>.</i>	64
<i>Figura 4-12: Zoom curvas características nueva configuración caso <math>\lambda</math>.</i>	64
<i>Figura 4-13: Parte 2 - Curvas características nueva configuración caso <math>\lambda</math>.</i>	65
<i>Figura 4-14: Zoom parte 2 - curvas características nueva configuración caso <math>\lambda</math>.</i>	65
<i>Figura 4-15: Variación parámetro <b>Io</b>, curvas características.</i>	68
<i>Figura 4-16: Zoom-variación parámetro <b>Io</b>, curvas características.</i>	68
<i>Figura 4-17: Curvas características nueva configuración caso <b>Io</b>.</i>	69
<i>Figura 4-18: Zoom curvas características nueva configuración caso <b>Io</b>.</i>	70
<i>Figura 4-19: Parte 2 - Curvas características nueva configuración caso <b>Io</b>.</i>	70
<i>Figura 4-20: Zoom parte 2 - curvas características nueva configuración caso <b>Io</b>.</i>	71
<i>Figura 4-21: Variación parámetro <b>IL</b>, curvas características.</i>	73
<i>Figura 4-22: Curvas características nueva configuración caso <b>IL</b>.</i>	74
<i>Figura 4-23: Zoom curvas características nueva configuración caso <b>IL</b>.</i>	74
<i>Figura 4-24: Parte 2 - Curvas características nueva configuración caso <b>IL</b>.</i>	75
<i>Figura 4-25: Zoom parte 2 - curvas características nueva configuración caso <b>IL</b>.</i>	75

## Índice de tablas

<i>Tabla 2-1: Superficie requerida para 1kWp según material de la célula (Lillo, 2014)</i>	16
<i>Tabla 4-1: Características técnicas del electrolizador</i>	50
<i>Tabla 4-2: Características técnicas del stack del electrolizado.</i>	51
<i>Tabla 4-3: Características eléctricas del módulo fotovoltaico</i>	53
<i>Tabla 4-4: Características térmicas del módulo fotovoltaico</i>	53
<i>Tabla 4-5: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <b>RS</b>)</i>	58
<i>Tabla 4-6: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <b>RS</b>)</i>	58
<i>Tabla 4-7: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <b>RS</b>)</i>	60
<i>Tabla 4-8: Parte 2 - Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <b>RS</b>)</i>	61
<i>Tabla 4-9: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <math>\lambda</math>)</i>	62
<i>Tabla 4-10: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <math>\lambda</math>)</i>	62
<i>Tabla 4-11: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <math>\lambda</math>)</i>	63
<i>Tabla 4-12: Parte 2 - Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <math>\lambda</math>)</i>	66
<i>Tabla 4-13: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <b>Io</b>)</i>	67
<i>Tabla 4-14: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <b>Io</b>)</i>	67
<i>Tabla 4-15: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <b>Io</b>)</i>	69
<i>Tabla 4-16: Parte 2 - Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <b>Io</b>)</i>	71
<i>Tabla 4-17: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <b>IL</b>)</i>	72
<i>Tabla 4-18: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso <b>IL</b>)</i>	72
<i>Tabla 4-19: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <b>IL</b>)</i>	73
<i>Tabla 4-20: Parte 2 - Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso <b>IL</b>)</i>	76

# 1. Objetivos

## 1.1. Introducción

En el panorama actual la necesidad de recursos energéticos alternativos es una realidad, tanto para la protección del medio ambiente como solución al agotamiento de los combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. Necesidad que se justifica en el crecimiento de la demanda, que irá aumentando a medida que la población lo haga y los países expandan sus economías.

La energía solar es limpia, común y se puede obtener en todos los lugares. Sin embargo al igual que el resto de energías renovables es intermitente, y he aquí el papel del hidrogeno como vector energético.

Entre las diferentes bondades que presenta el hidrogeno que justifica su apelativo como “vector energético del futuro” habría que hacer mención a que es una energía limpia, se produce a partir de agua y al combustionar reacciona con el oxigeno produciendo agua sin emitir dióxido, y no solo se puede producir a partir de energía solar, sino también de diferentes fuentes, tanto renovables como no. De forma añadida se puede almacenar y transportar de diversas maneras, y su transformación a energía eléctrica presenta una eficiencia mayor que otros combustibles.

## 1.2. Objetivos del trabajo

En este trabajo se tiene como objetivo analizar los diferentes escenarios que se pueden presentar durante la operación en el acople directo de un sistema fotovoltaico y un electrolizador, o PVE system (PVE≡photovoltaic electrolysis) para esclarecer que parámetros de diseño del sistema fotovoltaico requiere un trato más cuidadoso a la hora de esbozar el acople directo entre ambas tecnologías.

No radica el fin del análisis en la exactitud numérica de este, sino en una línea más gruesa, hacer hincapié en la tendencia del comportamiento. Por lo tanto se va a desarrollar a lo largo del texto un análisis de sensibilidad, que pueda servir como complemento o soporte de ayuda durante el diseño del acople entre un electrolizador y un módulo fotovoltaico.

## 1.3. Estructuración del trabajo

El trabajo se estructurara en una serie de puntos.

En primer lugar se presenta en unas líneas el panorama energético actual, para proceder con una revisión de la bibliografía, o más bien un resumido estudio del arte, en lo que concierne a la energía fotovoltaica y la tecnología del hidrogeno como vector energético.

A continuación se plantea los dos modelos matemáticos empleados en el análisis y la explicación de estos.

## Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica

---

En el tercer bloque tiene lugar el análisis de sensibilidad en sí y las conclusiones correspondientes.

Por último la bibliografía consultada para la elaboración del trabajo.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Introducción panorama energético actual

La energía es el motor del crecimiento, esencial en el desarrollo económico y social de un país. La demanda energética crece de manera exponencial a medida que la población aumenta y los países expanden sus economías.

Hasta el día de hoy el consumo energético ha tenido un patrón de crecimiento sostenido, en estrecha relación con el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) de cada país.

Al diseccionar las diferentes procedencias de las fuentes de energía, se vislumbra el dominio de los combustibles fósiles, gas petróleo y carbón, constituyendo estos la fuente primaria principal (aproximadamente cuatro quintas partes del total) con una tendencia que ha permanecido creciente en la historia. Sin embargo habría que concretar la disminución de la tasa de crecimiento del consumo de carbón y el incremento notable del consumo de gas natural.

Otro de los protagonistas, actual y posible solución al problema energético en el futuro, reside en la energía nuclear. Sin embargo a día de hoy en los países del primer mundo están prácticamente congeladas las inversiones en energía nuclear, por razones que se amparan principalmente en el rechazo de la población o de grupos ecologistas.

También hacer mención en el paradigma actual del esfuerzo por parte de los gobiernos de los países más desarrollados para incentivar el uso de energías renovables, aunque hasta ahora solo se ha logrado un cierto nivel de penetración en algunos casos y generalmente a través de fuertes subsidios. ¿Pero qué nos depara el futuro?, ¿Cuál será el modelo energético respecto al marco energético actual? Los pronósticos de evolución del consumo energético a nivel mundial proporcionan las respuestas a estas preguntas:

- Los combustibles fósiles continuarán siendo la principal fuente primaria, con ciertos cambios en la participación relativa de cada combustible. Se prevé un aumento del consumo del gas junto a la menor participación del carbón, siguiendo el petróleo como principal fuente.
- La energía nuclear representa una incógnita. Su actual rechazo podría cambiar por sus menores emisiones de CO<sub>2</sub>. Pero aún en los escenarios más optimistas la participación relativa permanecerá a la baja.
- Un mayor uso de fuentes renovables con un crecimiento relativo muy importante.
- A largo plazo se prevé un debilitamiento de la tasa de crecimiento global de la demanda. Con un descenso en los países actualmente desarrollado y un aumento en países en vías de desarrollo como China e India.
- La evolución de las distintas reservas energéticas será un aspecto crítico de relevancia.
- Como es previsible el precio de los distintos recursos energéticos sufrirá un cambio, vinculado no solo a las reservas disponibles sino también a distintos aspectos como la seguridad en el abastecimiento de las grandes potencias, la expectativa de

estabilidad política en regiones que concentran las reservas de fuentes convencionales o las prácticas de mercado por parte de los países que concentran las reservas.

- Tendrá un gran calado en el panorama futuro la evolución de la política mundial en relación con las emisiones de dióxido de carbono y los niveles de emisiones contaminantes asociadas con las distintas actividades energéticas.
- El abastecimiento de energía requiere e implica fuertes inversiones tanto para la producción como las infraestructuras necesarias. Inversión que generalmente la acometen sociedades privadas. En la medida de que estas se realicen en países etiquetados como de alto riesgo presentara una mayor dificultad, lo que va a recalcar nuevamente en el precio de los recursos.

Hasta ahora se ha hecho hincapié en aspectos relacionados con la demanda, tanto directos como indirectos, y no hay que olvidar que actualmente los recursos energéticos mundiales son suficientes para abastecer esta. Sin embargo esto no es tan sencillo, y como ya se dijo anteriormente, tornar los recursos en oferta requiere una fuerte inversión que pende a su vez de la capacidad del sector energético de competir con otros sectores de la energía para obtener capital. He aquí una de las principales razones de porque el uso de una energía con su asociada tecnología y no otra. Ya que se vuelve más importante que las condiciones de inversión en el sector sean correctas para atraer el capital necesario, que otras series de aspectos ligados al medio ambiente, aunque estos vayan a repercutir negativamente en un futuro y posiblemente también de manera económica.

Cabe destacarse que si bien el petróleo ha sido fuertemente sustituido en algunas actividades como la producción de energía eléctrica, en otras, principalmente el transporte, sigue siendo todavía insustituible, lo cual ayuda a que continúe siendo la fuente principal primaria.

Las fuentes de energía renovable constituyen una alternativa promisoría para atender las crecientes necesidades de energía y podrían jugar un papel clave en la implantación de prácticas sustentables y descentralizadas de abastecimiento energético en los países en desarrollo. No obstante, el coste de estas energías y la volatilidad de su disponibilidad no alcanzan todavía niveles competitivos y requieren de subsidios directos e indirectos.

En último lugar hacer mención del hecho de que las soluciones no estarán sólo del lado de la oferta, sino que existe un gran esfuerzo en lograr una participación más activa de la demanda, específicamente en el campo de la eficiencia energética. También debe considerarse que sólo dos recursos naturales tienen la capacidad potencial de ofrecer alternativas adecuadas a largo plazo: las energías nuclear y solar, siendo esta última uno de los objeto de este trabajo.

## **2.2. Energías renovables**

La generación, el transporte y el consumo de las energías convencionales tienen, como toda actividad antropogénica, un impacto sobre el medio, y puede argumentarse que están en el origen de algunos de los mayores problemas ambientales que sufre el planeta.



No es cierto que las renovables no presenten efectos lesivos, en cambio es una certeza que son infinitamente menores y siempre reversibles. Esto posiciona a las renovables como una de las posibles soluciones a la denominada “crisis energéticas” por ciertos autores o “dinámica energética” por otros.

Para ejemplificar lo defendido en el párrafo anterior, en el año 2000, amparado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y la Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA), se emitió un documento por la consultora AUMA (consultoría ambiental y energética desde 1993) que recoge el estudio denominado “Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica”. En este empleo como metodología de trabajo el análisis del ciclo de vida, una herramienta de gestión ambiental que analiza los impactos de un proceso, producto o actividad desde “la cuna a la tumba”, es decir, en todas sus fases.

Los impactos analizados están distribuidos en doce categorías: calentamiento global, disminución capa de ozono, acidificación, eutrofización, radiaciones ionizantes, contaminación por metales pesados, sustancias carcinógenas, niebla de verano, niebla de invierno, generación de residuos industriales, residuos radiactivos y agotamiento de los recursos energéticos.

Como era predecible las conclusiones que se obtuvieron no ofrecen márgenes para la duda, las energías renovables tienen un impacto muchísimo menor que las convencionales (31 veces menor según su sistema de cuantificación que no trasciende para el caso). Pero más allá de los resultados concretos de este estudio e infinidad de otros similares, nadie pone en duda que, asumiendo el innegable impacto de las distintas fuentes renovables, a título de ejemplo el impacto visual de los parques eólicos, estos no admiten comparación con los que provocan las energías convencionales. Así que bien se merecen el calificativo de “fuentes de energía limpias”.

Otro de los apellidos que suele acompañar a la energía renovables suele ser el de “fuente inagotable”, habría que matizar que en lo que a la escala humana se refiere, y esto se debe al hecho de que utilizar la radiación solar, por citar algún tipo, para producir calor o electricidad no disminuye en ningún caso la radiación que la Tierra recibe del Sol. De manera similar sucede con el viento, por más aerogeneradores que se pusieran en operación no se llegaría a trastocar el equilibrio térmico del planeta. Sin embargo se da un caso algo difuso para fuentes como la biomasa, esto continua siendo cierto siempre que se respeten los ciclos naturales.

A continuación se expondrá el estado actual de las diferentes energías renovables presentes en el sistema energético.

### **2.2.1. Eólica**

La energía eólica se puede clasificar como una tecnología madura pero aun con un amplio margen para la investigación y el desarrollo en todas las áreas para abaratar los costos y mejor los recursos técnicos del sector de energía eólica.

El crecimiento del sector es continuo, siendo el viento la fuente renovable que mas rápido ha crecido, posicionándose Europa como líder en este sector. Las turbinas continúan creciendo en tamaño y capacidad. Las turbinas eólicas comerciales han estado en funcionamiento desde los

años ochenta y la tecnología de las turbinas eólicas sigue avanzando. Prueba de ello son los campos Offshore (parques eólicos marinos), en general actualmente están en grados de desarrollo proporcionando al menos el 2% de la producción del total de energía eléctrica que consume Europa. Sin embargo el EWEA (La Asociación Europea de la Energía Eólica) estima que para 2020 sea instalada una capacidad del 65% del total.

Aunque la accesibilidad puede ser un obstáculo para estos parques, las mejoras de desarrollo en la fiabilidad de la instalación harán que los parques offshore se generalicen dado que los vientos son de mayor calidad (normalmente 40% más de la energía que el de un parque onshore (en la tierra), presenta mejores rendimientos, ya que las topografías que el de un parque son menos complejas; y un área disponible para la ubicación de molinos muy grande. De forma añadida presenta como ventaja la ausencia del problema relacionado con las emisiones de ruido, lo que permite velocidades puntas más altas. Vale la pena comentar para ilustrar el caso que con la energía eólica que puede producir en el Mar Norte sería bastante para cubrir las demandas eléctricas de la UE.

A continuación, a través de una serie de gráficos, se proporciona una visión global de la energía eólica a lo largo de los años para apreciar el crecimiento de esta. En la figura 2-1 se aprecia la capacidad global instalada anualmente, mientras que en la figura 2-2 la capacidad global acumulada. Por último, en la figura 2-3 y 2-4 se observa la generación eléctrica procedente de fuentes eólicas años anteriores y la proyección a medio plazo, dando evidencia de la clara tendencia creciente.

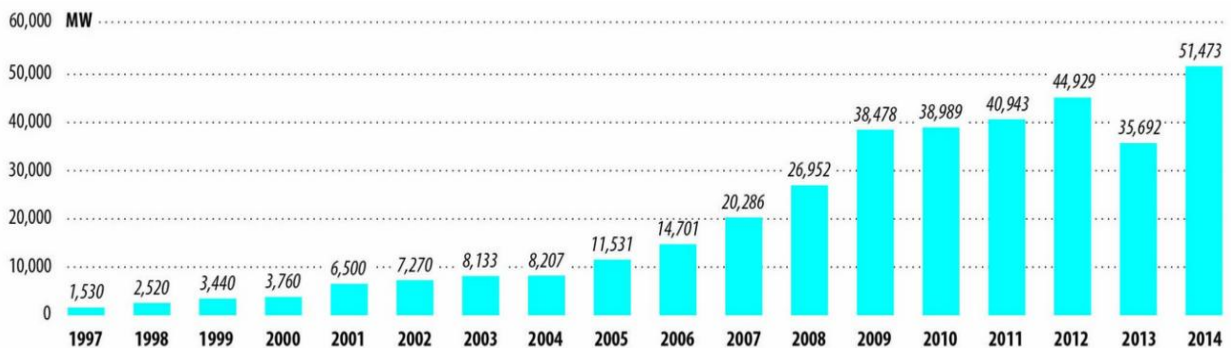


Figura 2-1: Potencia eléctrica de origen eólico instalada a nivel mundial (GWEC, 2013)

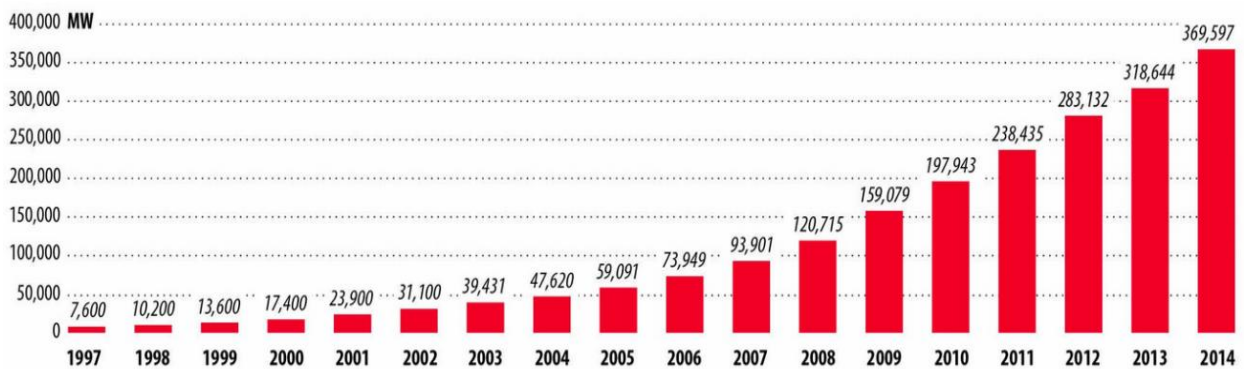


Figura 2-2: Potencia eléctrica de origen eólico acumulada a nivel mundial (GWEC, 2013)

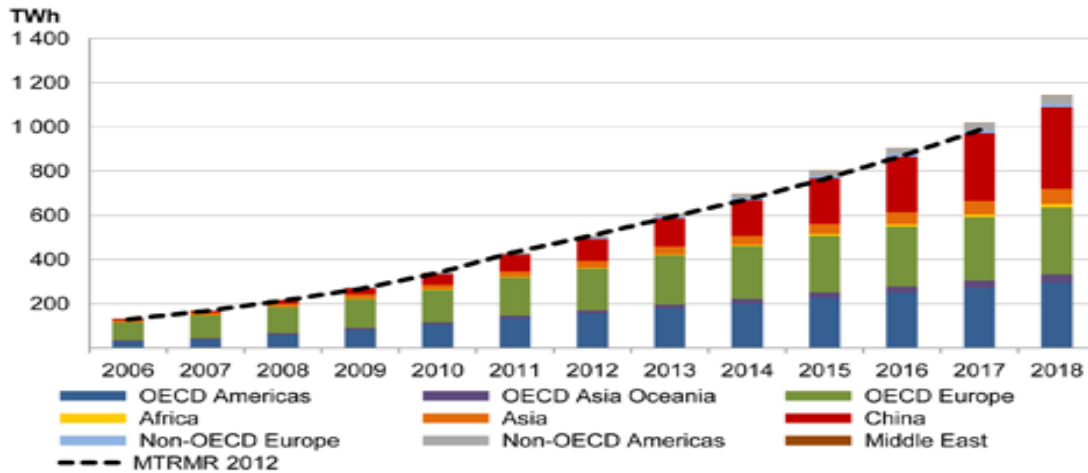


Figura 2-3: Generación eólica onshore y proyección a medio plazo ( Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013, OECD/IEA)

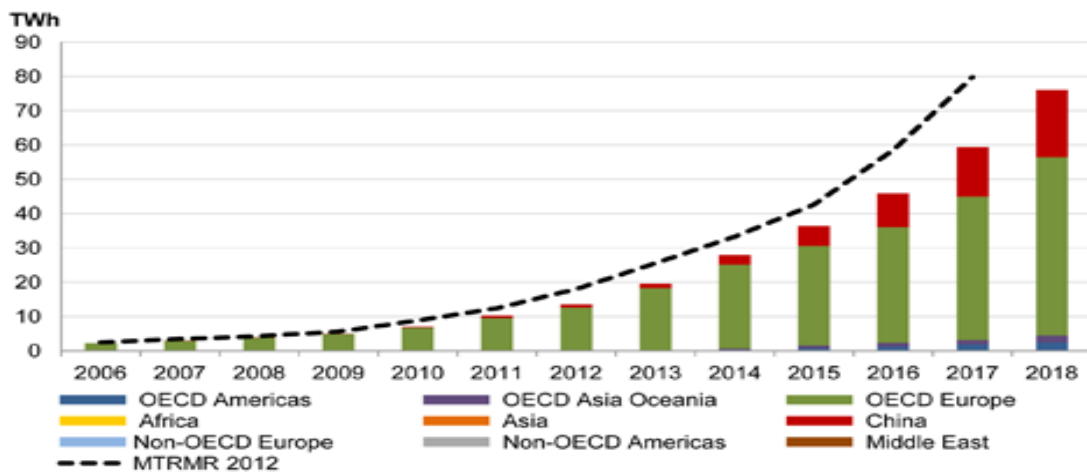


Figura 2-4: Generación eólica offshore y proyección a medio plazo (Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013, OECD/IEA)

## 2.2.2. Solar

### 2.2.2.1. Fotovoltaica

La Energía solar fotovoltaica (a la que también se denominará energía PV de ahora en adelante) ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, impulsada por la necesidad de asumir los retos que en materia de generación de energía se presentan, como son el aumento de las necesidades de energía y de una energía más limpia.

Aunque sus costos no son muy competitivos comparados con la de los sistemas de suministro convencionales, el crecimiento se ha producido gracias a los mecanismos de fomento de algunos países.

## Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica

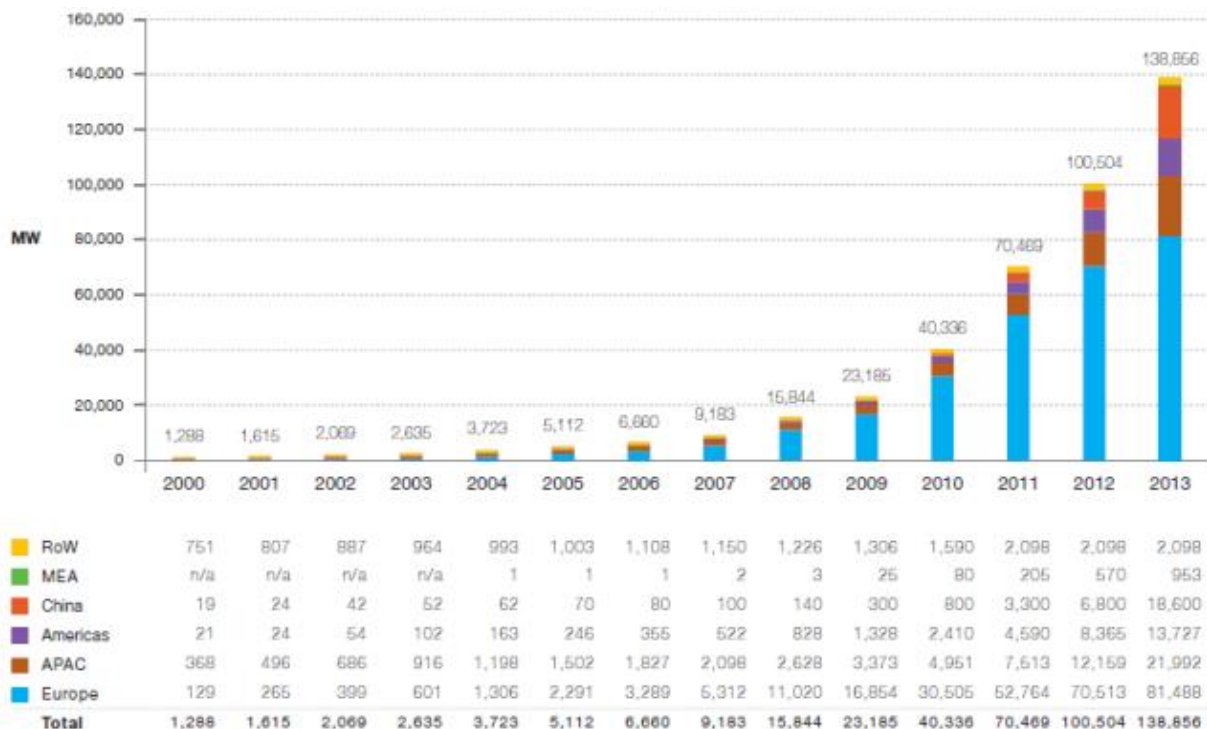
A finales de 2010, la potencia acumulada en el mundo era de aproximadamente 40.000 MWp según datos de la European Photovoltaic Industry Association (EPIA), de los cuales cerca de 29.000 MWp, un 72%, se localiza en la Unión Europea. A día de hoy el crecimiento de la última década se mantiene y se espera que siga siendo así.

Las tres naciones que destacan en la instalación de energía PV son Europa (destacando Alemania y España, actualmente desbancada por Italia), Japón y EE.UU (figura 2-5).

A finales de 2013 había instalados más de 138 GW fotovoltaicos en todo el mundo de estos, 4 GW están instalados en España, 18 en Italia y 36 en Alemania.

En lo referente al precio de los paneles fotovoltaicos ha descendido drásticamente desde sus inicios. La siguiente figura muestra como a medida que iba aumentando la producción acumulada, el precio del panel disminuía considerablemente. Signo inequívoco de que la tecnología se vuelve competitiva con otras fuentes de generación eléctrica.

El número de paneles fotovoltaicos manufacturados por las diferentes naciones simultáneamente también ha sufrido un crecimiento exponencial. Al igual que en el caso anterior signo de la maduración de esta tecnología.



**Figura 2-5: Evolución de la potencia PV instalada en todo el mundo ( IEA. 2013)**

Por último, para proporcionar una visión global del calado de los datos acontecidos anteriormente se adjunta la siguiente figura, en la que se aprecia la cobertura de la demanda energética por parte de la energía PV en diferentes países.

En lo referido a aspectos más técnicos sobre esta tecnología se reservan para un apartado específico.

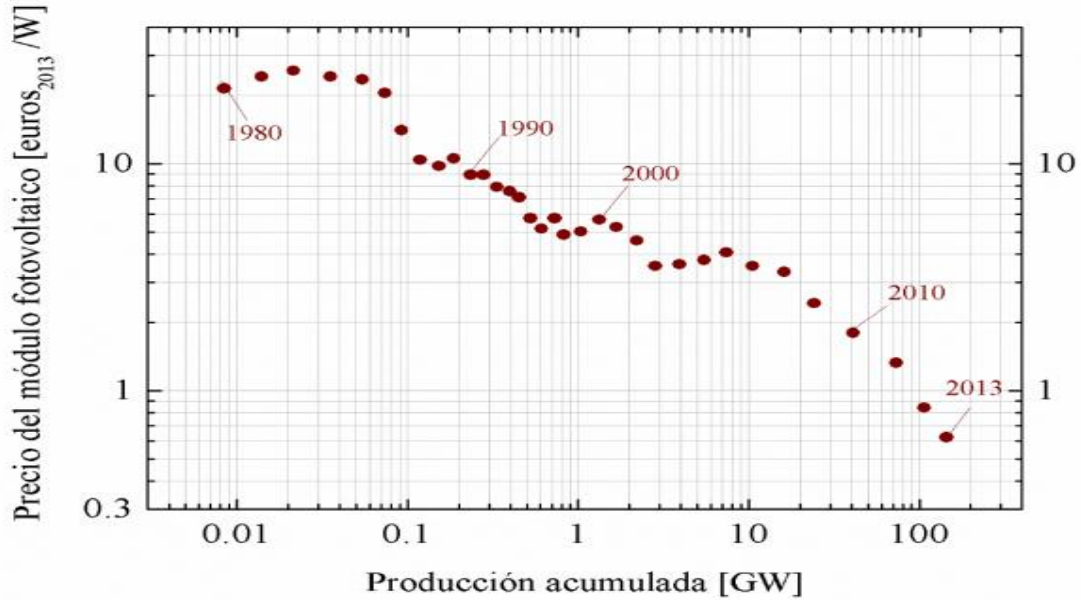


Figura 2-6: Precio del panel fotovoltaico de panel plano (en euros por vatio pico) en función de la producción acumulada (Marta Victoria y Rodrigo Moretón, 2013)

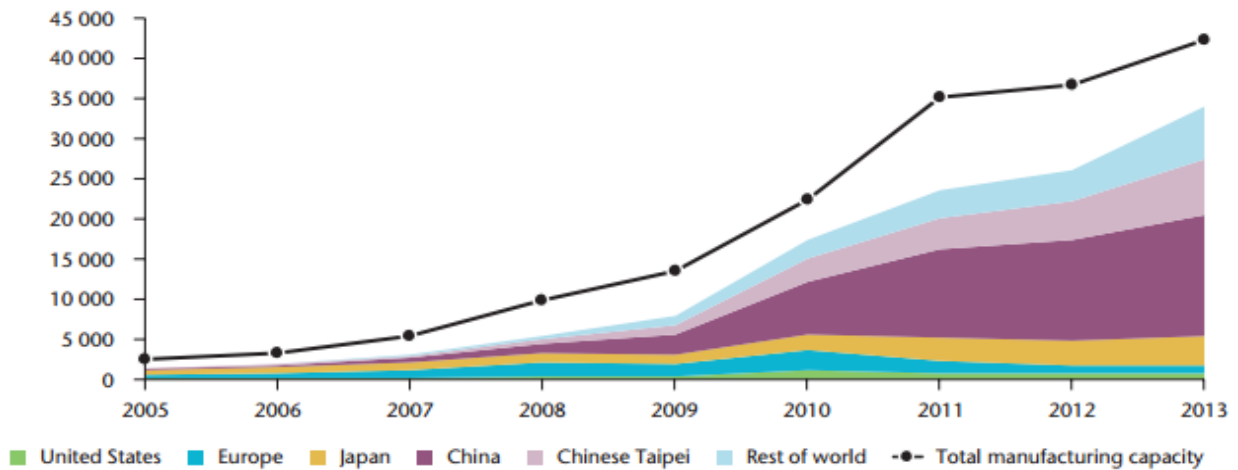


Figura 2-7: Número de unidades de PV manufacturadas por distintas naciones (SPV Market Research (2014), Photovoltaic manufacturer Shipments: Capacity, Price & Revenues 2013)

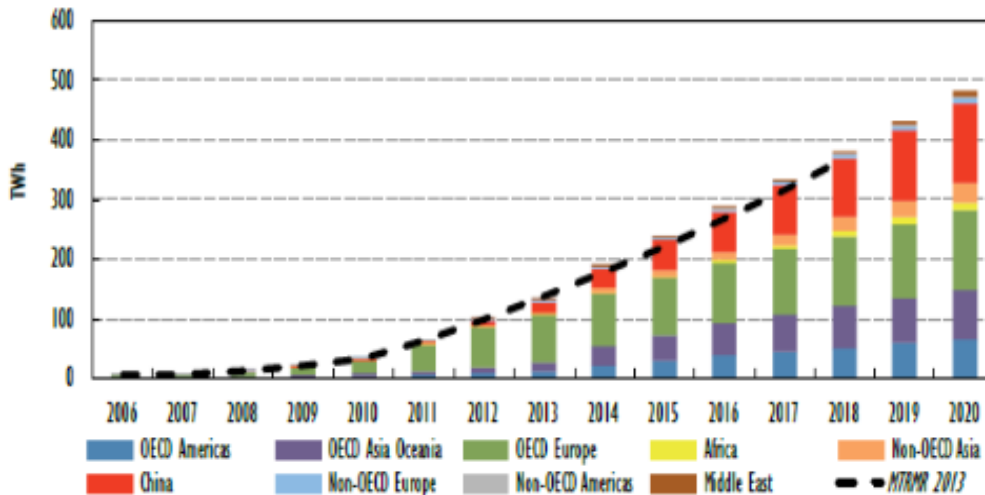


Figura 2-8: Generación energía fotovoltaica y proyección a medio plazo por regiones ( Medium-Term Renewable Energy Market Report 2014, OECD/IEA )

### 2.2.2.2. Termoelectrica

La energía solar se puede aprovechar directamente para generar electricidad a través de paneles fotovoltaicos o térmicamente mediante la energía solar de concentración o CPS (“Concentrating solar power”), en la cual se concentra los rayos solares para calentar un receptor por el que fluye un fluido de trabajo que se calienta a altas temperaturas. Esta energía en forma de calor es la que se aprovecha para la generación de electricidad.

De manera muy resumida una planta típica dispone de una serie de colectores solares, receptores por donde fluye el fluido de trabajo y un bloque de potencia donde el calor, “energía”, que transporta el fluido en cuestión se transforma en energía mecánica y posteriormente en electricidad. Se diferencia cuatro tipos diferentes de plantas, de canal parabólico, concentrador lineal tipo Fresnel , receptor central (torre) y disco parabólico (de seguimiento).

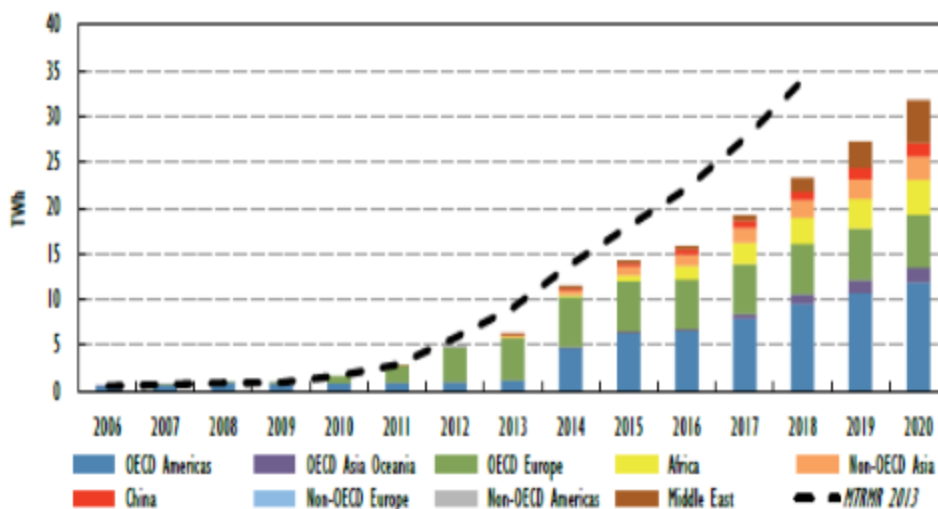


Figura 2-9:Potencia solar térmica generada y proyecto a medio plazo por regiones (Medium-Term Renewable Energy Market Report 2014, OECD/IEA)

### 2.2.3. Geotérmica

Geotérmico significa “calor que procede de la Tierra”. El calor que emana del interior de la tierra debido a los movimientos de las placas tectónicas, ocasiona zonas de flujo de altas temperaturas cerca de la superficie. La energía geotérmica se podría apelar como inagotable. El recurso se renueva constantemente por la circulación de las aguas subterráneas, por consiguiente si el agua se extrae a un ritmo sustentable, el recurso estará disponible para las generaciones futuras.

Dentro de la energía geotérmica se diferencian 3 sectores: el sector eléctrico, sector termal y sector de las bombas de calor.

Aunque el uso de aguas termales se remonta hasta la antigüedad. El uso de esta energía con propósito industrial se inicia a principios del siglo 19 en Italia. A finales del siglo 19, el primer sistema de calefacción urbana geotérmica comenzó a operar en los EE.UU., con Islandia siguiente en la década de 1920 . Al comienzo del siglo 20 , se logró el primer intento exitoso para producir electricidad a partir de fuentes geotérmicas. Desde entonces, la producción de electricidad a partir de energía geotérmica se ha incrementado.

La energía geotérmica proporciona una buena generación de energía de carga base , ya que generalmente es inmune a los efectos del tiempo y no muestra variación estacional, esta característica la distingue de otras tecnologías renovables que producen potencia variable.

En la figura 2-10 se puede observar una evolución de la energía geotérmica generada y su proyección a medio plazo .

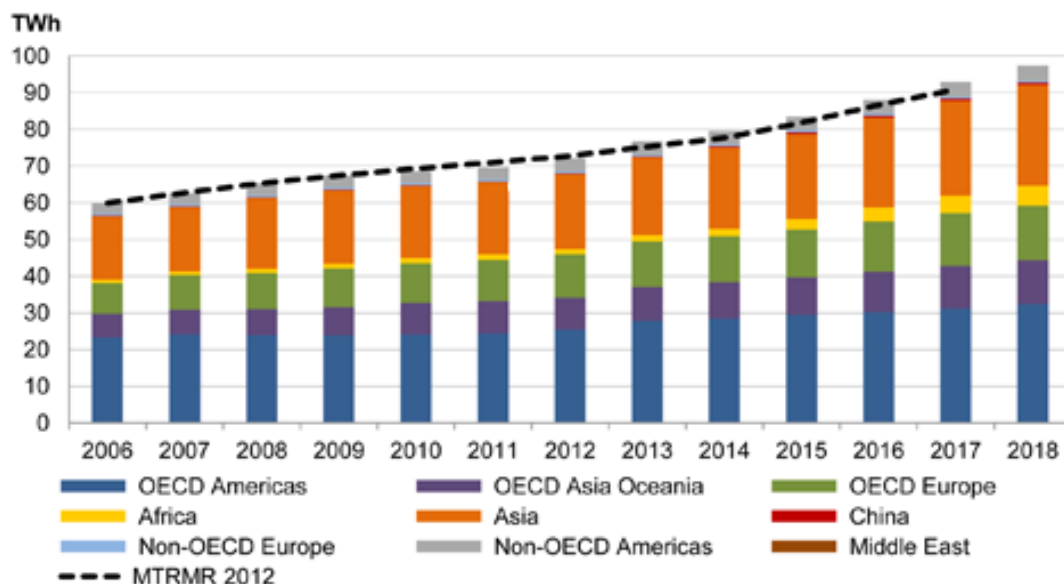


Figura 2-10: Energía geotérmica generada y proyecto a medio plazo por regiones (Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013, OECD/IEA)

### 2.2.4. Biomasa

La biomasa es cualquier materia orgánica proveniente de animales o plantas, en definitiva cualquier proceso biológico, a título de ejemplo se puede nombrar la madera, desechos agrícolas, herbáceos,..., todo ello susceptible de utilizarse como energía. A esta energía se le denomina bioenergía y puede ser usada directamente como combustible o procesado como líquido o gas.

Probablemente es la fuente de energía alternativa más concreta e inmediata disponible.

Las ventajas principales de la biomasa radican en la abundancia de materias primas, la facilidad de extraer su energía y su desarrollo en las áreas sin explotar.

En la figura 2-11 se proporciona una estimación del crecimiento de la energía instalada de biomasa.

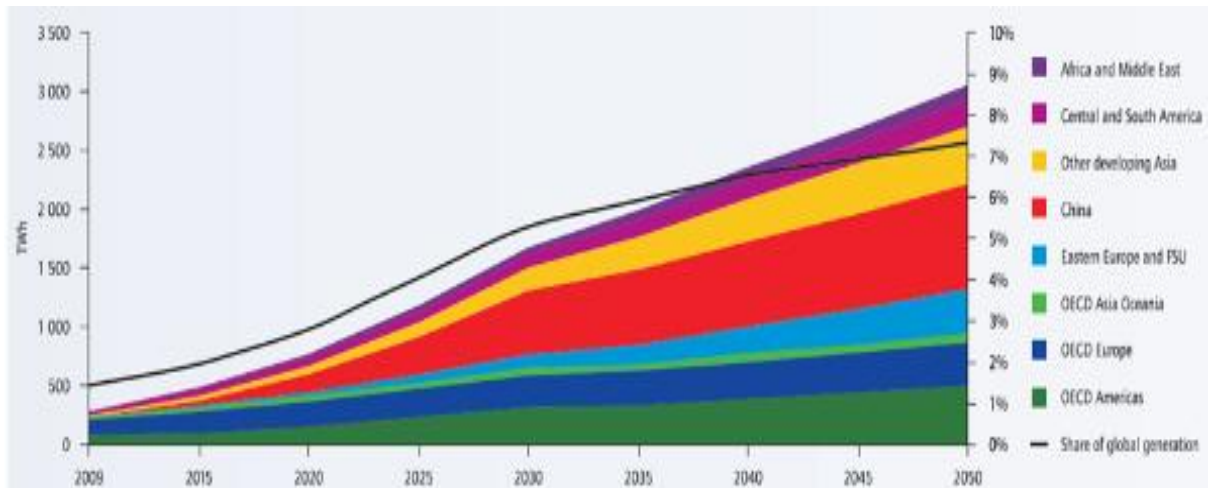


Figura 2-11: Estimación del crecimiento de la potencia instalada de biomasa (IEA, 2013)

### 2.2.5. Hidráulica

La energía hidráulica proviene de la energía producida por unas turbinas accionadas por un flujo de agua que las atraviesa. Este flujo bien puede ser el de un río o de una instalación dispuesta por el hombre, donde una reserva de agua retenida a gran altura desciende a través de un túnel hacia las turbinas para posteriormente volver a desaguar al río. Estas turbinas a su vez pueden accionar a un generador y así producir electricidad, denominada hidroelectricidad.

La hidroelectricidad es una fuente renovable madura y con un coste competitivo. Tiene un papel importante en el panorama eléctrico actual, contribuyendo con más del 16% de la generación eléctrica mundial y supone alrededor del 85% de la energía renovable global.

De forma añadida la energía hidráulica ayuda a estabilizar la fluctuación entre demanda y oferta. Este hecho adquiere gran valor en esta última década, ya que la participación de las fuentes eléctricas renovables, caracterizadas entre otras por su fluctuación, ha incrementado e incrementará considerablemente.



En definitiva la energía hidráulica presenta una serie de convenientes: ayuda a la descarbonización del panorama eléctrico al trabajar en conjunto con otras renovables, produciendo energía más limpia y facilitando una mejor contribución de las otras renovables, proporciona una reserva para el abastecimiento de agua, el control de sequías, riadas e inundaciones.

Sin embargo, las construcciones de presas y depósitos de gran tamaño pueden alterar la flora local y la fauna significativamente pudiendo ocasionar consecuencias medioambientales mayores. A pequeña escala no requiere de embalses significantes y normalmente están sobre el mismo río, siendo una de las opciones medioambientales de conversión de energía mejores vistas, ya que no interfiere significativamente con los flujos del río.

La categorización de las instalaciones de pequeña potencia varía de país a país (de 1.5 a 25MW),e l límite superior adoptado por ESHA (“The European Small Hydropower Association”) es de 10MW y es él aceptado como límite común.

Respecto a las tecnologías en vigor en hidroelectricidad se distingue: plantas que aprovechan la corriente del río, estas son las menos flexibles a la hora de generar electricidad ya que depende mayoritariamente del flujo del río; plantas en presas del río, son las que poseen mayor flexibilidad de generar electricidad según la demanda; y plantas de bombeo, en las cuales se bombea agua a un deposito en altura cuando la producción supera la demanda, estando el kWh con menor coste para posteriormente producir electricidad cuando la demanda lo requiera (vendiendo el kWh a mayor coste).

En la figura 2-12 se facilita una visión de la potencia instalada y su futuro a corto plazo de esta fuente de energía.

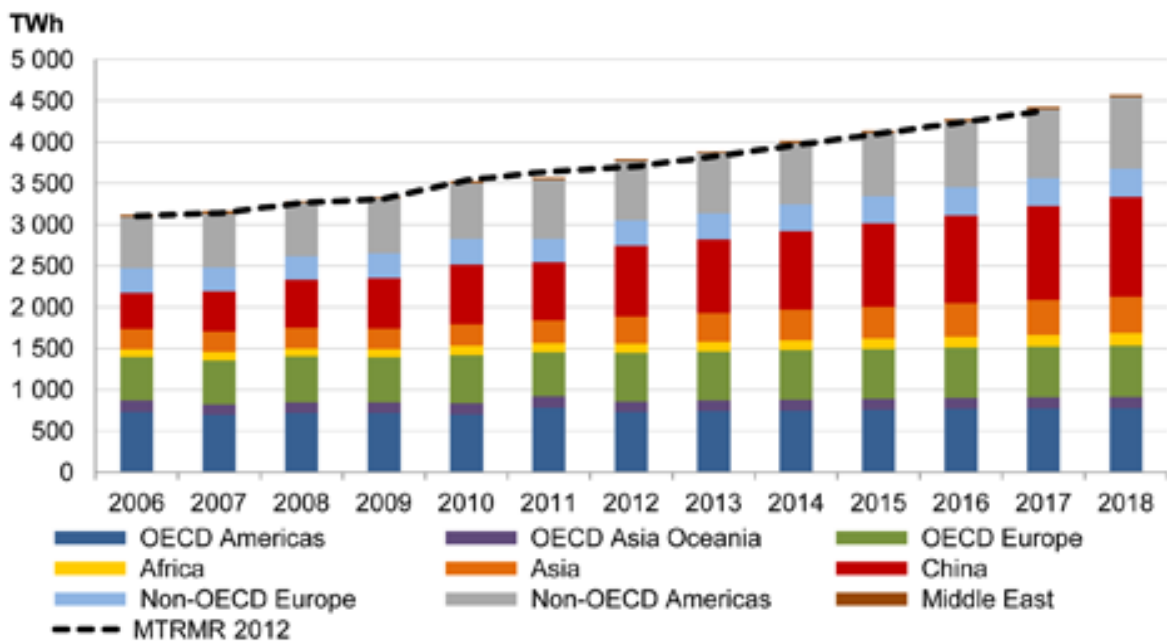


Figura 2-12:Potencia hidroeléctrica generado y proyecto a medio plazo por regiones (IEA,2013)

### 2.2.6. Oceánica

Hay diferentes tecnologías para extraer la energía procedente del océano, entre ellas se diferencia las relacionadas en aprovechar la energía potencial y cinética de las mareas a través de diques o barreras alrededor de los estuarios o sistemas modulares. También es susceptible de aprovechamiento la energía asociada a las olas, igual que en el caso anterior tanto cinética como potencial y por último el aprovechamiento del gradiente térmico entre la superficie y las profundidades de agua (ocean thermal energy conversion (OTEC)) o el gradiente salino en la bocas de los ríos al mar a través de procesos relacionados con la osmosis por presión retardada.

A día de hoy no es una tecnología ampliamente empleada, cabría destacar la generación relativamente a gran escala por aprovechamiento de las mareas de unos 254 MW en Sihwa (Corea del sur), que opera desde 2011, y de 240 MW en La Rance (Francia), que opera desde 1966.

Las otras tecnologías están restringidas a escalas relativamente pequeñas y aun están en desarrollo.

En la figura 2-13 se puede apreciar que la contribución es nimia en comparación a los casos anteriores, como dato de interés en 2012 la potencia oceánica generada fue solo de 0.54 GW.

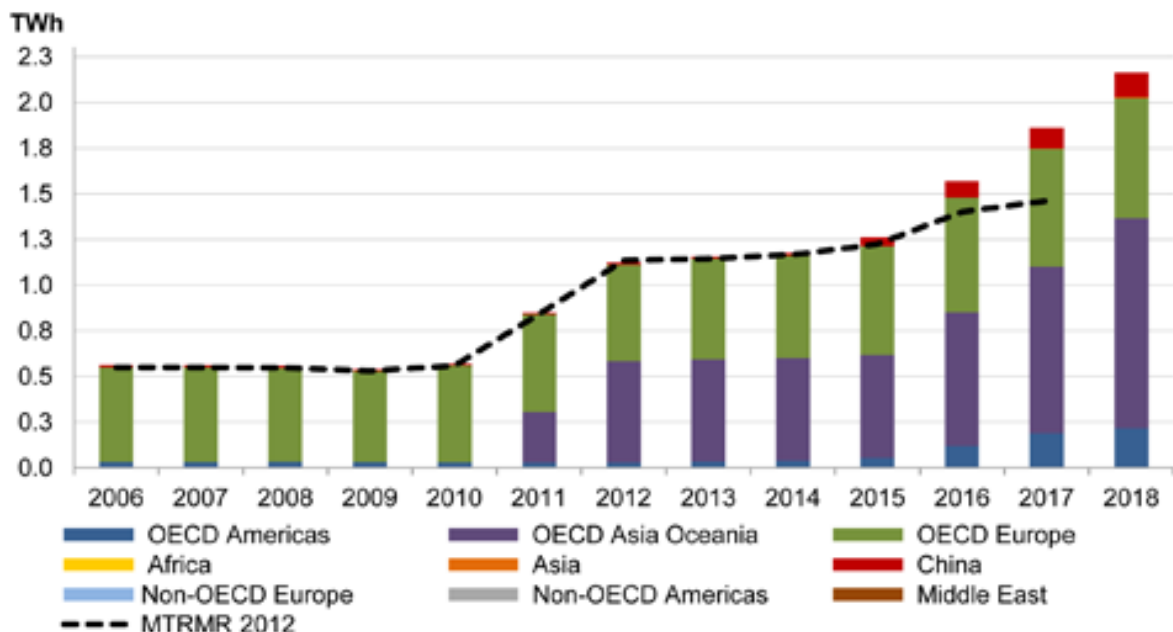


Figura 2-13: Potencia oceánica generada y proyectado a medio plazo por regiones (IEA, 2013)

## 2.3. Estado del arte de la energía fotovoltaica

Hay que remontarse hasta el año 1839 para divisar el germen que daría lugar a la energía fotovoltaica. Fue este año cuando el físico francés Edmond Becquerel, al observar que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando se exponían a la luz, descubrió el efecto fotovoltaico. Media década después Willoughby Smith corroboró el

descubrimiento al alertar este mismo efecto en sólidos, para poco después, de mano de W. G. Adams y R.E. Day se produjera la primera célula fotovoltaica de selenio.

Tendría que transcurrir aun algunas décadas para que este fenómeno fuese explicado. Fue Einstein a principios del siglo XX, quien basando sus conceptos de la fotoelectricidad en los trabajos previos sobre campos de energía, formulada por Max Planck, dio respuesta a los entresijos del fenómeno.

Entre 1955 y 1975 surgen las primeras empresas que comenzaron a comercializar células, basadas en semiconductores de silicio, para aplicaciones destinadas principalmente al ámbito espacial o militar. En esta época se evoluciona en los procesos de fabricación y tratamiento de los materiales, sin embargo el rendimiento de las células continuaba siendo demasiado bajo, alrededor del 10%, y por lo tanto el coste del kWh elevado.

Se podría afirmar que fue a partir de 1975 cuando esta tecnología adquiere suficiente madurez para ser susceptible de aplicar en la industria y, paulatinamente al ámbito doméstico. Se experimenta con distintos tipos de materiales semiconductores, como el arseniuro de galio aislado o en combinación con germanio. Ya en 1980 la producción de paneles fotovoltaicos alcanza la cifra de 1500 kW anuales, siendo la capacidad global instalada a finales de 2013 de unos 128 GW, confirmando estas cifras la meteórica carrera de la energía fotovoltaica. Aun así la eficiencia hoy en día aun no es muy alta, dándose las mayores eficiencias en módulos de células de silicio monocristalino o policristalino, aproximadamente entre un 20%-14%. Si es cierto que en condiciones de laboratorio, concentrando células de silicio, se obtienen valores muy elevados por encima del 40% con incidencia normal de la irradiancia.

En la actualidad la energía fotovoltaica se utiliza de distintas formas. Bien de forma aislada para generar cierta cantidad de electricidad en zonas alejadas de la red de transporte o directamente como un elemento más de generación de energía eléctrica inyectada a red.

Para la fabricación de células solares se utilizan diversos materiales; entre los más comunes se encuentran el silicio, el germanio y el selenio. Las células más utilizadas para la conversión de energía solar en energía eléctrica son las de silicio monocristalino y policristalino. Dependiendo del tratamiento que se le da al silicio puro en su cristalización se obtienen células de silicio monocristalino, policristalino o amorfo. Aunque también se fabrican de otros materiales como de telurio de cadmio (CdTe) o diselenio de indio-cobre (CIS).

Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de un único cristal de silicio puro. Hay distintos procedimientos, a título de ejemplo se podría nombrar el proceso Czochralski o el de zona flotante. Las células pueden ser cuadradas o semicuadradas, de alrededor de 10 cm ó 12.5 cm de lado y 0.3 mm de espesor con un color gris o azul oscuro.

Por su parte las células de silicio policristalina son cuadradas, con lados de 10, 12.5 y 15 cm de longitud y espesores de 0.3 mm. En estas células se puede apreciar el grano, lo que origina tornasoles. Entre los diferentes procesos de fabricación el más usado es el de fusión en bloques.

Las células de silicio amorfo, a diferencia de su congéneres, tiene una red cristalina desordenada. El silicio amorfo se deposita en capas de 0.001 mm de espesor sobre distintos sustratos como plástico, vidrio o metal, y con formas diversas, por lo que goza con un uso extendido como elemento arquitectónico por sus singularidades. Su color puede variar entre el

marrón rojizo y el negro. Como inconveniente resaltar el hecho de su bajo rendimiento, a día de hoy la eficiencia máxima de los módulos de células de silicio amorfo comerciales se sitúa en el orden del 8%.

Material de la célula	Silicio Monocristalino	Silicio Policristalino	CIS	CdTe	Silicio Amorfo
Superficie requerida para un 1 kWp	7-9 m <sup>2</sup>	8-11 m <sup>2</sup>	11-13 m <sup>2</sup>	14-18 m <sup>2</sup>	16-20 m <sup>2</sup>

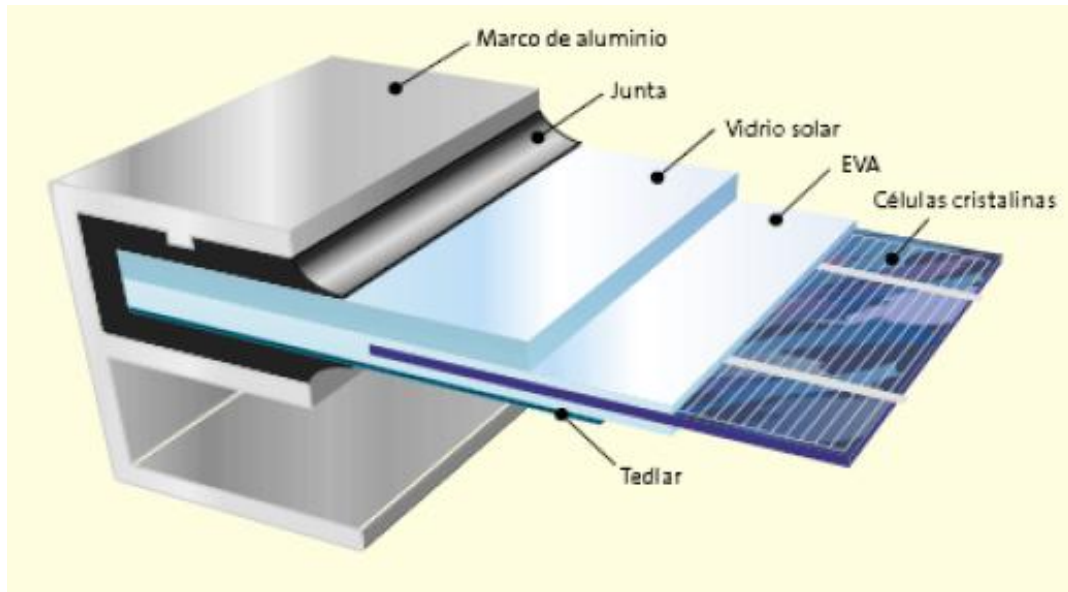
**Tabla 2-1: Superficie requerida para 1kWp según material de la célula (Lillo, 2014)**

Las células se agrupan en serie y/o paralelo formando un modulo fotovoltaico. Estas asociaciones están protegidas y vinculadas al exterior con elementos estructurales y electrónicos comunes (figura 2-14):

- Una cubierta frontal con una alta transmisividad. Suele ser de vidrio templado.
- Una cubierta posterior opaca a la radiación. Suele ser una lámina delgada de algún polímero. En algunos casos, por cuestiones estéticas en la integración del módulo a la fachada o cubierta, puede ser transparente asociada a otro vidrio.
- Un encapsulante, que consiste en un polímero transparente con la labor de unir y ajustar las células entre las dos cubiertas. Se suele emplear el etilenvinilacetato (EVA).
- Distintos tipos de diodos. Se colocan diodos de paso en paralelo en asociaciones de células en serie para evitar, dado el caso, que todos los elementos descarguen su potencia sobre una célula sombreada y esta se deteriore. A su vez también se utilizan diodos de bloqueo con dos funciones, la de proteger sistema fotovoltaicos aislados de intensidades inversas procedentes de la batería durante la noche y en ramas en paralelo, deterioradas o sombreadas, evitan las intensidades inversas.
- Un marco y una caja de conexiones. El conjunto formado por células, cubiertas y encapsulante se enmarca en perfiles rígidos de aluminio a su vez sellados. La caja de conexiones suele ir en la cara posterior y en ella aparte del polo positivo y negativo se localizan los diodos de paso.

Desde el punto de vista de la producción aparecen en escena otra serie de componentes indispensables:

- El inversor, que tiene la labor de convertir la corriente continua procedente de los módulos en corriente alterna.
- El transformador, que eleva el voltaje de la corriente alterna proveniente de los inversores al adecuado para su conexión a una subestación de distribución.
- Al igual que en el caso anterior protecciones y aparellaje eléctrico.



**Figura 2-14: Encapsulado estándar de módulos fotovoltaicos (Lillo, 2014)**

Hasta hace pocos años, desde un punto de vista práctico, se utilizaban módulos de 36 células y aproximadamente con una superficie de 0.4 m<sup>2</sup>. Actualmente se utilizan módulos mayores que disponen de 108 o más células asociadas en serie o en serie-paralelo. Cuanto mayor sea el módulo, presenta una mejor relación precio/potencia, y de forma añadida requiere menos mano de obra en las labores de instalación e interconexión.

En cuanto a lo referente a la vida útil de un módulo, su durabilidad si cumple con la normativa vigente en cuanto a homologación, puede durar más de treinta años, aunque se estima que a partir de los veinticinco sus prestaciones se reducen alrededor de un 20-25% respecto al primer día.

Existen distintas configuraciones a la hora de instalar los módulos en función del emplazamiento y la ubicación. Para instalaciones domésticas, se suele utilizar una configuración fija orientada en dirección norte-sur. Para aplicaciones industriales o de generación, se puede mantener esta configuración. Sin embargo existen cada vez más, disposiciones de paneles sobre una estructura que rota alrededor de uno o dos de sus ejes. De esta forma se intenta aumentar el rendimiento de cada panel, maximizando la incidencia normal de la radiación solar sobre la célula.

## **2.4. El hidrógeno y sistemas híbridos**

¿Qué es el hidrógeno? Con esta simple cuestión se da inicio al apartado correspondiente.

Apartando a un lado las características físico-químicas que caracterizan a este elemento, para el caso que atañe, el hidrógeno es un elemento químico, muy abundante en la naturaleza (aproximadamente el 75% de la materia del universo), con el inconveniente de que no se encuentra en estado puro en ningún tipo de “yacimientos”, por lo que ha de ser producido a partir de una materia prima que lo contenga y un aporte de energía.

Debido a lo anterior, el hidrógeno no es una fuente de energía primaria en sí, sino un vector energético empleado para almacenar y transportar energía. Como tal es referenciado frecuentemente como el vector energético del futuro ya que este puede ser usado para el almacenaje de fuentes de energía renovables, intermitentes, como es el caso de la solar o el viento. Pero no solo adquiere valor el campo de las renovables, sino que se cocina todo un modelo energético en el cual el hidrogeno pasaría a ser el nexo entra las fuentes primarias y los consumidores.

En el siglo XX, los combustibles fósiles contribuyeron al desarrollo de la sociedad tal y como hoy la conocemos, y trajeron nuevos desafíos de cuya solución puede depender el futuro de nuestro planeta. El sistema energético actual está basado en estos, que actúan a su vez como vector energético y fuente de energía.

Pero un sistema basado en combustibles fósiles tiene fecha de caducidad debido al agotamiento de estos. Ante tal situación es necesario introducir soluciones que garanticen un desarrollo sostenible para la civilización del siglo XXI. Lo que exige que los vectores energéticos del futuro sean limpios, seguros, eficientes y capaces de ser generados a partir de fuentes de energía inagotables, para poder asegurar el abastecimiento al usuario final.

Un vector que encaja en la descripción anterior es la electricidad. Es versátil, puede ser producida a partir de diversas fuentes y transportada largas distancias. Según la fuente de producción se podría calificar como “electricidad limpia” o, no recalcar en el aspecto peyorativo de seudónimo, “electricidad sucia”. Y un escenario similar se presenta con el hidrogeno, siendo las sinergias de ambos vectores la apuesta para formar un modelo energético que cubra las demandas del planeta sin depender de las fuentes de energía primaria.

Por lo tanto se podría afirmar que el hidrógeno es un vector energético limpio y sostenible, seguro y eficiente, que complementará en un futuro a la electricidad a la hora de garantizar el suministro energético de la población y fomentará la penetración de las fuentes de origen renovable.

Esta nueva situación está llevando a los diferentes Organismos Públicos, instituciones y empresas a posicionarse, elaborando estrategias y planes de actuación que permitan alcanzar un futuro en el que se contemple la utilización del hidrógeno y las pilas de combustible. Ya en el año 2002, el Departamento de Energía de Estados Unidos editó el documento “National Hydrogen Vision and Roadmap”, en el cual se establecía la hoja de ruta para situar al hidrógeno como vector energético. En Europa por su parte, la Joint Technology Initiative (JTI) canaliza las ayudas a proyectos basados en hidrógeno de la Unión Europea.

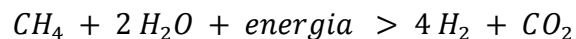
Aunque sean diversas las administraciones implicadas se podría describir una hoja de ruta común para alcanzar una economía orientada al hidrogeno, figura 2-17. En tal hoja de ruta se podría destacar como punto inflexión el año 2020, a partir del cual incrementara la penetración del hidrogeno en el mercado.

Y es que el hidrogeno posee unas cualidades que lo posicionan como un vector energético idóneo para el futuro (Fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón, 2005), (Pino, 2010), como son:

- Puede ser producido a partir de diversas de fuentes de energía y consumido en multitud de equipos e instalaciones (Figura 2-18).
- Puede ser producido y convertido en electricidad con un rendimiento relativamente alto. Este aspecto es especialmente interesante si se tiene en cuenta la dificultad, cada vez mayor, de evacuar la electricidad generada con tecnologías renovables. Mediante el empleo del hidrógeno como vector energético se consigue aumentar la capacidad de penetración de estas fuentes sostenibles. Además, tanto la energía eléctrica como el hidrógeno son vectores energéticos intercambiables en función de la necesidad, es decir, que se puede pasar de uno a otro gracias al empleo de electrolizadores o pilas de combustible, hidrogeno renovable, lo que da una idea del alto nivel de complementariedad de éstos (Figura 2-15).
- El hidrógeno se puede producir a partir de agua, muy abundante en la naturaleza.
- El hidrógeno es también un combustible, con la diferencia de que al oxidarse en presencia de oxígeno y no contener carbono en su molécula, produce solo agua, bien en estado líquida o gaseosa, como residuo.
- Puede ser almacenado en estado líquido, gaseoso o sólido (en hidruros metálicos).
- Puede ser transportado a largas distancias mediante tuberías, tanques o camiones cisterna.
- Puede ser convertido en electricidad con una eficiencia mayor que cualquier otro combustible fósil.

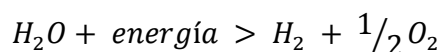
Actualmente existen tecnologías en distintas fases (investigación, desarrollo y comercialización) que permiten producir hidrógeno a partir de diversos tipos de materias primas como el agua, la biomasa, o los recursos fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y con un aporte de energía primaria que puede provenir de los combustibles convencionales, energía nuclear o fuentes renovables.

En la actualidad, la mayor parte del hidrógeno producido a nivel mundial se origina mediante el reformado de gas natural (metano), que radica en partir la molécula de de metano junto a un aporte energético y vapor de agua según la siguiente reacción:



Este proceso presenta el de menor coste económico a gran escala pero como desventaja conlleva emisiones de CO<sub>2</sub>, aproximadamente unos 7 kg de CO<sub>2</sub> por kg de hidrógeno producido.

Por otra parte, existen ciertos procesos como la electrólisis, termólisis, fotoelectrólisis,..., limpios en lo que a emisiones de CO<sub>2</sub> se refiere, basados en la rotura de la molécula de agua, que precisan también un consumo de energía para dicho fin, según la siguiente reacción:



Dentro de las diferentes tecnologías nombradas sólo se va a describir con detalle la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua, ya que es en este proceso en el que se fundamenta el funcionamiento de un electrolizador.

En última instancia hacer solo referencia de las diferentes técnicas de almacenamiento de hidrogeno comercialmente establecidas y de consumo de hidrogeno.

La elección del sistema de almacenaje más adecuado dependerá de la aplicación final en la que vaya a utilizarse. De manera resumida se puede citar los siguientes: almacenamiento a presión, almacenamiento líquido y mediante hidruros metálicos.

Ahora bien, para el consumo del hidrogeno y transformar la energía química contenida en otro tipo de energía como la electricidad o el calor, es necesario emplear dispositivos como las pilas de combustible (integradas en ciclos combinados o no) o los motores de combustión interna.

Las pilas de combustible se sustentan en el principio inverso de la electrólisis; es decir, combinar oxígeno e hidrógeno para formar agua y electricidad. En general, el binomio hidrógeno–pila de combustible puede ser utilizado donde se necesite energía eléctrica. En la figura 2-16 se puede observar una lista con los distintos tipos de pilas de combustibles más destacables.

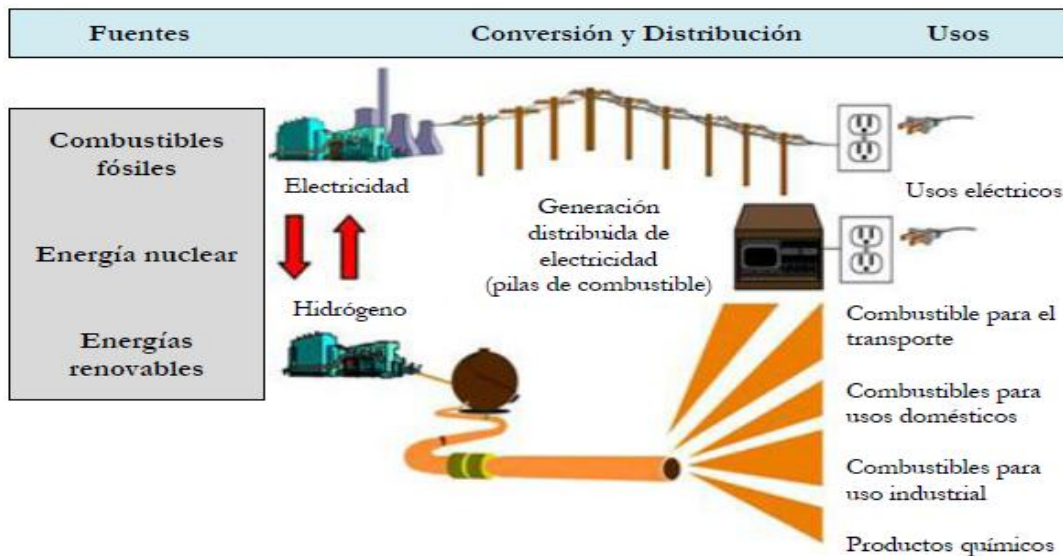


Figura 2-15: Sistema energético basado en la electricidad y hidrogeno como vectores energéticos (Sherif, Barbir, & Veziroglu, 2005; Pino, 2010)

Nombre	Siglas (en inglés)	Aplicaciones
Pilas de combustible Alcalinas	AFC	Frecuentemente empleadas en lanzaderas espaciales.
Pilas de combustible Poliméricas	PEMFC	Automoción y aplicaciones portátiles; sistemas de comunicaciones.
Pilas de combustible Poliméricas de Metanol Directo	DMFC	Aplicaciones portátiles (microelectrónica).
Pilas de combustible de Ácido Fosfórico	PAFC	Aplicaciones estacionarias y ocasionalmente para transporte (autobuses). Generación distribuida.
Pilas de combustible de Carbonatos Fundidos	MCFC	Aplicaciones estacionarias y con posibilidad de cogeneración. Generación distribuida.
Pilas de combustible de Óxido Sólidos	SOFC	Generación centralizada de electricidad, integración en ciclos combinados.

Figura 2-16: Distintos tipos de pilas de combustibles existentes (Agencia Andaluza de la Energía, 2010)



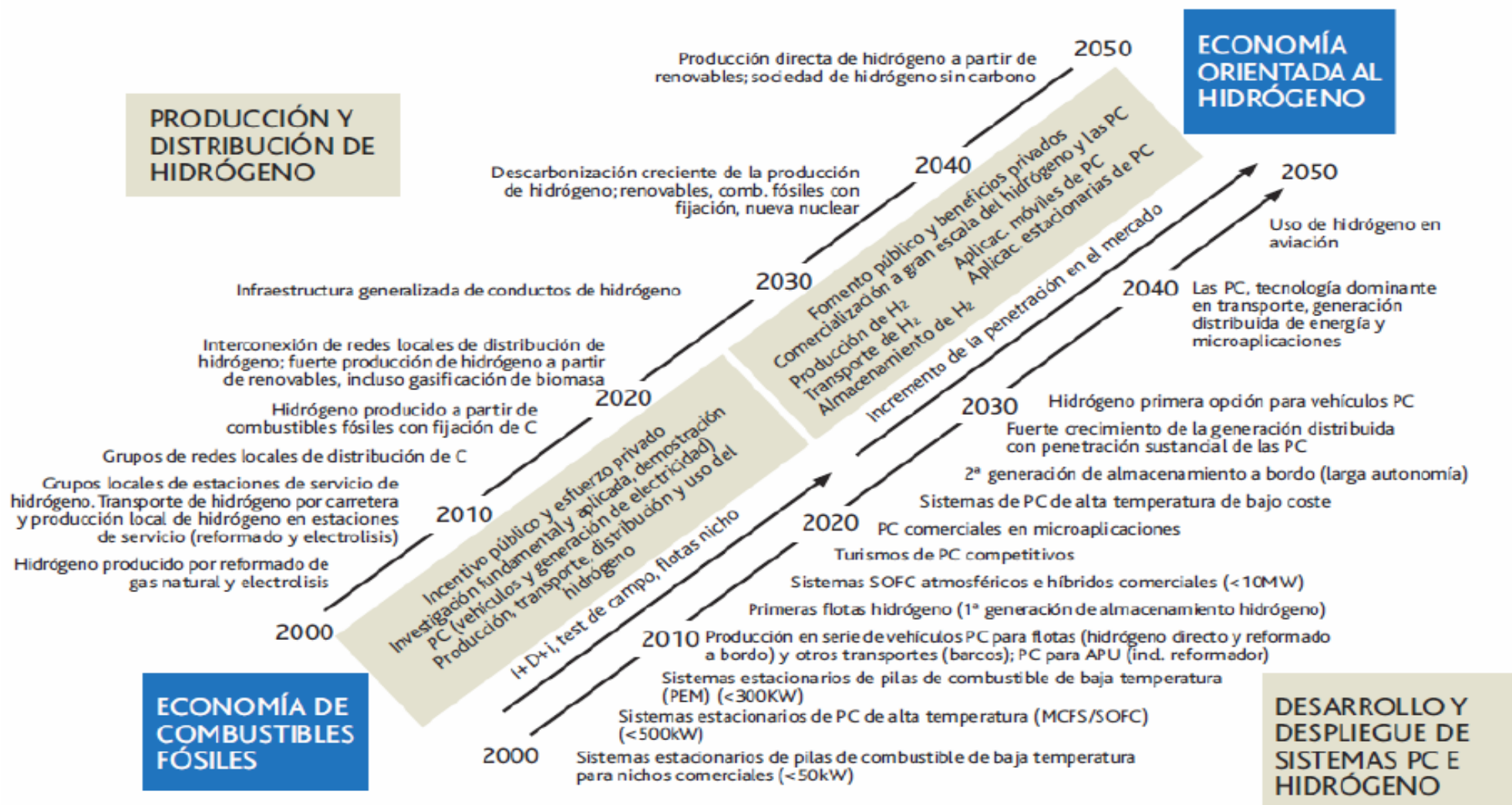


Figura 2-17: Hoja de ruta para una economía del hidrógeno (Directorate-General for Reserach, European Commision, 2003; Pino, 201

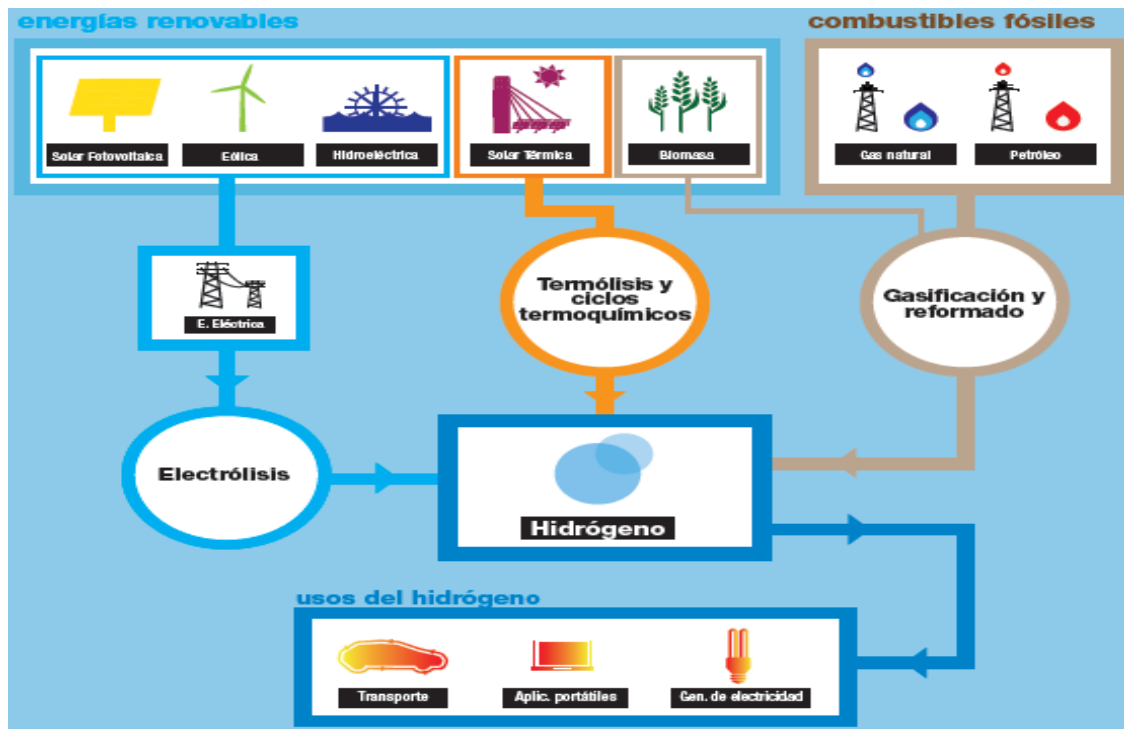
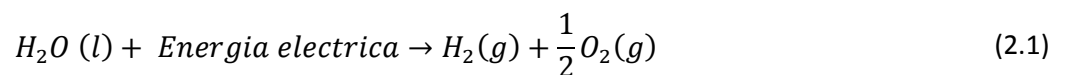


Figura 2-18: Cadena de producción del hidrogeno (Agencia Andaluza de la Energía, 2010)

### 2.4.1. Electrólisis

Hay que retroceder hasta los comienzos de la Revolución Industrial para advertir los comienzos de la electrólisis del agua. Fue en el 1789 cuando los científicos alemanes P. van Troostwijk y Diemann aplicaron descargas eléctricas a una masa de agua concibiendo lo que hoy se entiende por electrólisis del agua.

La electrólisis del agua es un proceso electro-químico en el cual el paso de una corriente eléctrica continua a través del agua, produce la disociación en hidrogeno y oxígeno. El hidrogeno se recoge en el cátodo y el oxígeno en el ánodo.



Existen distintos tipos de tecnologías compatibles con la electrólisis del agua. De acuerdo al electrolito utilizado se diferencia entre electrólisis alcalina, electrólisis acida y electrolizadores de óxidos sólidos. Solo las dos primeras tienen la suficiente madurez para su uso comercial por lo tanto serán las únicas que se expongan.

#### 2.4.1.1. Electrolisis acida

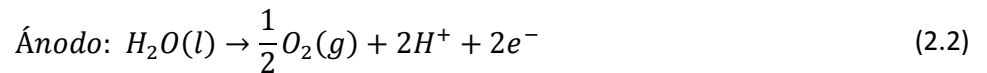
Esta está basada en electrolizadores con membrana de intercambio protónico (PEM). Aunque es una tecnología menos madura que la de los electrolizadores alcalinos y menos robusta presenta una serie de ventajas que le posiciona en un puesto más prometedor para el acople

directo con fuentes renovables. Están son su mayor seguridad y fiabilidad, al no existir un fluido en movimiento; una mayor pureza de los gases obtenidos, al no haber arrastre de electrolito; y unas pérdidas óhmicas de la membrana menores que las del electrolito líquido, por lo que para una misma intensidad eléctrica, el voltaje de operación de la celda electrolítica será menor.

También habría que puntualizar que la electrólisis ácida produce mayores problemas de corrosión y desactivación en los electrodos, lo que exige un mayor mantenimiento.

Durante los últimos años ha tenido lugar un avance en esta tecnología a raíz del desarrollo de las pilas combustible de intercambio protónico (PEMFC), debido a que comparten electrodos y membrana.

En estos electrolizadores, el agua es introducida por la zona del ánodo y dissociada en oxígeno, protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana (PEM) hacia el cátodo por el campo electrónico, donde se combinan con los electrones procedentes del circuito externo para formar hidrogeno gas. Las semireacciones que tienen lugar durante este proceso son:



Un esquema básico de las células de estos electrolizadores se puede apreciar en la figura 2-19.

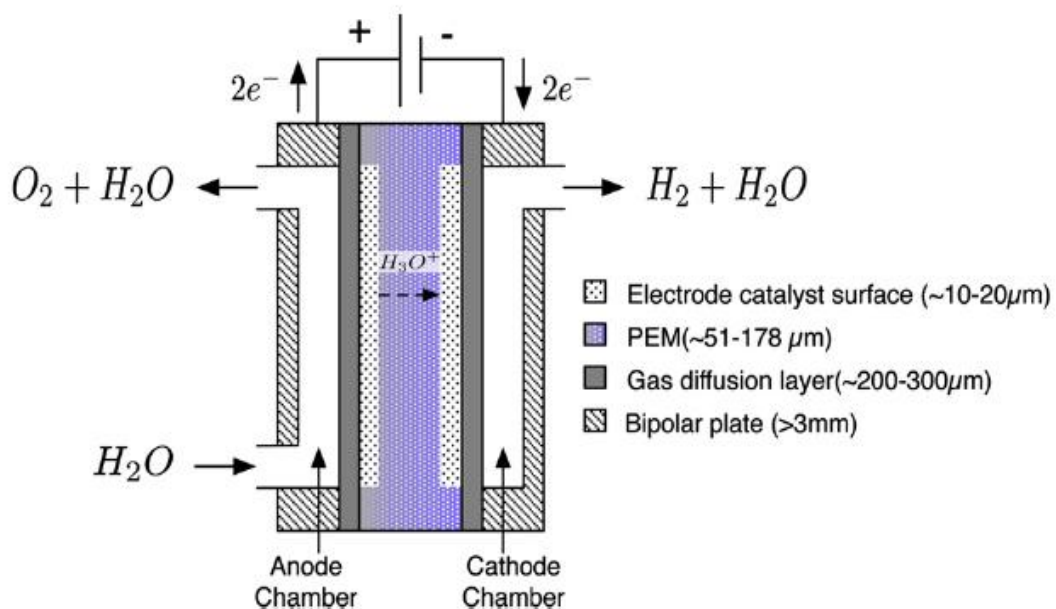


Figura 2-15: Principio de operación y esquema básico de la célula electrolítica de un electrolizador PEM (R. García-Valverde, 2011)

Los catalizadores usados para el tratamiento de los electrodos son: platino, iridio, rutenio y rodio. La membrana que se suele emplear es derivada del Teflón y comercialmente es conocida como Nafion<sup>TM</sup> 117.

#### 2.4.1.2. Electrólisis alcalina

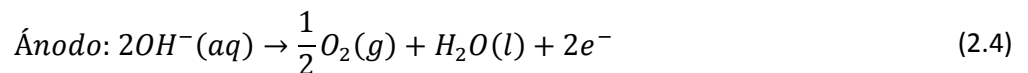
El electrolito usado tradicionalmente en los electrolizadores alcalinos corresponde a una mezcla de agua con un hidróxido potásico (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH), generalmente con una concentración entre el 20% y el 30% ya que en este rango converge una conductividad iónica óptima y una notable resistencia a la corrosión del acero inoxidable.

La temperatura y presión típica de operación oscila entre los 70-100°C y de 1-30 bar respectivamente.

En estos electrolizadores el ánodo y cátodo están separados por un diafragma cerámico o de polisulfonato. Este es impermeable a los gases pero permite el paso de líquidos y de la corriente eléctrica.

En el cátodo se disocian dos moléculas de agua en una de hidrógeno gas y dos iones hidroxilos. El hidrógeno generado abandona el compartimento por la superficie del compartimento catódico y el ión hidroxilo migra bajo la influencia del campo eléctrico a través de la membrana porosa hacia el ánodo donde se disocia en una molécula de agua y media molécula de oxígeno. El oxígeno se recombina en la superficie del compartimento anódico y escapa del mismo en forma gaseosa. Por lo tanto para continuar el ciclo es necesario el aporte continuo de agua. De modo general, se realiza a través del separador de gases del compartimento catódico (Pino, 2010).

Las semireacciones que tienen lugar son:



En una solución alcalina los electrodos deben ser resistentes a la corrosión, al igual que deben tener una buena conductividad eléctrica y propiedades catalíticas, sin obviar una buena integridad estructural, mientras que el diafragma debería tener una baja resistencia eléctrica. Estos requisitos se pueden lograr mediante el uso de ánodos basados en níquel, cobalto y hierro (Ni, Co, Fe), cátodos basados en níquel activados catalíticamente con platino (Ni, C-Pt) y diafragmas de óxido de níquel (NiO).

En la figura 2-20 se puede apreciar un esquema y principio de funcionamiento de una célula de un electrolizador alcalino.

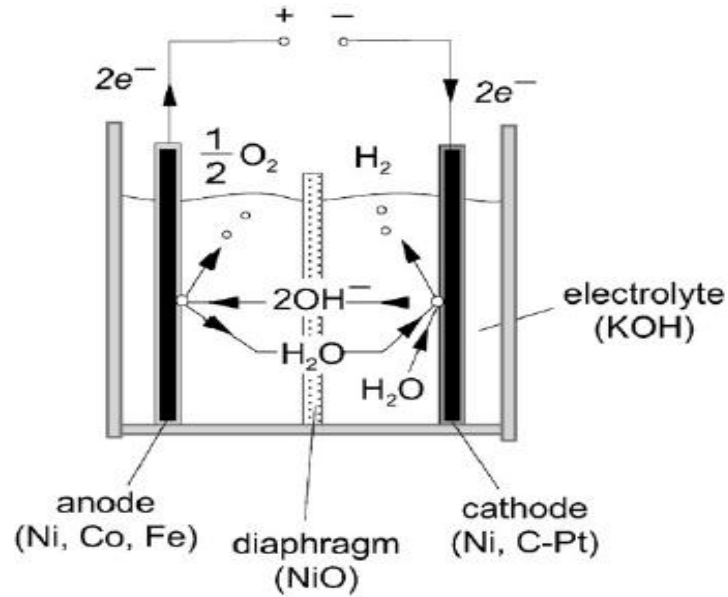


Figura 2-16: Principio de operación y esquema básico de una célula de un electrolizador alcalino (Ulleberg, 2003)

#### 2.4.2. Electrolizador

El equipo en el cual tiene lugar la electrolisis se denomina electrolizador. Físicamente un electrolizador consiste en varias células conectadas en serie-paralelo. Cada una de ellas con una serie de elementos comunes que ya se han ido mencionando con anterioridad. Estos son:

- Los electrodos, cátodo y ánodo.
- El electrolito. Este va a determinar el tipo de electrolizador, siendo los más usados los ácidos (electrolito en estado sólido) y los alcalinos (electrolito en estado líquido). Este último está formado por agua y una sustancia que ayuda en el transporte de iones entre el cátodo y el ánodo, tradicionalmente el hidróxido de potasio (KOH).
- El diafragma. Es una membrana que dependiendo del electrolizador limita el paso de compuestos entre la parte anódica y catódica de la celda, impidiendo la mezcla del hidrógeno y oxígeno producido.

En la figura 2-20 se puede apreciar un esquema básico de una celda del un electrolizador alcalino, comercialmente el más extendido, donde aparece los elementos enumerados anteriormente.

En función del modo en que se conecten eléctricamente estas células se diferencia dos diseños: unipolar y bipolar.

En el diseño unipolar o en paralelo, los electrodos son negativos o positivos con conexión en paralelo de cada célula (figura 2-21). Es un diseño más simple y robusto que el bipolar, lo que implica que los gastos de manufacturación sean menores y más fáciles de operar. Las presiones de trabajo alcanzan cotas menores por lo que el consumo de la bomba de alimentación disminuye.

Como contrapunto ocupan más espacio para una misma producción de hidrogeno y el embarrado eléctrico es más complejo.

Por su parte en el diseño bipolar las células están conectadas en serie eléctrica y geoméricamente (figura 2-22). Este diseño es más compacto que el anterior, por lo tanto la ruta a recorrer por la corriente a través de los electrodos y cables es menor, lo que reduce las perdidas por resistencia óhmica incrementando la eficiencia del electrolizador. Sin embargo presenta ciertas desventajas, aparecen corrientes parasitas entre las distintas celdas electrolíticas que pueden causar problemas de corrosión, su compacidad y altas presiones requieren un diseño más sofisticado y complejo que en el caso unipolar, incrementando los costes de manufacturación y de la bomba de alimentación, requiere protecciones eléctricas mayores debido a la mayor diferencia de potencial. A pesar de todo lo anterior, la mayoría de los electrolizadores alcalinos hoy en día son bipolares.

Al ser la corrosión en medio ácido más acusada que en medio alcalino, hecho que en definitiva se traduce en mayores costes, ha propiciado el predominio de los electrolizadores alcalinos para la producción de hidrogeno en el mercado.

En los nuevos modelos comerciales de electrolizadores alcalinos, la evolución de estos se ha encaminado en una reducción del voltaje de operación de las células y un aumento de la densidad de corriente. Con estas modificaciones se ha logrado reducir los costes de operación, al reducir la potencia eléctrica, y los costes de inversión al incrementar la densidad de corriente. Sin embargo, como contrapartida, el incrementar la densidad de corriente ha propiciado por un lado el aumento del burbujeo del gas, incrementado la resistencia óhmica en el electrolito, y a su vez el incremento de la sobretensión en ánodos y cátodos.

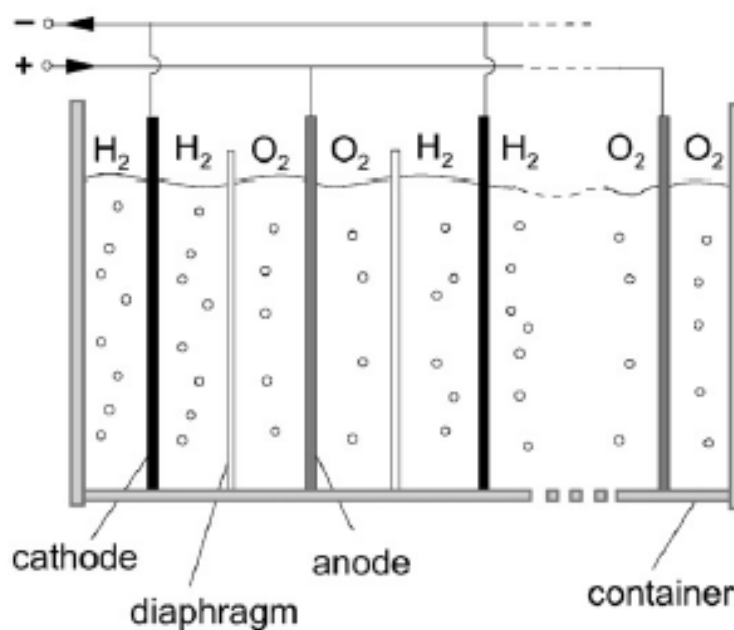
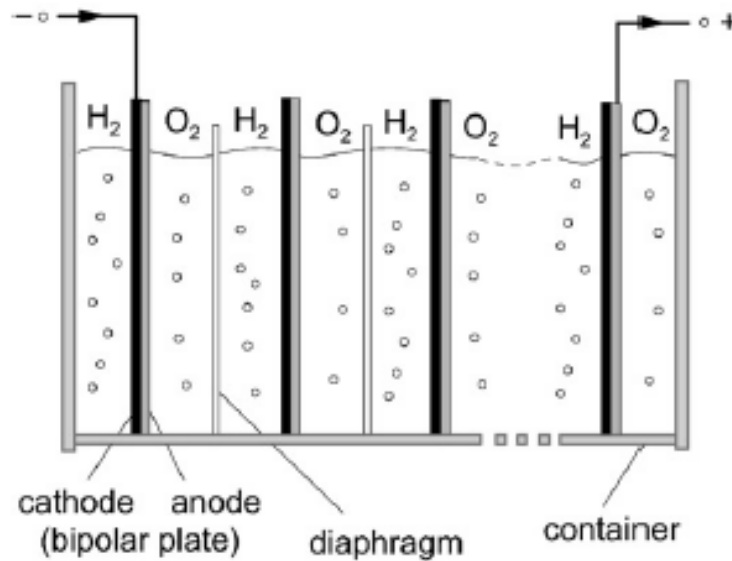


Figura 2-17: Esquema de conexión de un electrolizador unipolar (Ulleberg, 2003)



**Figura 2-18: Esquema de conexión de un electrolizador bipolar (Ulleberg, 2003)**

Actualmente tres mejoras distintas se pueden implementar en el diseño de los electrolizadores alcalinos:

- Una nueva configuración de la célula con el objetivo de reducir la resistencia de la superficie específica de la célula a pesar de aumentar la densidad de corriente. A título de ejemplo se puede citar las células zero-gap o los diafragmas de baja resistencia. La mayoría de fabricantes han adoptado el diseño de las células zero-gap, en estas los materiales del electrodo se presionan a ambos lados del diafragma por lo que los gases de hidrógeno y oxígeno están forzado a abandonar los electrodos por la parte posterior.
- Procesos a altas temperaturas, por encima de 160°C, para reducir la resistencia eléctrica de la célula al incrementar la conductividad eléctrica del electrolito.
- Nuevos electrocatalizadores para reducir la sobretensión tanto anódica como catódica, a título de ejemplo se puede nombrar el uso de un tipo de recubrimiento metálico, el cual contiene óxido de cobalto en el ánodo y níquel Raney en el cátodo.

Aparte de las diversas mejoras susceptibles en los electrolizadores alcalino y la línea de evolución de estos, el criterio en la elección entre uno unipolar o bipolar radica principalmente en las presiones de operación o consumo deseadas. Cuando se precisa de hidrógeno a presión atmosférica se opta por electrolizadores unipolares, mientras que si se precisa de hidrógeno a presión (hasta 30 bar) se opta por configuraciones bipolares. Desde el punto de vista de la pureza, en un electrolizador alcalino se obtiene hidrógeno con una pureza de 99,8% de H<sub>2</sub> en volumen, el resto es oxígeno y vapor de agua. Si se precisa una pureza superior, la incorporación de una unidad de purificación adicional (secado y deoxo) permiten alcanzar una pureza de 99,999% en volumen (Pino, 2010).

### 2.4.3. *Sistemas híbridos*

Los sistemas híbridos agrupan las fuentes de energía renovables junto con una o más fuentes convencionales de energía. Como ya se ha ido recalando a lo largo del texto, las fuentes de energía renovable, como la solar o el viento, no proporcionan una potencia constante, pero la combinación de estas puede proporcionar una corriente eléctrica continua al complementarse entre sí.

El propósito de los sistemas híbridos por lo tanto reside en producir toda la energía posible procedente de fuentes renovables para garantizar la demanda eléctrica, o si no fuese posible maximizar el aporte de estas fuentes.

¿Pero qué papel adquiere el hidrogeno en este escenario?

Por medio del hidrógeno tiene lugar el acoplamiento entre la fuente de energía primaria y punto de consumo de esta, ya bien directamente a través de pilas de combustible, consumo eléctrico, o motores de combustión interna, aplicaciones industriales y automovilísticas. Por lo tanto el rol de la tecnología del hidrógeno es el de servir de sistema de almacenamiento de energía.

En general los sistemas híbridos comparten una serie de elementos aparte de las fuentes de energía como son: sistema de distribución en corriente continua (DC) o alterna (AC), un sistema de almacenaje, convertidores, filtros y un sistema de control para la gestión. Todos estos se pueden conectar de diversas formas dando lugar a diferentes arquitecturas.

La potencia generada por un sistema híbrido puede variar desde la necesaria para un uso para aplicaciones domesticas hasta asociarse a plantas de generación de potencia que abastecen industrias y ciudades. De manera usual, los sistemas híbridos usados en aplicaciones de baja potencia (por debajo de los 5 kW) alimentan con una corriente continua, siendo los sistemas de mayores potencias, generalmente diseñados para su conexión a la red, los que alimentan en corriente alterna.

A continuación se expondrá una serie de sistemas híbridos donde el hidrogeno juega su papel:

- La integración de la energía fotovoltaica junto con células de combustible es un recurso para la producción de electricidad sin interrupción en áreas remotas. Por lo general consiste en una serie de placas fotovoltaicas, un electrolizador alcalino, un depósito de gas, la pila de combustible (habitualmente de membrana de intercambio protónico) y la unidad de control. La energía es producida por el generador fotovoltaico, sin embargo durante periodos donde la radiación solar es baja y la célula de combustible entra en escena. El electrolizador alcalino es alimentado con el exceso de energía procedente de las placas fotovoltaicas, almacenando este exceso en forma de hidrogeno gas consiguiéndose de esta manera un sistema fiable que consiga suministrar la carga demanda.
- En la misma línea que la disposición anterior, al añadir una batería a la ecuación se logran ciertos beneficios. Por un lado, la pila de hidrogeno adquiere un rol secundario entrando en escena solo cuando la batería alcanza el mínimo nivel de carga permitido y la demanda excede la potencia producida por el generador fotovoltaico. La batería tiene



una respuesta más rápida y flexible que las pilas de hidrogeno, estas últimas mejoran su eficiencia al incrementar la temperatura mientras operan.

- También tiene cabida la posibilidad de combinar varias fuentes de energía renovables como se apuntó anteriormente. La combinación de la energía eólica y fotovoltaica junto un electrolizador y celda de combustible es habitual, y una solución para el cambio, necesario, en el modelo energético de abastecimiento actual. Al igual que el primer caso expuesto, con el exceso de potencia generado, por un lado por los aerogeneradores, paso intermedio por un convertidor AC/DC, y por otro por la placa fotovoltaicas, esta puede disponer o no de convertidor DC/DC, se alimenta un electrolizador. De esta manera se consigue almacenar el exceso de potencia en forma de hidrogeno, susceptible de usarse durante periodos de baja irradiancia o vientos insuficiente en celdas de combustible.

## 3. Modelos matemáticos

### 3.1. Generador fotovoltaico

Un generador fotovoltaico es el dispositivo encargado de transformar la radiación solar en electricidad. Está constituido por una asociación serie-paralelo de módulos que, a su vez, son el resultado de una agrupación serie-paralelo de células solares. La célula solar es el dispositivo básico de conversión de energía.

#### 3.1.1. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es el dispositivo que transforma la radiación solar en energía eléctrica. El fenómeno que tiene lugar se denomina efecto fotovoltaico, este se puede producir en sólidos, líquidos y gases. Hoy día se logran las mejores eficiencias con materiales sólidos.

De momento se va a obviar el principio de funcionamiento de la célula fotovoltaica, ya que a efectos prácticos su funcionamiento está descrito por la curva característica.

##### 3.1.1.1. Catálogo del fabricante

La curva que caracteriza una célula solar junto a una serie valores y términos que la caracterizan vienen proporcionados por el fabricante en el catálogo o manual de su producto. En este apartado se expondrán los más destacables.

La curva característica refleja el comportamiento eléctrico de una célula solar, está contiene los puntos de trabajo en intensidad y tensión para un determinado valor de la radiación incidente y la temperatura de la célula.

Estos valores se han referenciado respecto a unas condiciones climáticas de referencia, establecidas por la norma ICE 60904, para facilitar la comparación entre distintas células o módulos fotovoltaicos. Los susodichos valores son:

- Nivel de irradiancia  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .
- Temperatura de la célula =  $25^\circ\text{C}$ .
- Espectro de radiación definido (distribución espectral de un nivel de radiación de referencia según IEC 60904-3) con una masa de aire,  $AM = 1.5$ .

Principalmente son tres puntos de la curva los que la caracterizan y vienen proporcionado en el manual del fabricante:

- El punto de máxima potencia. Este es el punto de la curva en el que la célula produce la máxima cantidad de potencia. Lo define una intensidad  $I_{pmp}$ , una tensión  $U_{pmp}$  y un valor de potencia  $P_{pmp}$ . A la máxima en condiciones estándar se la denomina “potencia pico” y su unidad es el vatio pico,  $W_p$ .

- Intensidad de cortocircuito ( $I_{sc}$ ). Es la intensidad que genera la célula cuando la tensión a la que se la somete es nula. Su valor oscila entre un 5% y un 15% a la intensidad en el punto de máxima potencia,  $I_{mp}$ .
- Tensión de circuito abierto ( $U_{oc}$ ). Es la tensión a la cual la célula no produce intensidad.

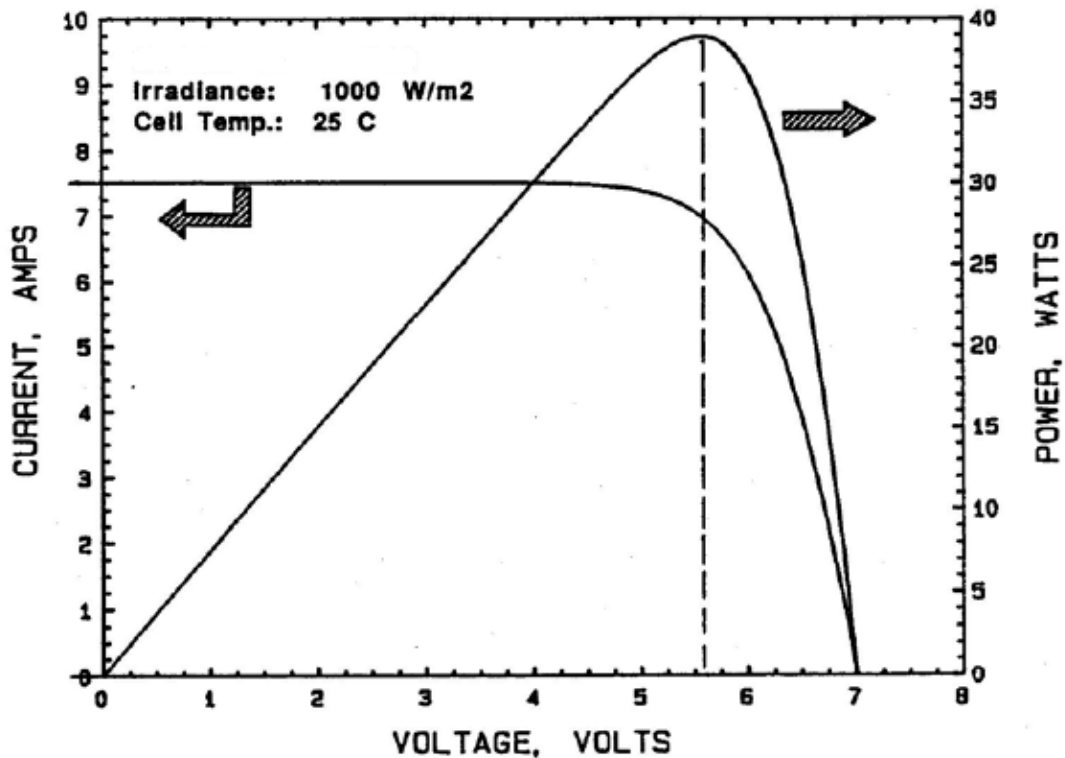


Figura 3-1: Curva característica de una célula fotovoltaica en condiciones estándar (Townsend, 1989)

Al hablar del punto de máxima potencia, se ha hecho mención al termino “potencia pico” y su unidad vatio pico (Wp). La potencia que produciría una célula solar (o módulo fotovoltaico) al operar a la tensión de máxima potencia en condiciones estándar es la potencia pico de esta.

Un parámetro que aparece asociado a la potencia pico es la tolerancia, que indica la variación máxima (inferior o superior) que puede existir en la potencia pico de un módulo concreto respecto a los datos que aparecen en el catálogo del fabricante del modulo o célula en cuestión, frecuentemente los valores oscilan entre un +/-5% y un +/-3%.

Otro parámetro de la curva característica es su factor de forma (FF). Este mide lo cuadrada que es la curva característica. 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. Da una idea las imperfecciones de las células y no es directamente medible.

Un valor típico células cristalinas se sitúa entre 0.75 y 0.85, algo menor para células amorfa, entre 0.5 y 0.7.

Para caracterizar térmicamente una célula se emplea la “temperatura de operación nominal de la célula” (TONC). La suele suministrar el fabricante y varía entre 41 y 48°C. Esta indica la temperatura que alcanza la célula respecto a unas condiciones de referencia diferentes respecto a las que define la curva característica. Estas condiciones son las siguientes:

- Irradiancia: 800W/m<sup>2</sup>
- Distribución espectral: AM 1.5
- Incidencia normal
- Temperatura ambiente: 20°C
- Velocidad del viento: 1 m/s

Frecuentemente, aparte de la temperatura de operación nominal de la célula, en la ficha técnica de la célula o módulo fotovoltaico se suele proporcionar unos coeficientes que caracterizan la influencia de la temperatura en la curva característica.

Suponiendo que la irradiancia permanece constante, al aumentar la temperatura de una célula se produce una disminución de la tensión de máxima potencia en la célula sin aumentar prácticamente la intensidad en dicho punto. En consecuencia, la potencia máxima que produce disminuye.

La intensidad de cortocircuito, por el contrario, aumenta muy ligeramente al aumentar la temperatura de la célula.

### ***3.1.2. Circuito equivalente básico***

Para el desarrollo del circuito equivalente de una célula fotovoltaica, un posible buen punto de partida es la distinción de las distintas partes físicas que la componen y las características eléctricas de estos elementos.

Para ello no hace falta entender con plenitud el fenómeno físico que tiene lugar, el efecto fotoeléctrico, ni tampoco es objeto del trabajo, sino que es suficiente con tener presente como se comporta una célula fotovoltaica.

Esta posee dos láminas semiconductoras, una de carga neta positiva y otra negativa, la unión de estas crea el efecto de un diodo. Al ser alcanzada por la irradiancia actúa simultáneamente como un generador de corriente y un diodo conectado en paralelo.

En la figura 3-2 se puede apreciar un esquema de los componentes físicos y el principio de funcionamiento de una célula solar.

En la figura 3-3 se recoge el circuito básico que reúne el principio de funcionamiento ideal de una célula fotovoltaica.

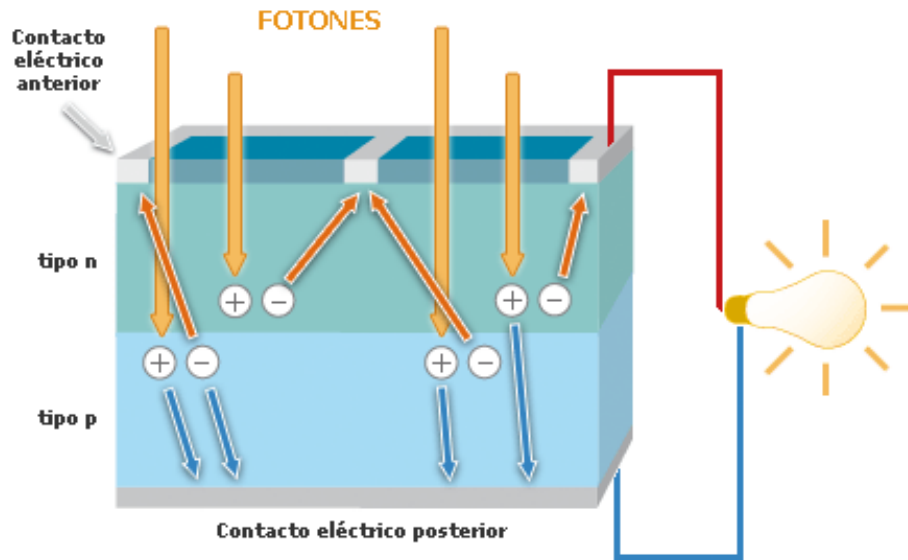


Figura 3-2: Esquema de componentes físicos y principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica

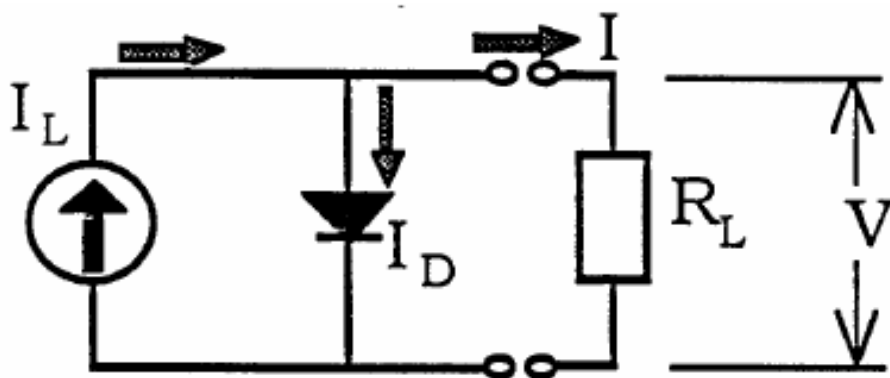


Figura 3-3: Circuito equivalente de una célula fotovoltaica ideal (Townsend, 1989)

Los términos que aparecen en la figura 3.3 corresponden:

- $I$ : corriente de salida
- $V$ : voltaje de salida
- $R_L$ : resistencia
- $I_L$ : corriente generada o “corriente de luz” (traducción literal de termino acatado por el autor, “light current”) =  $f(\text{irradiancia, temperatura de la célula, material, área})$
- $I_D$ : corriente que recorre el diodo =  $f(\text{voltaje, temperatura celula, material})$

Del balance en el nudo, al asumir las direcciones tal como aparecen en la figura 3-3, se obtiene:

$$I = I_L - I_D \quad (0.1)$$

La corriente generada es directamente proporcional a la intensidad de la radiación solar absorbida, linealmente relacionada con la temperatura de la célula solar. Para una célula dada la corriente generada es expresada respecto a las medidas de la misma célula en las condiciones de referencia.

$$I_L = \left( \frac{E}{E_{ref}} \right) * (I_{L,ref} + \mu_{ISC} * (T_C - T_{C,ref})) \quad (0.2)$$

- $E, E_{ref}$  : irradiancia en las nuevas condiciones y en las de referencia, [W/m<sup>2</sup>].
- $I_{L,ref}$  : corriente generada en las condiciones de referencia, [A].
- $\mu_{ISC}$  : coeficiente proporcionado por el fabricante que expresa la variación de la intensidad de cortocircuito con la temperatura de la célula, [A/°C].
- $T_C, T_{C,ref}$  : temperatura de la celula en las nuevas condiciones y en las de referencia.

La corriente del diodo:

$$I_D = I_0 * \left( \exp\left(\frac{q * V}{\gamma * k * T_C}\right) - 1 \right) \quad (0.3)$$

- $I_0$  : corriente de saturación inversa, [A].
- $q$  : carga del electrón,  $1.602 \times 10^{-19}$ [C].
- $k$  : constante de Boltzmann,  $1.381 \times 10^{-23}$ [J/K]
- $\gamma$  : factor de forma.

$$I_0 = D * T_C^3 * \exp\left(\frac{q * \varepsilon_G}{A * k * T_C}\right) \quad (0.4)$$

- $D$  : factor de difusión del diodo, prácticamente constante.
- $\varepsilon_G$  : “bandgap” o brecha energética (1.12 eV para el Si y 1.35 eV para GaAs eV)

La corriente que transcurre por el diodo es la que crea la forma característica de la curva I-V de la célula fotovoltaica, al añadir la corriente generada, traslada hacia arriba. En la figura 3-4 se aprecia la diferencia. Observar que la célula solo genera energía en el primer cuadrante.

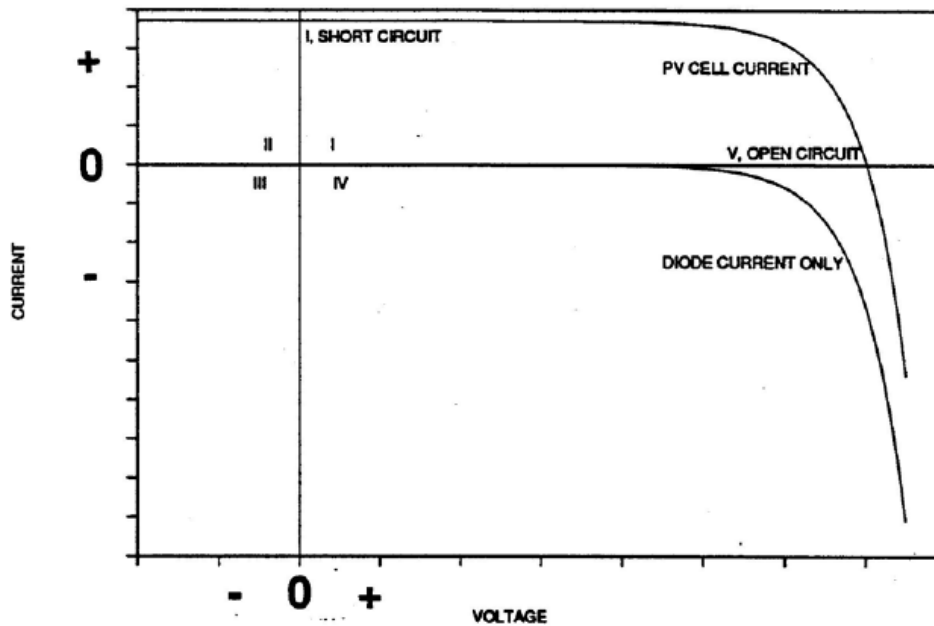


Figura 3-4: Curva I-V del diodo y de la célula (Townsend, 1989)

### 3.1.3. Circuito equivalente de partida

El circuito básico o ideal aunque proporcione una buena aproximación al comportamiento de una célula fotovoltaica no tiene en consideración ciertos aspectos. En las células existen imperfecciones estructurales, que junto con las propiedades inherentes a los materiales introducen resistencias y otras ineficiencias que limitan la respuesta de salida de la célula.

A su misma vez, el diodo y el generador no exactamente responden a una agrupación singular, sino más bien estarían distribuidos por todo el volumen de la célula.

Por ello Townsend para el desarrollo del modelo matemático presenta un circuito generalizado como punto de partida, para posteriormente a través de una serie de simplificaciones llegar a cinco circuitos distintos. Solo uno de ellos resuelto en su plenitud, siendo la resolución de este susodicho circuito la escogida para este trabajo.

El circuito equivalente que mejor aproxima la distribución natural de una célula fotovoltaica es el que aparece en la figura 3-5.

El autor desarrolla este circuito a partir del descrito por Wolf [referencia] en 1961, al que incluyó un componente que incluyese una resistencia de la corriente en paralelo.

Sin embargo, tanto Wolf como Townsend concluyeron que este circuito era demasiado complejo para su evaluación y la obtención de una expresión I-V práctica. Por ello, ya Wolf simplificó el circuito a solo 7 parámetros, y obrando de manera similar, Townsend a partir del circuito equivalente distribuido (figura 3-5) apoyándose en ideas de las simplificaciones llevadas a cabo por Wolf definió su propio circuito equivalente (figura 3-6).

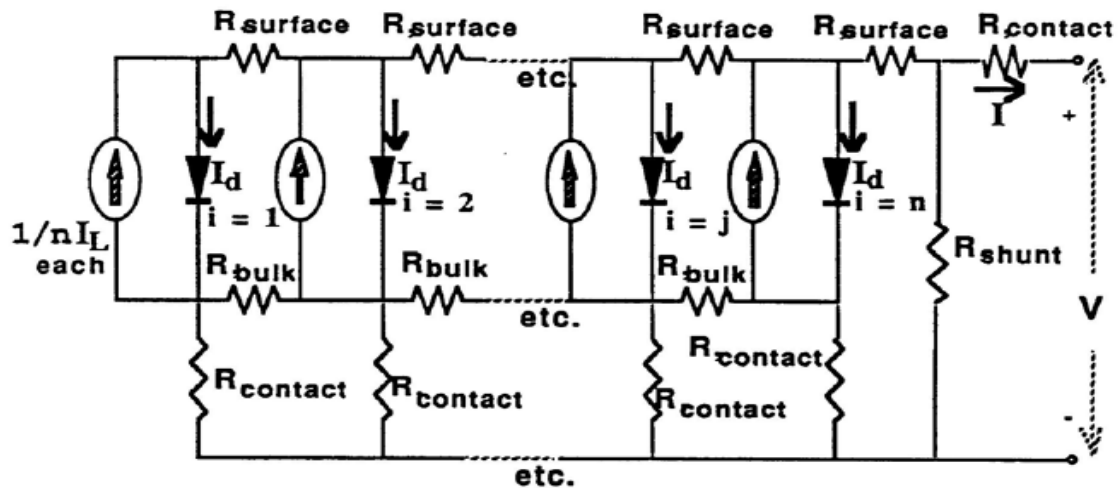


Figura 3-5: Circuito equivalente distribuido (Townsend, 1989)

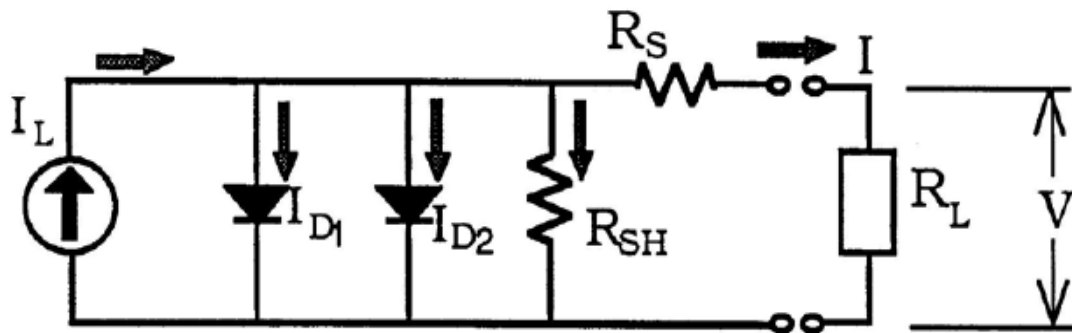


Figura 3-6: Circuito equivalente de partida (Townsend, 1989)

Las ecuaciones que describen este circuito:

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{(V + I * R_S)}{R_{SH}} \quad (0.5)$$

$$I_{D1} = I_{O1} * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma_1 * k * T_C} * (V + I * R_S) \right) - 1 \right) \quad (0.6)$$

$$I_{D2} = I_{O2} * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma_2 * k * T_C} * (V + I * R_S) \right) - 1 \right) \quad (3.7)$$

- $R_{SH}$  : resistencia en paralelo

Como ya se comento con anterioridad, a partir de una serie de simplificaciones el autor llega a 5 circuitos equivalentes distintos. Para el caso que atañe solo se expondrán las diferentes



simplificaciones que acomete, pero solo se desarrollará llegado el momento el circuito y la relación de ecuaciones I-V utilizadas en el análisis de sensibilidad.

### *Primera simplificación*

La primera simplificación es común en todos los circuitos simplificados. Esta asume que la resistencia en paralelo es infinita y por lo tanto la corriente que la recorre despreciable.

La simplificación viene justificada por el hecho de que la resistencia en paralelo es generalmente mayor que las otras presentes en la célula o módulo fotovoltaico y solo afecta de manera significativa a la forma de la curva I-V a irradiancias extremadamente bajas, donde el efecto de la curva adquiere menor importancia. A medida que este término es mayor, la curva característica se encoge y el voltaje de circuito abierto decrece. Por lo que al asumir la resistencia infinita se introduce un pequeño error en la estimación de producción a largo plazo ya que la producción de potencia a baja irradiancia es menor.

En la figura 3-7 se puede apreciar como la diferencia, con un valor elevado de irradiancia, entre una curva característica en la que se asume la resistencia en paralelo infinita y otra en la que esta tiene un valor de 500 ohmios es apenas apreciable (0.06% es la diferencia en el punto de máxima potencia). Tal como muestra la figura 3-8, al reducir la irradiancia a un nivel bajo se acentúa la diferencia (en el punto de máxima potencia esta vez la diferencia es de 4.5%), sin embargo el efecto de esta diferencia es menor ya que la irradiancia y la potencia generada es mucho menor que a un nivel alto de exposición a la luz solar.

Otra justificación para asumir la corriente en paralelo despreciable reside en que estas, son debidas principalmente a las corrientes de fugas en las esquinas y bordes de la célula, y por lo tanto se podría minimizar fabricando el módulo con un buen aislante eléctrico.

A partir de esta simplificación Townsend llega al modelo simplificado "M2,6P", con dos diodos y 6 parámetros.

### *Segunda simplificación*

Para la obtención del siguiente circuito equivalente, Townsend asume que la resistencia en serie es despreciable y reduce el circuito equivalente a solo 5 parámetros, "2M,5P".

### *Tercera simplificación*

Para obtener el circuito equivalente utilizado para el análisis de sensibilidad de este trabajo. Townsend a parte de asumir la resistencia en paralelo como infinita, también simplifica el circuito en un solo diodo, que recoge todas las características de diodo de la célula.

El resultado es la obtención de un circuito con 4 parámetros y denominado por el autor como el circuito "UP".

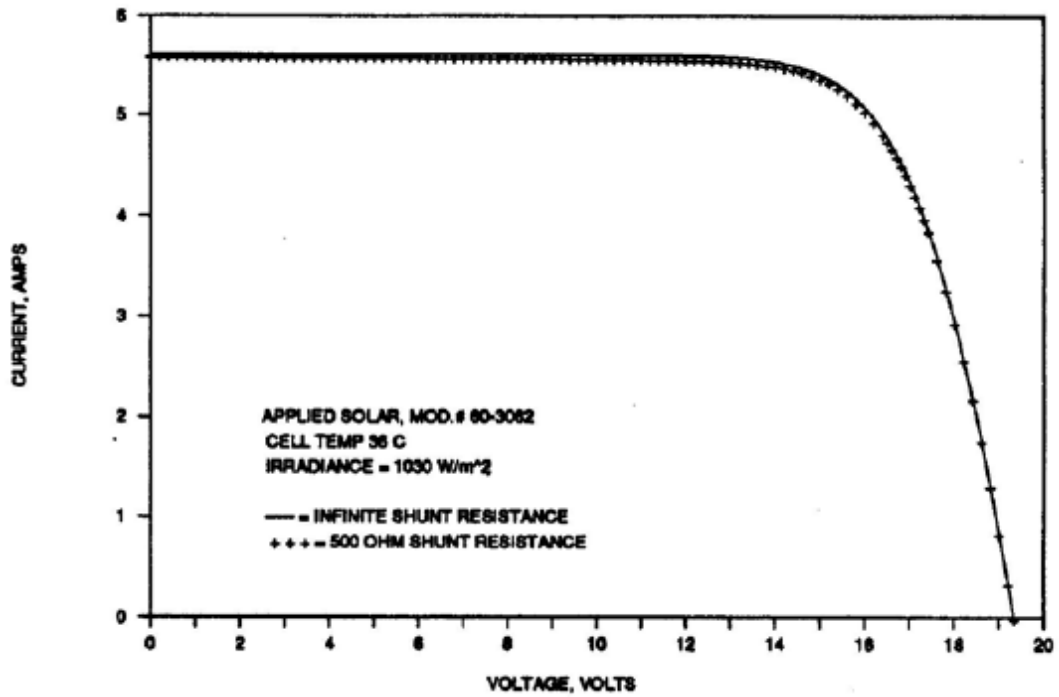


Figura 3-7: Efecto de la resistencia en paralelo a altos niveles de irradiancia (Townsend, 1989)

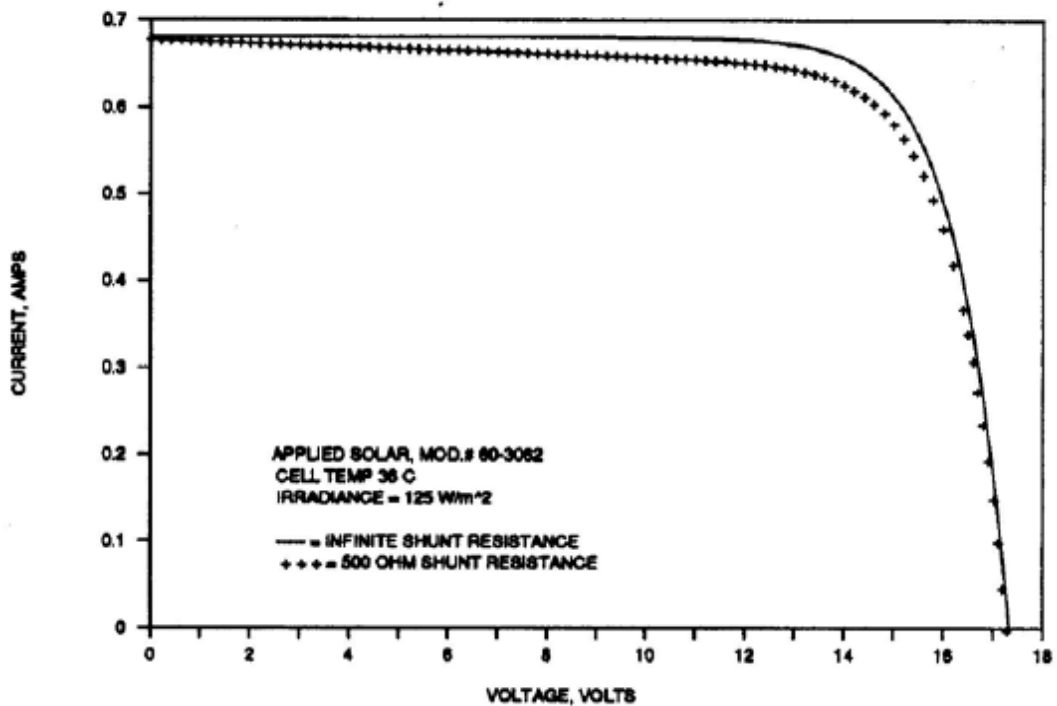


Figura 3-8: Efecto de la resistencia en paralelo a bajos niveles de irradiancia (Townsend, 1989)

*Cuarta simplificación*

A partir del circuito “UP”, Townsend vuelve asumir la resistencia en serie como despreciable. De esta manera obtiene un circuito equivalente al circuito básico ideal excepto que asume que el factor de forma no es ideal, es decir es diferente de uno aceptando un comportamiento no ideal del diodo. Este circuito tiene 3 parámetros.

Hay otro quinto circuito, el modelo “MIT”, el cual es un híbrido entre el circuito de 4 parámetros y el de 3. En las condiciones de referencia iniciales la resistencia en serie es desestimada para obtener los 3 parámetros desconocidos. Al variar las condiciones de referencia incluye sin embargo la resistencia en serie para calcular los nuevos parámetros en las nuevas condiciones, como en el modelo “UP”.

**3.1.3.1.Circuito equivalente**

Las ecuaciones que lo definen:

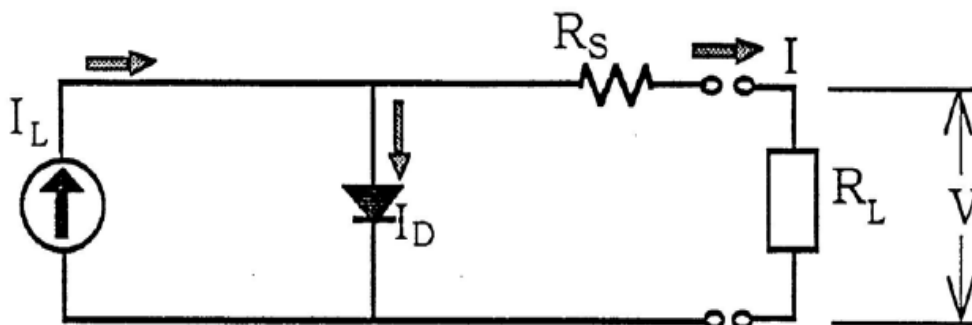
$$I = I_L - I_D \tag{3.8}$$

$$I_D = I_0 * \left( \exp\left(\frac{q}{\gamma * k * T_c} * (V + I * R_S)\right) - 1 \right) \tag{3.9}$$

Los cuatro parámetros del circuito, que son los 4 parámetros de los que partirá el análisis de sensibilidad, son los siguientes:

- $I_L$ : la corriente generada.
- $I_0$ : la corriente de saturación inversa.
- $\gamma$ : el producto del factor de forma y el número de células conectadas en serie.
- $R_S$ : la resistencia en serie.

Siendo la configuración del circuito equivalente la correspondiente a la figura 3-9



**Figura 3-9: Circuito equivalente “UP” (Townsend, 1989)**

### 3.1.3.2.Método de resolución

A partir de la información básica suministrada por el fabricante se resolverá el sistema de ecuaciones para predecir el comportamiento I-V de la célula fotovoltaica bajo unas condiciones climáticas que son variables.

Con los valores del voltaje en circuito abierto, la intensidad de cortocircuito y el punto de máxima potencia, es decir su intensidad y voltaje, todos medidos en las condiciones de referencia, se tiene tres puntos de la misma curva, por lo que satisfacen la misma ecuación.

Los tres puntos proporcionados por el fabricante permiten escribir tres versiones diferentes de la ecuación I-V. El resultado es por lo tanto un sistema no lineal con tres ecuaciones que puede ser resuelto para tres incógnitas. Cada una de las ecuaciones es una función objetivo.

- En el punto de intensidad de cortocircuito:  $I = I_{SC}$  ,  $V = 0$
- En el punto de voltaje de circuito abierto:  $I = 0$  ,  $V = V_{oc}$
- En el punto de máxima potencia:  $I = I_{pmp}$  ,  $V = V_{pmp}$

$$F_1 = -I_{SC} + I_L - I_0 * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma * k * T_C} * (I_{SC} * R_S) \right) - 1 \right) \quad (3.10)$$

$$F_2 = I_L - I_0 * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{oc}) \right) - 1 \right) \quad (3.11)$$

$$F_3 = -I_{pmp} + I_L - I_0 * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{pmp} + I_{pmp} * R_S) \right) - 1 \right) \quad (3.12)$$

Pero aun queda un cuarto parámetro, lo que exige una cuarta ecuación.

La potencia se define como el producto de la intensidad por el voltaje. Como se conoce el punto el cual la potencia es máxima, la cuarta función consistirá en buscar el máximo de la potencia. Es decir la derivada parcial de la potencia respecto el voltaje igualada a cero será la cuarta función objetivo.

$$P = V * I \quad (3.13)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{\partial I}{\partial V} * V + I * \frac{\partial V}{\partial V} \quad (3.14)$$

$$F_4 = 0 = I_L + I_O - I_O * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{pmp} + I_{pmp} * R_S) \right) * \left( 1 + \frac{\frac{q * V_{pmp}}{\gamma * k * T_C}}{\left( 1 + R_S * \frac{q}{\gamma * k * T_C} * I_O * \left( \exp \left( \frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{pmp} + I_{pmp} * R_S) \right) \right) \right)} \right) \right) \quad (3.15)$$

La resolución del entramado de ecuaciones, cuatro funciones que forman un sistema no lineal de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, es numérica. Es requerido por lo tanto un método iterativo para aproximarse a la solución. Townsend se decanta por el método de Newton-Raphson, sin embargo presenta también una solución explícita por sustitución, posible simplificando el sistema de ecuaciones al omitir términos menores. Posteriormente compara ambas soluciones obteniendo unas diferencias mínimas (figura 3-10).

Parameter	Value using Newton-Raphson Method	Value using Simplified Explicit Method	% difference
I <sub>L</sub>	7.811 A	7.811 A	0.0
I <sub>O</sub>	1.7851E-06 A	1.7849E-06 A	-0.01
γ	16.8563	16.8562	-0.0006
R <sub>S</sub>	0.0413106 Ω	0.0413112 Ω	0.001

**Figura 3-10: Valores de los parámetros obtenidos a través de los métodos de resolución de la curva I-V (Townsend, 1989)**

Debido a que el objetivo de este trabajo es desarrollar un análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño y no la obtención de estos con fidelidad, se opta por la resolución del sistema de ecuaciones simplificada.

### 3.1.3.3. Sistema de ecuaciones

Para llegar a la resolución explícita del sistema de ecuaciones Townsend asume una serie de simplificaciones en las funciones objetivos omitiendo una serie de términos.

- En la ecuación 3.11 aparece un 1 restando una exponencial. En la cual el exponente, independientemente del tamaño del sistema, esta alrededor de la decena, por lo que el valor está bastante aleja de la unidad. Siendo así omitir el -1 no afecta significativamente.
- En la ecuación 3.12 se presenta una situación similar, por lo tanto la misma simplificación puede ser hecha.

- Para la tercera simplificación hay que acudir al circuito básico equivalente. En la ecuación 3.3, la intensidad que atraviesa el diodo, cuando el voltaje es cero, es decir en condiciones de cortocircuito, el -1 cancela la exponencial por lo que la intensidad del diodo es nula. Por lo tanto se podría asumir que la corriente generada es igual a la corriente de cortocircuito. Esto no es exactamente cierto ya que la resistencia en serie en el circuito “UP” crea cierto diferencial de potencial, por lo que una pequeña porción de la corriente generada recorre el diodo. Aun así se tomaran como similares.

Tras las simplificaciones el sistema de ecuaciones resultante es el siguiente:

$$I \approx I_L - I_o * \exp\left(\frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V + I * R_S)\right) \quad (3.16)$$

$$F_1 = 0 \approx -I_{SC} + I_L \quad (3.17)$$

$$F_2 = 0 \approx I_L - I_o * \exp\left(\frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{oc})\right) \quad (3.18)$$

$$F_3 = 0 \approx -I_{pmp} + I_L - I_o * \exp\left(\frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{pmp} + I_{pmp} * R_S)\right) \quad (3.19)$$

$$F_4 = 0 = 1 - \left(\exp\left(\frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{pmp} - V_{oc} + I_{pmp} * R_S)\right)\right) * \quad (3.20)$$

$$\left(1 + \frac{\frac{q * V_{pmp}}{\gamma * k * T_C}}{\left(1 + \frac{R_S * q}{\gamma * k * T_C} * \frac{I_{SC} * q}{\gamma * k * T_C} * \left(\exp\left(\frac{q}{\gamma * k * T_C} * (V_{pmp} - V_{oc} + I_{pmp} * R_S)\right)\right)\right)}\right)$$

Con las cuatro funciones objetivos anteriores se puede obtener por sustitución los cuatro parámetros de partida para el análisis de sensibilidad para una condición de irradiancia y temperatura de la célula. Y al sustituir estos 4 parámetros ( $R_S$ ,  $\gamma$ ,  $I_o$  y  $I_L$ ) en la ecuación 3.16, se obtiene la expresión que describe la curva I-V de una célula o módulo fotovoltaico en unas condiciones de irradiancia y temperatura de la célula o módulo fotovoltaico.

Para calcular estas magnitudes en otras condiciones de irradiancia y temperatura se hará uso de los coeficientes proporcionados por el fabricante que caracterizan térmicamente a la célula o módulo fotovoltaico.

Estos vienen expresados en  $\%/^{\circ}C$ ,  $\Delta V/^{\circ}C$  o  $\Delta A/^{\circ}C$ . Por lo tanto a partir de una nueva condición de temperatura se calcularían los nuevos valores de voltaje en circuito abierto, intensidad de cortocircuito y punto de máxima potencia, para volver el sistema de ecuaciones anterior, obteniéndose los parámetros objetivos en las nuevas condiciones.

Si variase la irradiancia, el efecto de esta modificación sobre el comportamiento de la célula o módulo fotovoltaico se expresaría a partir de la temperatura con la siguiente expresión:

$$T_C = T_{amb} + \frac{TONC(^{\circ}C) - 20}{800} * E \quad (3.21)$$

- TONC: “Temperatura de Operación Nominal de la Célula”, es la temperatura de operación del módulo en circuito abierto a 800 W/m<sup>2</sup> de irradiancia, 20°C de temperatura ambiente y 1 m/s de velocidad del viento. La facilita el fabricante.
- T<sub>amb</sub>: la temperatura ambiente [°C].
- E: las nuevas condiciones de irradiancia [W/m<sup>2</sup>].

A título de ejemplo, la expresión que se utilizaría al variar la temperatura de célula o módulo solar para calcular el nuevo valor de voltaje en circuito abierto, dependiendo de que unidades presentase el coeficiente:

$$V_{oc}(T_C) = V_{oc}(T_{C,ref}) * (1 - \beta_{voc} [\% / ^{\circ}C] * (T_C - T_{C,ref})) \quad (3.22)$$

$$V_{oc}(T_C) = V_{oc}(T_{C,ref}) + \beta_{voc} [V / ^{\circ}C] * (T_C - T_{C,ref}) \quad (3.23)$$

- $\beta_{voc}$ : representa la variación, ya sea en voltio en un porcentaje del total, del voltaje de circuito abierto en condiciones de referencia (25°C y 1000 W/m<sup>2</sup>) al variar la temperatura. Es suministrado generalmente por el fabricante y bien puede ser un término negativo o positivo, dependiendo si está referido a la intensidad de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto o bien al punto de máxima potencia.

Una expresión similar a la 3.22 y 3.23 se emplearía para calcular la variación de la intensidad en cortocircuito y el punto de máxima potencia.

En último lugar, si se conectasen varias células o módulos fotovoltaicos, sería necesario extrapolar la ecuación 3.16 ya que esta describe el comportamiento I-V de una única célula. Para tal extrapolación se usa la siguiente expresión:

$$I = I_L * N_p - I_o * N_p * \exp\left(\frac{q}{\gamma * N_s * k * T_C} * \left(V + I * R_s * \frac{N_s}{N_p}\right)\right) \quad (3.22)$$

- N<sub>p</sub>: número de células o módulos conectados en paralelo.
- N<sub>s</sub>: número de células o módulos conectados en serie.

La expresión 3.22 asume que todas las células o módulos son idénticos. En la práctica el valor total de cualquiera de los parámetros diferirá de su valor escalado ya que las células o módulos no son idénticos. Esto introduce un pequeño error que se pueden minimizar al chequear las células o módulos individualmente y escogiéndose aquellos que su potencia de salida este dentro de un rango de tolerancia admitido como valido.

## 3.2. Electrolizador

Para describir el comportamiento del electrolizador se usara un modelo matemático basado en la curva de polarización de stack. El modelo se construye a partir de una combinación de fundamentos termodinámicos, teoría de transferencia de calor y relaciones empíricas electroquímicas.

### 3.2.1. Modelo termodinámico

La termodinámica proporciona un buen escenario para describir las reacciones de equilibrio y los efectos térmicos en un reactor electroquímico. A su vez propina una base para la definición de las fuerzas impulsoras en los fenómenos de transporte en los electrolitos y conduce hacia la descripción de las propiedades de las soluciones electrolíticas (Rousar I, 1989) (Bagotsky, 2006).

La reacción de la electrolisis del agua para formar hidrogeno y oxigeno (ec. 2.1) se presento con anterioridad en el apartado 2.4.1. Una serie de simplificaciones son asumidas para su análisis termodinámico, estas son:

- El hidrogeno y oxigeno se asumen como gases ideales.
- El agua se considera como un líquido incompresible.
- La fase gaseosa y la fase liquida están completamente separadas.

A raíz de estas simplificaciones se puede calcular los cambios en la entalpía, entropía y energía libre de Gibbs de la electrolisis del agua referenciándolos respecto al hidrógeno, oxígeno y agua pura en condiciones estándar de presión y temperatura (25°C y 1 bar).

El cambio en la energía libre de Gibbs se expresa como:

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad (3.23)$$

- $\Delta H$ : es la variación total de la entalpia, es decir la diferencia entre la entalpia de los productos ( $H_2$  y  $O_2$ ) y la del reactivo ( $H_2O$ ).
- $\Delta S$ : es la variación total de la entropía.
- $T$ : temperatura.

En las condiciones estándar, la electrolisis del agua es una reacción no espontanea, lo que quiere decir que la variación de la energía de Gibbs,  $\Delta G$ , es positiva. La variación de energía de Gibbs estándar es:  $\Delta G^\circ = 237 \text{ kJ/mol}$ .

En un proceso electroquímico operando a una presión y temperatura constante el trabajo máximo útil es igual a la variación de energía de Gibbs. Es decir en una pila de combustible, si esta fuese ideal, todo el trabajo reversible seria energía eléctrica. Del mismo modo, al ser un proceso reversible, el trabajo eléctrico necesario para la electrolisis del agua coincide con la energía libre de Gibbs,  $\Delta G = W_{\text{elec}}$ .

A través de la ley de Faraday se puede relacionar la energía necesaria para la electrolisis del agua y la velocidad de conversión en términos de cantidades molares. La expresión de la ley de Faraday es la siguiente:



$$W_{elec} = q * V = z * F * V \quad (3.24)$$

- z: es el número de electrones transferidos en la electrolisis del agua (2).
- F: es la constante de Faraday,  $F = 96485 \text{ C/mol}$  o  $\text{A} * \text{s/mol}$
- q: es la carga eléctrica transferida por un circuito externo a la celda
- V: es el voltaje en bornes del electrolizador.

La fuerza electromotriz mínima para una reacción electroquímica reversible, o voltaje reversible, se expresa como:

$$V_{rev} = \Delta G / (z * F) \quad (3.25)$$

Por lo tanto en la cantidad total de energía necesaria para la electrolisis del agua se diferencia la variación de entalpía  $\Delta H$  y el término  $T * \Delta S$ , que expresa la expresada las irreversibilidades térmicas, que en un proceso reversible son equivalentes a la demanda de energía térmica.

La variación de entalpía en condiciones estándar es de  $\Delta H^\circ = 286 \text{ kJ/mol}$ . El total de energía demandada  $\Delta H$  se le denomina voltaje termoneutro:

$$V_{tn} = \Delta H / (z * F) \quad (3.26)$$

En condiciones estándar,  $V_{rev} = 1.229 \text{ V}$  y  $V_{tn} = 1.482 \text{ V}$ , pero estos cambian con la presión y la temperatura. En el rango de temperatura de un electrolizador, entre  $20^\circ\text{C}$  y  $100^\circ\text{C}$ ,  $V_{rev}$  decrece ligeramente con el incremento de temperatura mientras que  $V_{tn}$  permanece prácticamente constante (figura 3-11). De manera similar ocurre con el incremento de la presión.

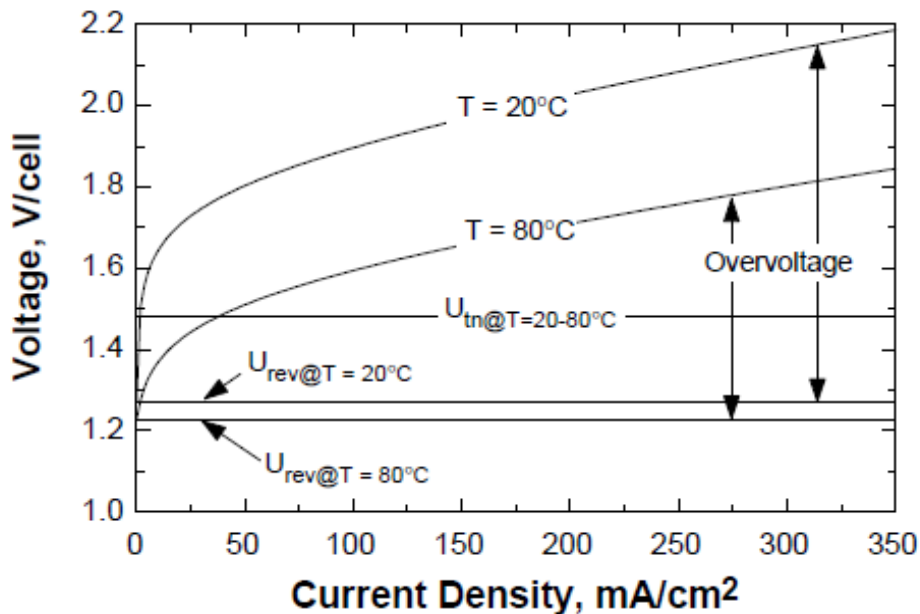


Figura 3-11: Curva I-V para una célula fotovoltaica a diferentes temperaturas (Ulleberg, 2003)

### 3.2.2. Modelo electroquímico

La cinética de los electrodos de un electrolizador se puede modelar a partir de relaciones empíricas entre la intensidad y el voltaje.

En la bibliografía se pueden encontrar numerosos modelos empíricos I-V para describir un electrolizador. Para este trabajo se ha utilizado el modelo sugerido por Ulleberg (Ulleberg, 2003), el cual aparece en numerosos artículos de estudios de instalaciones basadas en el acoplamiento de la producción de hidrógeno con fuentes de energía renovable, con unas pequeñas modificaciones posteriores propuestas por Pino (Pino, 2010) en su tesis doctoral.

La ecuación descrita por Ulleberg procede de un modelo anterior extensamente usado en la bibliografía, al que el autor modificó unos coeficientes para que recogiesen explícitamente la relación del sobrevoltaje con la temperatura. En la figura 3-11 se puede apreciar la dependencia directa del sobrevoltaje con la temperatura.

Las modificaciones de Pino tienen como finalidad un mejor ajuste de los resultados experimentales con los resultados del modelo matemático.

La expresión de la curva I-V es la siguiente:

$$V = V_{rev} + \frac{r_1 + r_2 * T}{A} * I + s * \log \left( \frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} * I + 1 \right) \quad (3.27)$$

- $r_1, r_2$ : son la resistencia óhmica del electrolito, [ $\Omega \text{ m}^2$ ], [ $\Omega \text{ m}^2 / ^\circ\text{C}$ ].
- $s$ : es un coeficiente experimental representativo del sobrevoltaje de los electrodos [V].
- $t_1, t_2, t_3$ : son coeficientes experimentales representativos del sobrevoltaje de los electrodos [ $\text{m}^2/\text{A}$ ], [ $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{A}$ ], [ $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^2/\text{A}$ ].
- $A$ : es el área del electrodo [ $\text{m}^2$ ].
- $V$ : es el voltaje aplicado en bornes [V].
- $I$ : es la intensidad que recorre la celda [A].
- $V_{rev}$ : es el voltaje reversible [V].

Para expresar la cantidad de hidrogeno producido se hace uso de la Ley de Faraday. Según esta la producción de hidrogeno en una celda electrolítica es directamente proporcional a la velocidad de transferencia de electrones en los electrodos, que a su vez es equivalente a la intensidad de corriente. La expresión que define la producción de hidrogeno de un electrolizador bipolar con un número de celdas conectadas en serie:

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F * \frac{n_c * I}{Z * F} \quad (3.28)$$

- $\dot{n}_{H_2}$ : es la producción de hidrogeno [mol/s].
- $\eta_F$ : es la eficiencia de Faraday.
- $n_c$ : es el número de celdas conectadas en serie.
- El resto de términos ya se definieron anteriormente.

En la ecuación 3.28 aparece la eficiencia de Faraday. Esta se define como el cociente entre la producción de hidrogeno real en un electrolizador y el máximo teórico posible en función de la corriente eléctrica. Esta eficiencia viene a cuantificar las corrientes parasitas entre las diferentes celdas del stack, por lo que también se le denomina eficiencia de corriente. En un electrolizador unipolar, al no haber celdas electrolíticas conectadas en serie, la eficiencia de Faraday es igual a la unidad.

La fracción de corrientes parásitas respecto a la cantidad total de corriente incrementa al disminuir la densidad de corriente. A su vez un aumento en la temperatura del electrolito supone que la resistencia eléctrica mengue, lo que provoca un aumento de las perdidas por corrientes parasitas y por lo tanto una menor eficiencia de Faraday. Esto se puede apreciar en la figura 3-12 aunque la dependencia con la temperatura es leve y a partir de un cierto valor de la intensidad la eficiencia es prácticamente constante.

La siguiente expresión empírica evalúa la eficiencia de Faraday teniendo presente el fenómeno anterior:

$$\eta_F = f_2 * \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} \quad (3.29)$$

- $f_1, f_2$ : son parámetros experimentales que a su vez dependen de la temperatura  $[m^2 A^2 / cm^4]$ ,  $[0-1]$ .
- El resto de parámetros se han expuesto anteriormente.

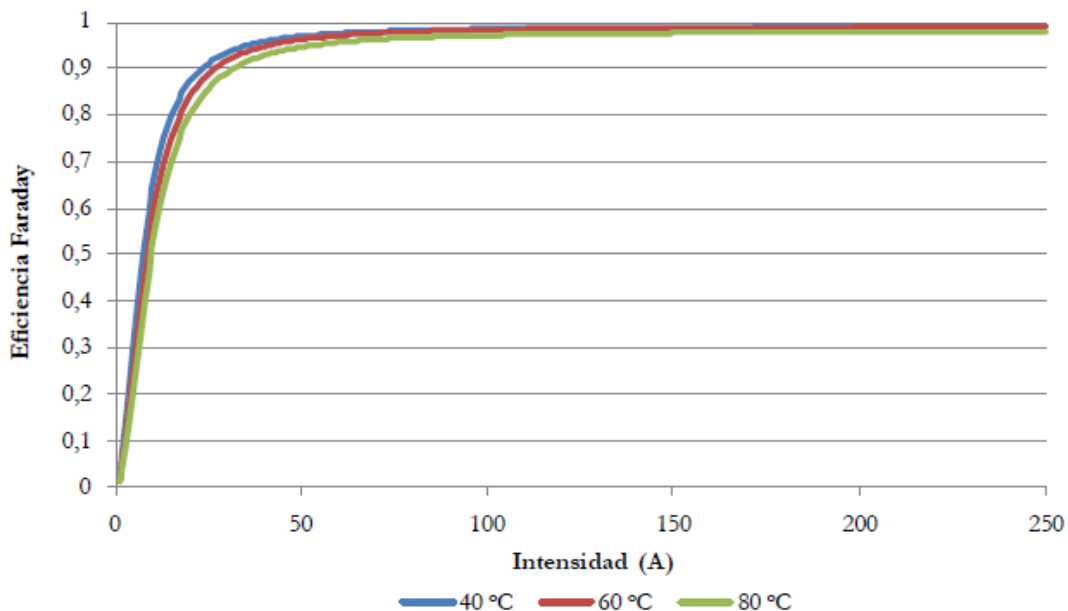


Figura 3-12: Influencia de la temperatura en la eficiencia de Faraday (Pino, 2010)

A partir de la producción de hidrogeno se puede calcular el agua de consumo y el oxigeno producido fácilmente a través de la estequiometria:

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{H_2} = 2\dot{n}_{O_2} \quad (3.30)$$

La generación de calor en el electrolizador es debido principalmente a las ineficiencias eléctricas. La eficiencia energética se puede calcular como:

$$\varepsilon_e = V_{tn}/V \quad (3.31)$$

Para una temperatura dada, un incremento en la producción de hidrógeno, aumentando la intensidad suministrada a la celda electrolítica, implica un aumento de sobrevoltaje (por aumento de pérdidas óhmicas), lo cual conduce a una disminución de la eficiencia de voltaje.

Desde un punto de vista práctico, es posible operar un electrolizador con eficiencias de voltaje superiores al 100%: si el electrolizador opera con un voltaje inferior al voltaje termoneutro (lo cual es posible aportando energía térmica al sistema), la eficiencia de voltaje será superior al 100%.

Para finalizar, el rendimiento energético global se define como la energía presente en el hidrogeno producido y la potencia eléctrica de suministro del electrolizador:

$$\eta_e = \frac{\dot{n}_{H_2} * PCS}{I * V} \quad (3.32)$$

- PCS: es el poder calorífico superior del hidrógeno [J/mol].

### 3.2.3. Modelo térmico

Los sobrevoltajes que tienen lugar durante la producción del hidrógeno, se traducen en un aporte de energía térmica al electrolizador hace aumentar la energía interna (temperatura) del electrolito, de los gases generados y de los componentes del stack.

El calor generado se puede calcular mediante la expresión del rendimiento eléctrico global del electrolizador, ecuación 3.33. Éste equivaldrá a la degradación de la energía eléctrica a energía térmica no destinada a la producción de hidrógeno.

$$Q_{gen} = n_c * V * I * (1 - \eta_e) \quad (3.33)$$

Para controlar la temperatura del electrolizador será necesario refrigerar este  $Q_{refrig}$ . La refrigeración se llevara a cabo con un fluido de trabajo que recorrerá los separadores de gases del electrolizador o bien discurrirán externamente al electrolizador.

Además, los elementos del electrolizador que se encuentran a una temperatura superior al ambiente y entorno que le rodea, sufren una pérdida de calor hacia éstos.

$$Q_{perd} = U * A * (T - T_{amb}) \quad (3.34)$$

- $U$ : es el coeficiente global de transferencia de calor, el cual refleja las pérdidas térmicas convectivas con el aire ambiente y las pérdidas térmicas con el entorno por radiación [ $W/ m^2 \text{ } ^\circ C$ ].
- $T_{amb}$ : es la temperatura ambiente [ $^\circ C$ ].

El separador de gases o el stack, al estar normalmente a una temperatura superior a la de ambiente no se suelen aislar térmicamente hacia el exterior para favorecer la refrigeración.

El primer principio de la termodinámica indica que la variación de energía interna será igual al aporte de calor menos las pérdidas térmicas del sistema. La ecuación que define el balance térmico en el electrolizador queda:

$$C_t * \frac{dT}{dt} = Q_{gen} - Q_{refrig} - Q_{perd} \quad (3.34)$$

- $C_t$  : es la capacidad térmica del electrolizador, esta recoge la masa de elemento metálico que dispone el electrolizador y la masa de electrolito junto con la capacidad calorífica de cada elemento [ $J/^\circ C$ ].

## 4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad que se va a desarrollar esta referido a los términos obtenidos a partir del circuito equivalente simplificado propuesto por Townsend (Townsend, 1989). Para ello se ha resuelto el modelo matemático para unas condiciones específicas con el objeto de obtener el punto de funcionamiento nominal del acople electrolizador-generador fotovoltaico, que será la referencia en el análisis de sensibilidad.

### 4.1. Punto de funcionamiento nominal

#### 4.1.1. Electrolizador

Como las ecuaciones y la mayoría de coeficientes que definen el comportamiento del electrolizador son empíricos, es decir proceden de una regresión lineal a partir de datos experimentales. Se ha optado por utilizar un caso previamente validado en otro estudio o análisis para la elaboración de este, ya que se carece de datos experimentales de ningún electrolizador como para poder desarrollarse el modelo presentado en el apartado 3.2.

El electrolizador que se ha escogido para el análisis de sensibilidad se ha extraído de la Tesis Doctoral de Francisco Javier Pino (Pino, 2010). El electrolizador en cuestión tiene las siguientes características:

#### *ELECTROLIZADOR*

Fabricante	CASALE CHEMICALS
Potencia nominal	25 kW
Rango de operación en potencia	20 - 110 %
Rango de operación en voltaje	0 – 275 A
Presión nominal de trabajo	20 bar
Producción de H <sub>2</sub> nominal	5 Nm <sup>3</sup> /h (0.45 kg/h)
Pureza del H <sub>2</sub>	99.98% (en volumen)
Electrolito	Solución de KOH al 30%
Consumo nominal de agua desmineralizada	4.1 l/h

**Tabla 4-1: Características técnicas del electrolizador.**

En el electrolizador se diferencia tres partes: stack electrolítico, convertidor AC/DC y el sistema de control y supervisión local. De las tres solo es de utilidad para el desarrollo del análisis el stack electrolítico, cuyas características son:

*STACK*

Tipo de celdas	Níquel puro
Número de celdas	48
Superficie del electrodo	0.06 m <sup>2</sup>
Intensidad máxima admisible	275 A
Activación de electrodos	Níquel Raney depositado
Presión máxima de operación	20 bar
Temperatura máxima de operación	80 °C

**Tabla 4-2: Características técnicas del stack del electrolizador.**

El stack está constituido por un apilamiento de celdas bipolares conectadas en serie, entre dos conectores eléctricos. Al estar conectadas en serie todas las celdas son atravesadas por la misma intensidad de corriente (continua), y es en cada compartimento anódico y catódico donde tiene lugar las reacciones electroquímicas. La solución acuosa de KOH al 30% en peso dota al electrolito de la conductividad eléctrica adecuada a fin de optimizar el consumo energético. El electrolito entra al electrolizador y a los separadores de gas-electrolito por el movimiento natural inducido por la generación de hidrógeno y oxígeno en cada compartimento.

A partir del modelo establecido por Pino (Pino, 2010) y fijando arbitrariamente el valor de  $V_{rev} = 1.23$  (valor típico en el rango de temperaturas del electrolizador), queda una expresión que predice el comportamiento del electrolizador únicamente función de la temperatura.

En la figura 4-1 se puede apreciar la curva característica del electrolizador a diferentes temperaturas y la curva que determina un suministro de potencia a 25 kW. La producción de hidrogeno del stack es directamente proporcional a la corriente que lo recorre, por lo tanto para una potencia de suministro fijada (en este caso se fija la potencia nominal), a mayor temperatura de operación mayor será la intensidad en el punto de funcionamiento, lo que supondrá una mayor producción de hidrógeno.

Debido al razonamiento anterior se decide fijar el punto de funcionamiento nominal a 80°C, la máxima temperatura de operación posible, y 25 kW de suministro (potencia que especifica el fabricante como nominal). Siendo la intensidad y el voltaje de funcionamiento nominal:

$I_{pto,func,nom}$	259.4 A
$V_{pto,func,nom}$	96.38 V

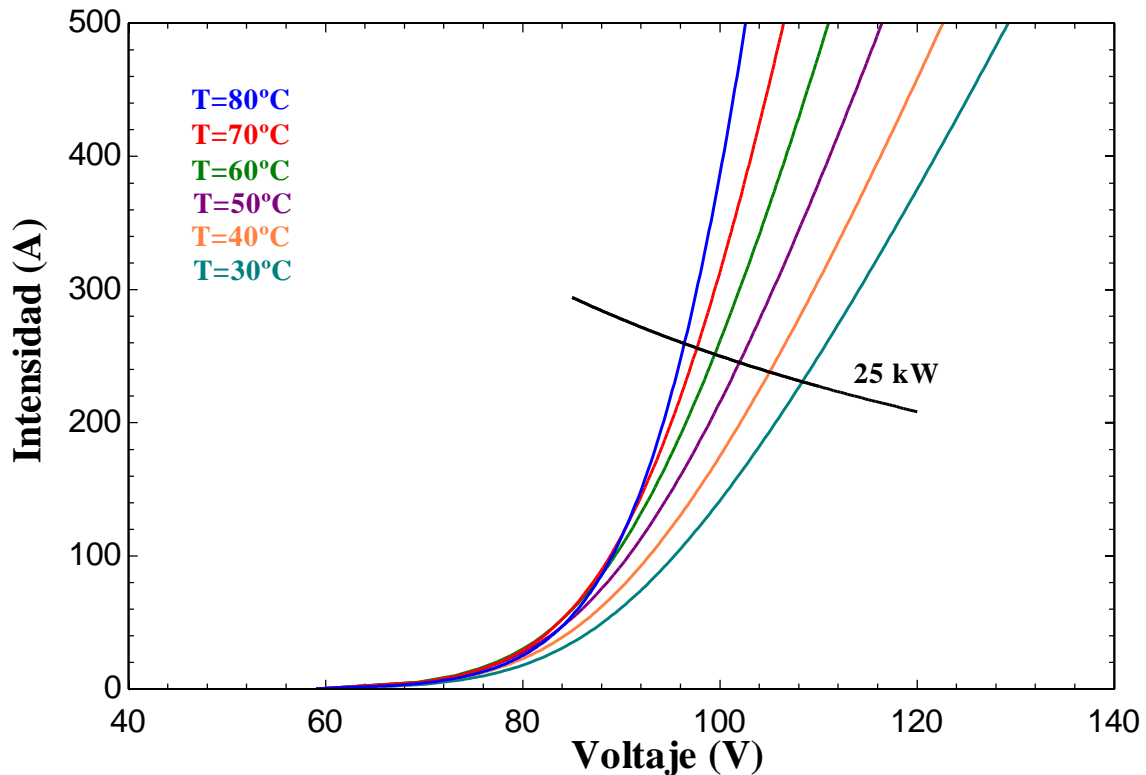


Figura 4-1: Curva característica I-V electrolizador a diferentes temperaturas

#### 4.1.2. Módulos fotovoltaicos

En esta ocasión, a partir del modelo detallado en el apartado 3.1.3, se obtendrá la curva característica de un módulo o célula fotovoltaica y los parámetros de estudio del análisis de sensibilidad.

Para el análisis se ha escogido un modulo fotovoltaico comercial del fabricante Yingli Solar, perteneciente a los modelos “PANDA 60 CELL series 2”. El modulo lo componen 60 células de silicio monocristalino y las características de este aparecen en la tablas 4-3 y 4-4.

Junto a los parámetros facilitados por el fabricante se fija como temperatura de operación la temperatura de las condiciones estándar de referencia. De esta manera la curva característica del modulo fotovoltaica obtenida es la correspondiente a la figura 4-2.



**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (YINGLI SOLAR, PANDA 60 CELL series 2)**

Parámetros eléctricos para STC\*

Tipo de Módulo	YL280C-30b
Potencia de salida	280 0/+5 W
Eficiencia del módulo	17.2 %
Tensión en Pmax	31.3 V
Intensidad en Pmax	8.96 A
Tensión en circuito abierto	39.1 V
Intensidad en cortocircuito	9.5 A

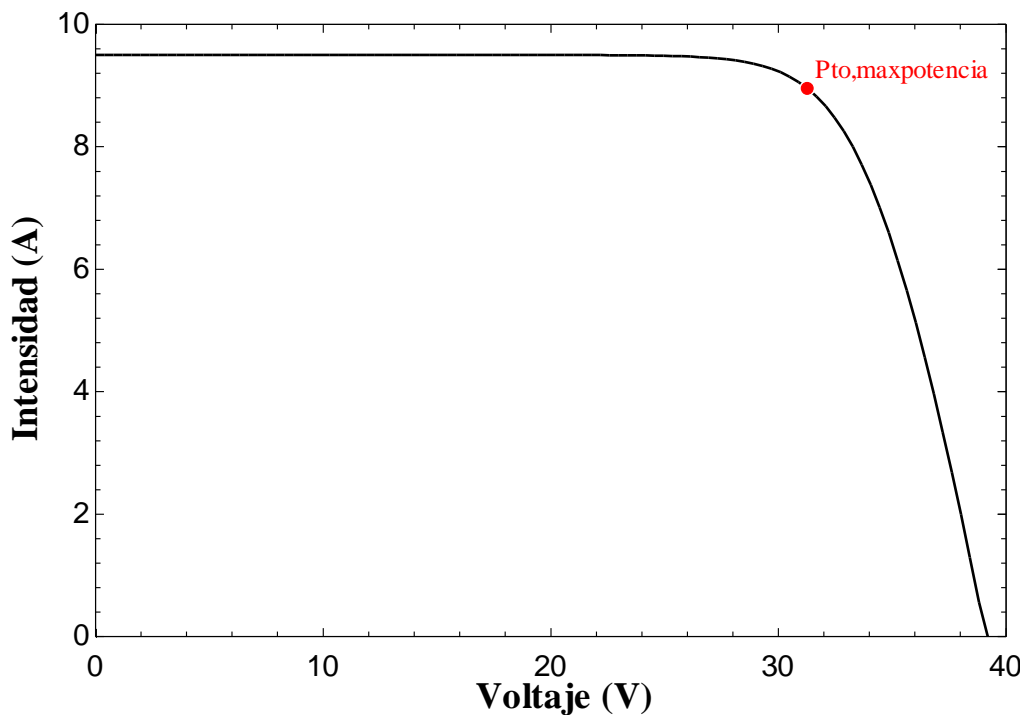
\*STC: 1000 W/m<sup>2</sup> Irradiancia, 25°C Temperatura módulo, AM 1.5 distribución espectral según EN 60904-3. Reducción media de la eficiencia relativa de 1.9% a 200 W/m<sup>2</sup> según EN 60904-1.

**Tabla 4-3: Características eléctricas del módulo fotovoltaico.**

**CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS**

Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)	46 +/- 2 °C
Coeficiente de temperatura para Pmax	-0.42 %/°C
Coeficiente de temperatura para Voc	-0.3 %/°C
Coeficiente de temperatura Isc	0.04 %/°C
Coeficiente de temperatura Vpmp	-0.40 %/°C
Rango de temperaturas de funcionamiento	-40°C - 80°C

**Tabla 4-4: Características térmicas del módulo fotovoltaico.**



**Figura 4-2: Curva característica módulo fotovoltaico a 25°C.**

Y los parámetros objeto del análisis de sensibilidad:

$R_s$	$\lambda$	$I_L$	$I_o$
0.2952 $\Omega$	69.98	9.5 A	3.403e-9 A

Es obvio que un solo módulo no se aproxima en absoluto a los valores del punto de funcionamiento nominal del electrolizador, por lo tanto será necesario conectar varios módulos en serie y/o paralelo. A partir de la ecuación 3.22 se calcula la curva característica de la conexión serie-paralelo de módulos fotovoltaicos que se planteó.

Antes de seleccionar la conexión de módulos en serie-paralelo adecuada para el acople con el electrolizador, puntualizar como se modifica la curva característica al conectar varios módulos o células. Si se conectan en serie el voltaje resultante (circuito abierto y punto de máxima potencia) será el producto del original por el número de células o módulos en serie, de manera similar la intensidad resultante será el producto de la original por el número de células o módulos en paralelo (figura 4-3).

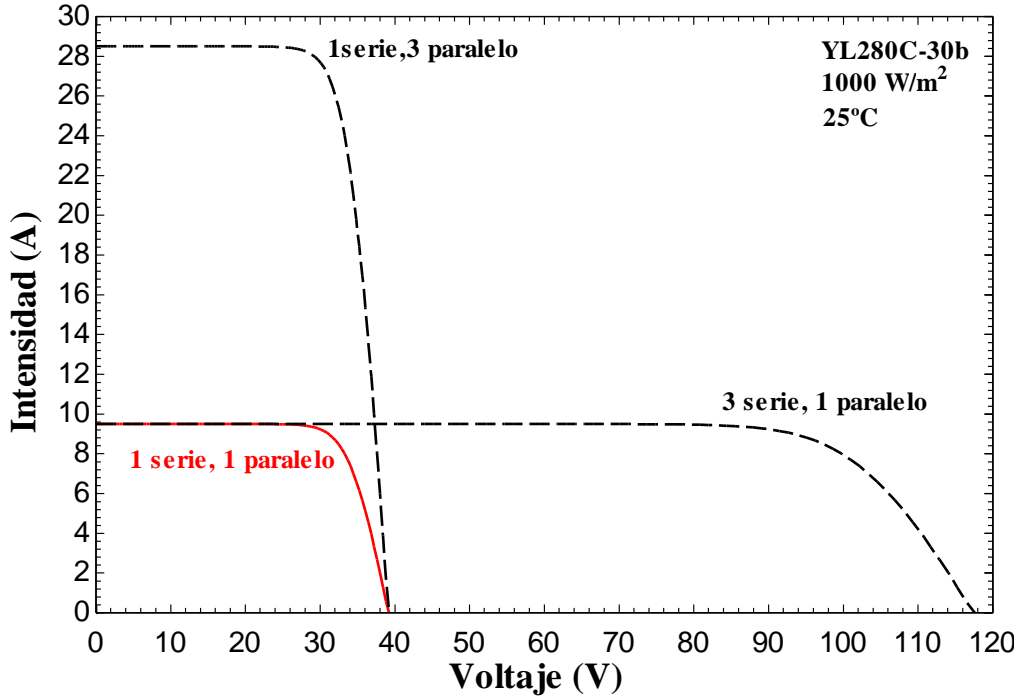


Figura 4-3: Conexión serie-paralelo módulos fotovoltaicos

Como la potencia de suministro nominal del electrolizador es de 25 kW y el modulo fotovoltaico proporciona una potencia máxima de 280 W, el número aproximado de módulos necesarios será del orden de:

$$\frac{25000 \text{ W}}{280 \text{ W}} = 89.3 \approx 90 \text{ módulos fotovoltaicos}$$

De las combinaciones posible dos son candidatas para un acople optimo, tales configuraciones son la de 30 módulos en paralelo y 3 en serie, y 29 módulos en paralelo y 3 en serie. Ambas presentan una curva característica susceptible de ser candidatas para un acoplamiento óptimo (figura 4-4).

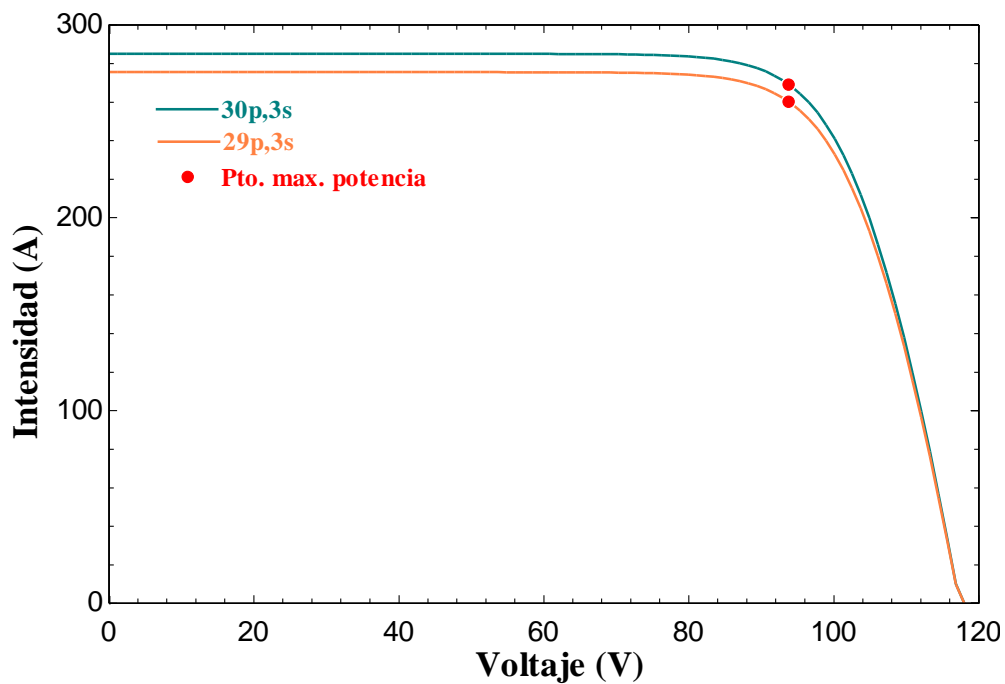


Figura 4-4: Posibles configuraciones serie-paralelo de los módulos fotovoltaicos

$I_{\text{pto,máx,potencia}} (30\text{p}, 3\text{s})$	268.8 A
$V_{\text{pto,máx,potencia}} (30\text{p}, 3\text{s})$	93.9 V
$I_{\text{pto,máx,potencia}} (29\text{p}, 3\text{s})$	259.8 A
$V_{\text{pto,máx,potencia}} (29\text{p}, 3\text{s})$	93.9 V

### 4.1.3. Acople

En la figura 4-5 se aprecia el solapamiento de la curva característica del electrolizador con las dos posibles configuraciones de los módulos fotovoltaicos.

Ambas configuraciones aproximan bastante el punto de máxima potencia al de funcionamiento nominal del electrolizador. De manera grafica es difícil apreciar cual presenta un mejor punto de operación del acople, por lo que se tendrá que recurrir a la resolución numérica para decantarse por una de las opciones.

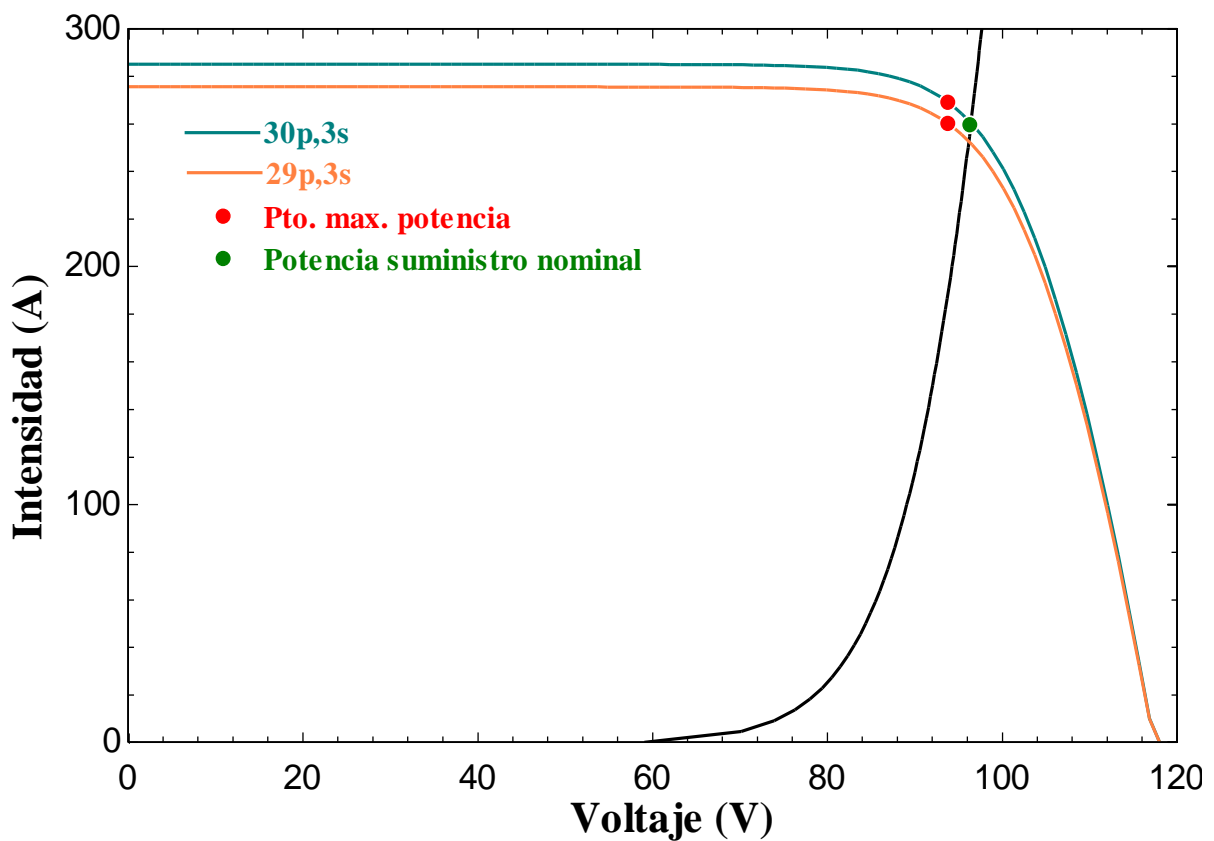


Figura 4-5:Acople curvas características de los módulos fotovoltaicos y el electrolizador

Ambos puntos de corte son los siguientes:

Configuración	$I_{pto,corte}$	$V_{pto,corte}$	$I_{pto,func,nominal}$	$V_{pto,func,nominal}$	$P_{pto,max,pot}$
30 paralelo, 3 serie	260.4 A	96.41 V	259.4 A	96.38 V	25.24 kW
29 paralelo, 3 serie	252.7 A	96.15 V			24.4 kW

A raíz de los datos anteriores, en aras de mantener la potencia de suministro del electrolizador la más próxima posible a su valor nominal, la conexión serie-paralelo de los módulos fotovoltaicos para el caso de partida del análisis dispondrá de 30 módulos en paralelo y 3 en serie. Los valores que presenta el punto de operación (punto de corte de ambas curvas características) del acople entre el electrolizador y la configuración fotovoltaica son los siguientes:

$I_{pto,corte}$	$V_{pto,corte}$	$P_{suministro,electrolizador}$	$n_{H2}$	$\eta_{energetico}$	$\eta_{acople}$
260.4 A	96.41 V	25102 W	0.06017 mol/s	68.5 %	99.45 %

Estos valores se han obtenido a partir de las ecuaciones expuestas anteriormente en el punto 3.1 del trabajo.

## 4.2. Desarrollo del análisis y valores numéricos

Durante este apartado se elaborara el análisis de sensibilidad del acople entre el electrolizador y los módulos fotovoltaicos.

Para ello se ha obrado de la siguiente manera. En primer lugar se han modificado individualmente en un +/- 10% cada uno de los términos correspondientes al circuito equivalente simplificado del módulo fotovoltaico (apartado 4.1.2) manteniendo las condiciones climáticas y el resto de términos constantes. A continuación se muestra los cambios sufridos en el acople, en los módulos fotovoltaicos y cuanto se ha desplazado el punto de acoplamiento con respecto al punto de funcionamiento de referencia de operación, para posteriormente buscar una nueva configuración en serie-paralelo que los aproxime nuevamente.

Sintetizando lo anteriormente dicho, a partir del punto de referencia fijado en la sección 4.1.3, se desea examinar como la variación de los términos que estructuran el circuito simplificado propuesto por Townsend, que modela el comportamiento de un módulo o célula fotovoltaico, afecta a una serie de valores aceptados como magnitudes de estudio obtenidos del acople entre la configuración de módulos fotovoltaicos y el electrolizador. Para finalizar se buscara una nueva configuración en serie-paralelo que vuelva a aproximar los puntos de acople, el nuevo y el de referencia, con la finalidad de cuantificar la magnitud del cambio en las magnitudes de estudio.

#### 4.2.1. Parámetro $R_S$

	Caso de referencia	+10%	-10%
$R_S$ [ $\Omega$ ]	0.2952	0.3247	0.2657
$I_{pto,corte}$ [A]	260.4	257.5	263
$V_{pto,corte}$ [V]	96.41	96.32	96.5
$P_{suministro}$ [W]	25102	24806	25379
$n_{H_2}$ [mol/s]	0.06017	0.05951	0.06078
$\eta_{energetico}$ [%]	68.5	68.57	68.44
$\eta_{acople}$ [%]	99.45	99.11	99.71
$\Delta n_{H_2}$ [%]	-	1.1	1
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	-	0.1	0.1
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	-	0.35	0.25

Tabla 4-5: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $R_S$ )

$R_S$	+10%	-10%	
$\Delta I_{sc}$ [%]	0	0	Caso de referencia
$\Delta V_{oc}$ [%]	0	0	
$\Delta P_{pmp}$ [%]	0.84	0.84	
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	1.2	1.1	
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	0.31	1.4	0.54

Tabla 4-6: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $R_S$ )

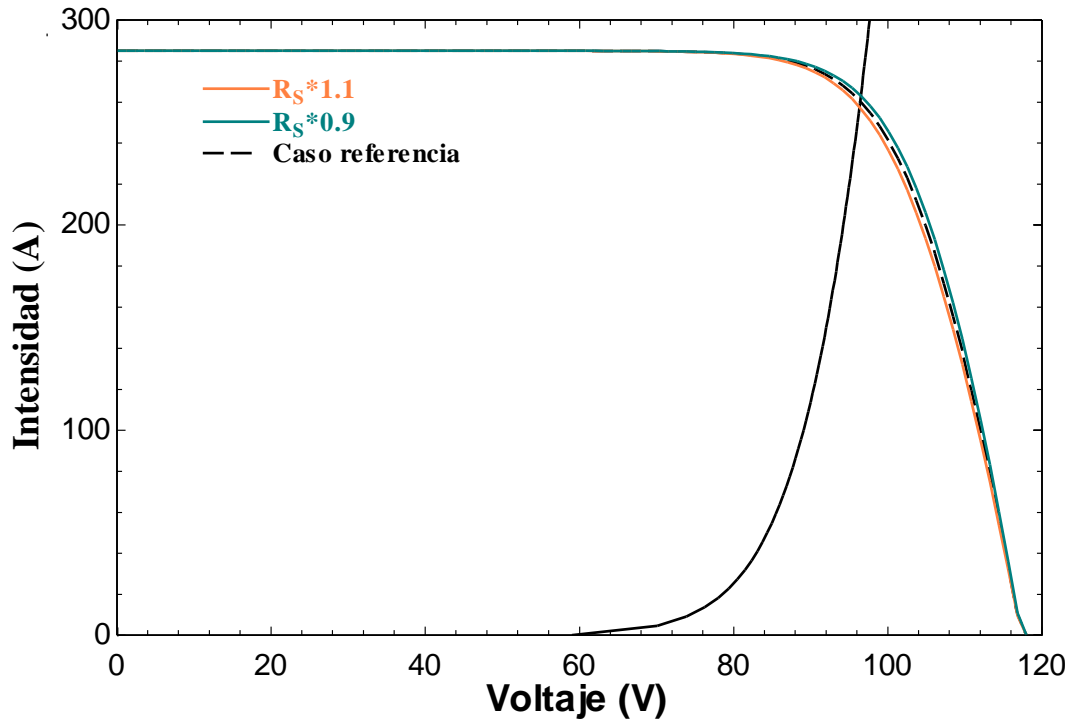


Figura 4-6: Variación parámetro  $R_S$ , curvas características

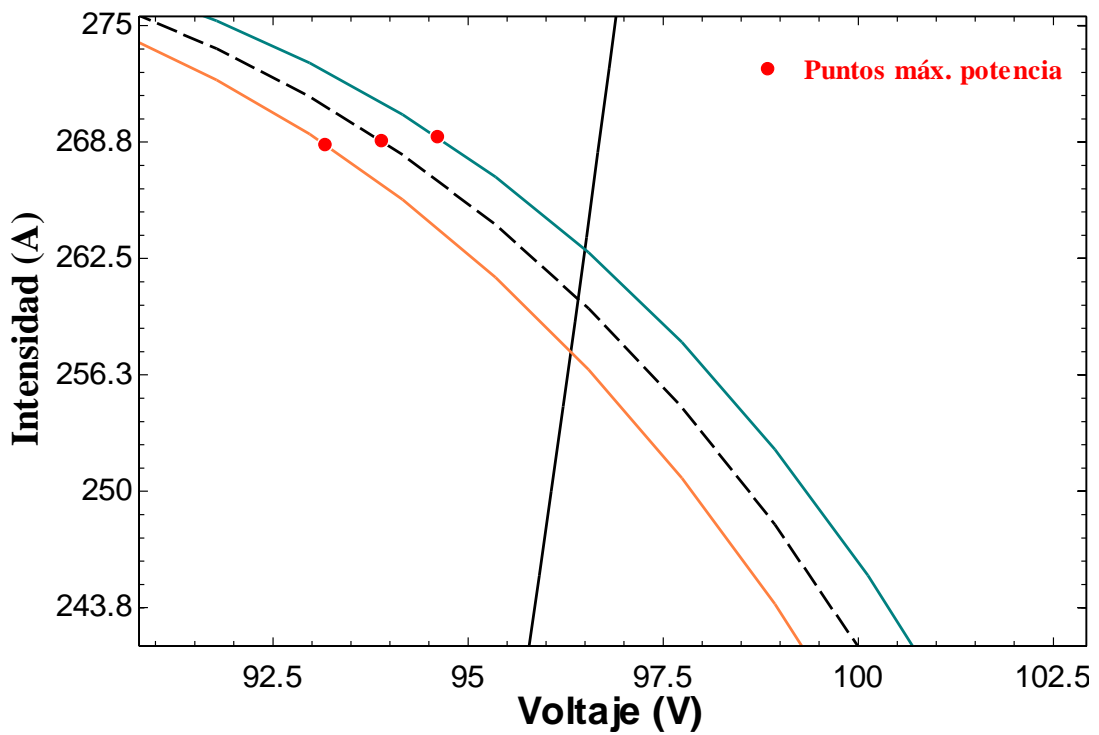


Figura 4-7: Zoom - Variación parámetro  $R_S$ , curvas características

Nueva configuración conexión módulos PV:

A continuación se comprobará si a través de alguna nueva configuración de conexión serie-paralelo, es posible aproximar el punto de máxima potencia de las nuevas curvas, es decir el punto de operación del acoplamiento, al punto de operación original.

$R_S$	+10%		-10%	
$N_p$	31	30	30	29
$N_s$	3	3	3	3
$I_{pto,corte}$ [A]	265	257.5	263	255.1
$V_{pto,corte}$ [V]	96.56	96.32	96.5	96.24
Distanciamiento $I_{pmp}$ [%]	6.2	3	3.2	0.1
Distanciamiento $V_{pmp}$ [%]	3.5	3.5	1.9	1.9
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	2	1.2	1.1	2.2
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	0.3	0.31	1.4	2
$P_{suministro}$ [W]	25590	24806	25379	24555
$\eta_{acople}$ [%]	98.95	99.11	99.71	99.8

Tabla 4-7: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $R_S$ )

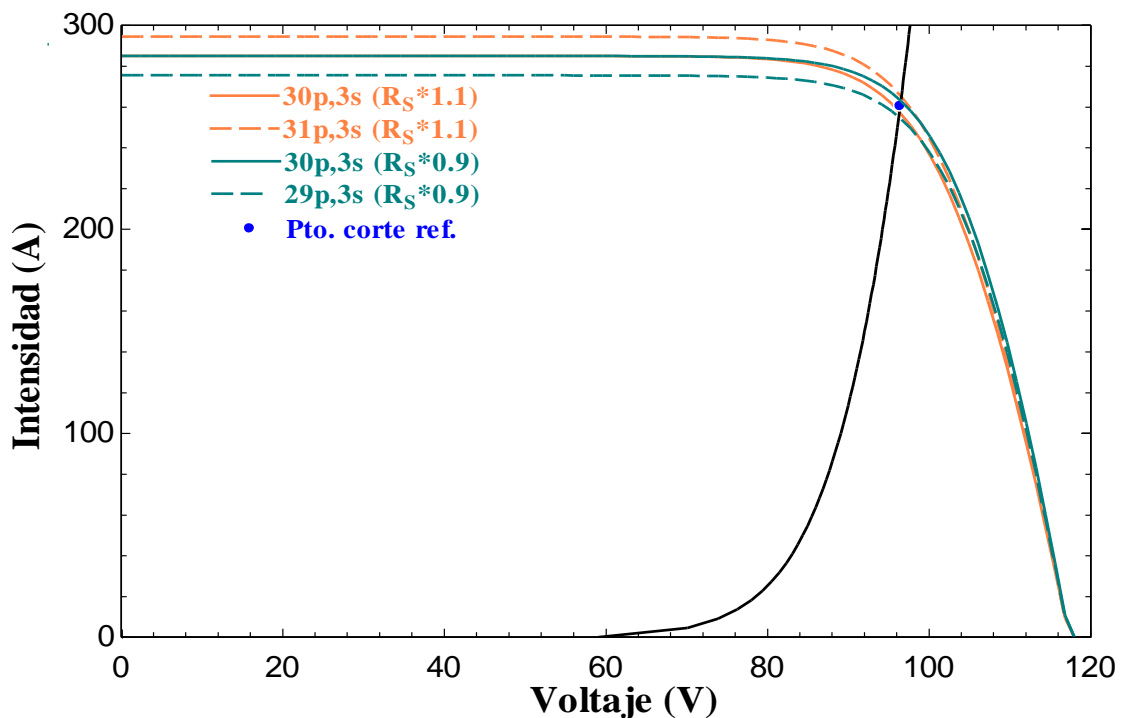


Figura 4-8: Curvas características nueva configuración caso  $R_S$



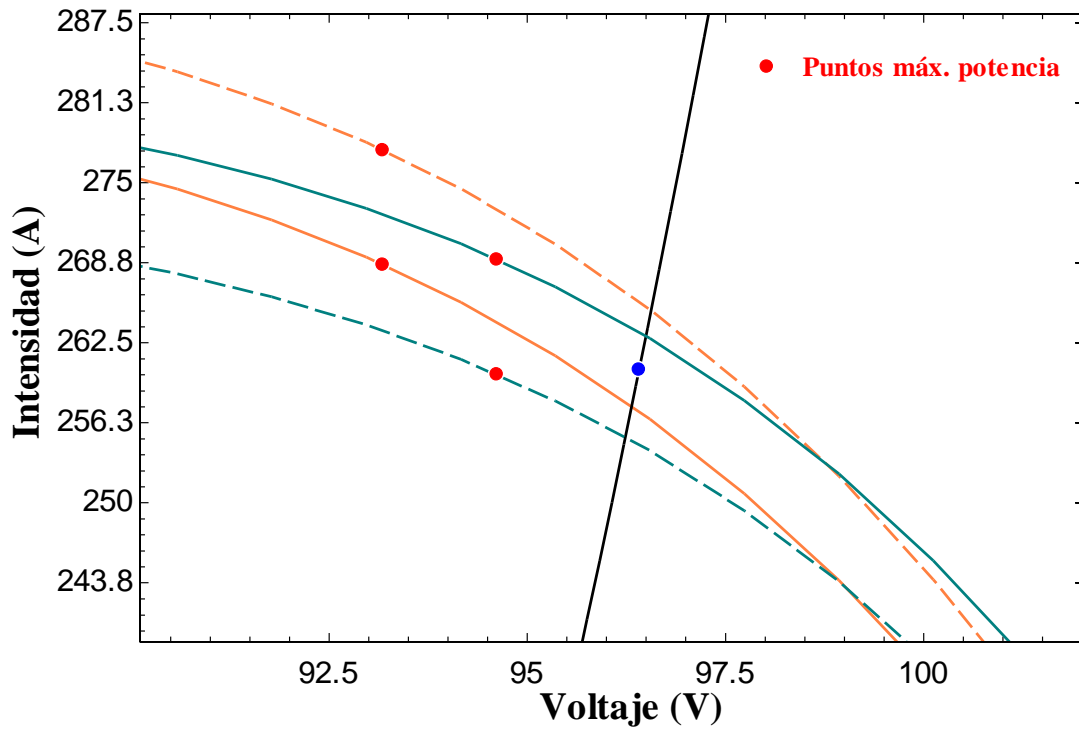


Figura 4-9: Zoom curvas características nueva configuración caso  $R_S$

Tal como muestran los datos, tanto numéricos como gráficos, una nueva configuración no mejoraría el punto de acoplamiento en ambos casos de análisis, siendo la opción más óptima la conexión en serie paralelo de referencia.

$R_S$	+10%	-10%
$N_p$	30	30
$N_s$	3	3
$I_{pto,corte}$ [A]	257.5	263
$V_{pto,corte}$ [V]	96.32	96.5
$P_{suministro}$ [W]	24806	25379
$n_{H_2}$ [mol/s]	0.05951	0.06078
$\eta_{energetico}$ [%]	68.57	68.44
$\eta_{acople}$ [%]	99.11	99.71
$\Delta n_{H_2}$ [%]	1.1	1
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	0.1	0.1
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	0.35	0.25

Tabla 4-8: Parte 2 -Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $R_S$ )

#### 4.2.2. Parámetro $\lambda$

	Caso de referencia	+10%	-10%
$\lambda$	68.98	76.98	62.98
$I_{pto,corte}$ [A]	260.4	279.8	196.5
$V_{pto,corte}$ [V]	96.41	97.03	94.1
$P_{suministro}$ [W]	25102	27148	18486
$n_{H2}$ [mol/s]	0.06017	0.06466	0.04536
$\eta_{energetico}$ [%]	68.5	68.1	70.1
$\eta_{acople}$ [%]	99.45	97	82.15
$\Delta n_{H2}$ [%]	-	7.5	24.6
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	-	0.6	2.4
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	-	2.4	17.4

Tabla 4-9: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $\lambda$ )

$\lambda$	+10%	-10%	Caso de referencia
$\Delta I_{sc}$ [%]	0	0	
$\Delta V_{oc}$ [%]	10	10	
$\Delta P_{pmp}$ [%]	10.8	10.8	
<b>Distanciamiento <math>P_{pdc}</math></b> [%]	8.1	26.4	
<b>Distanciamiento <math>P_{pmp}</math></b> [%]	11.44	10.36	0.54

Tabla 4-10: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $\lambda$ )

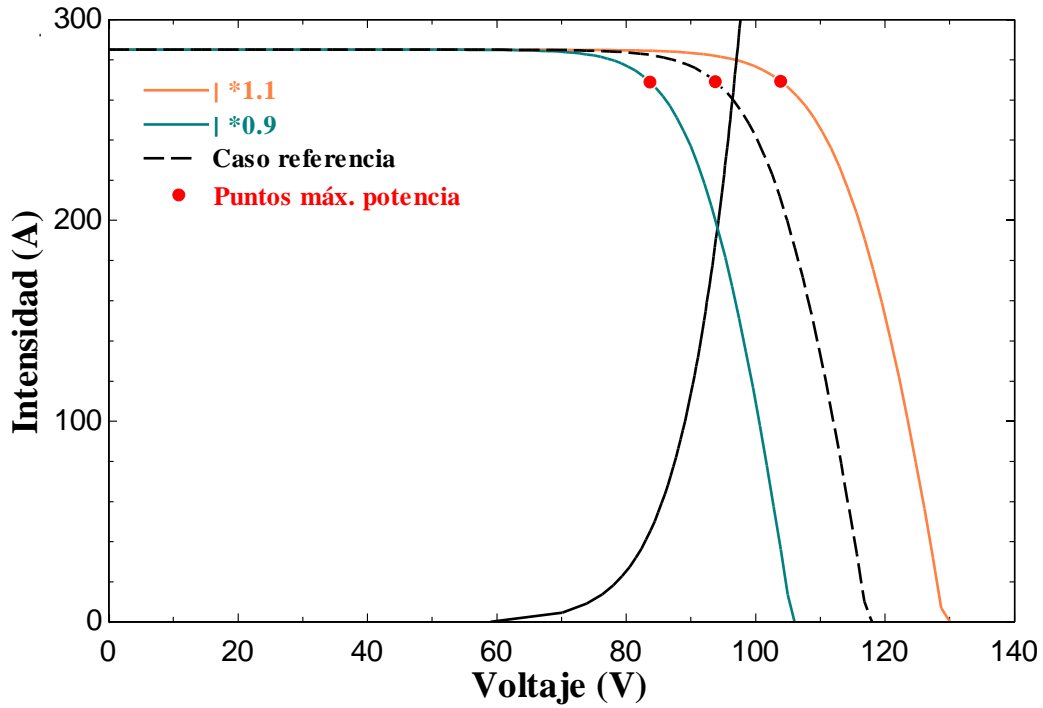


Figura 4-10: Variación parámetro  $\lambda$ , curvas características

Nueva configuración conexión módulos PV:

$\lambda$	+10%			-10%				
$N_p$	30	29	28	30	47	30	28	27
$N_s$	3	3	3	3	3	4	4	4
$I_{pto,corte}$ [A]	279.8	270.7	261.6	196.5	260.5	283.1	264.4	255
$V_{pto,corte}$ [V]	97.03	96.74	96.45	94.1	96.41	97.13	96.54	96.23
Distanciamiento $I_{pmp}$ [%]	3.2	0.13	3.7	3.0	38.1	3	3.9	7.8
Distanciamiento $V_{pmp}$ [%]	7.3	7.3	7.3	15.0	15.0	13.7	13.7	13.7
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	8.1	4.3	0.5	26.4	0.0	9.5	1.7	2.2
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	11.4	7.7	4	10.4	40.4	19.5	11.55	7.6
$P_{suministro}$ [W]	27148	26188	25229	18486	25112	27500	25525	24542
$\eta_{acople}$ [%]	97.04	96.83	96.62	82.15	71.23	91.65	91.14	90.9

Tabla 4-11: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $\lambda$ )

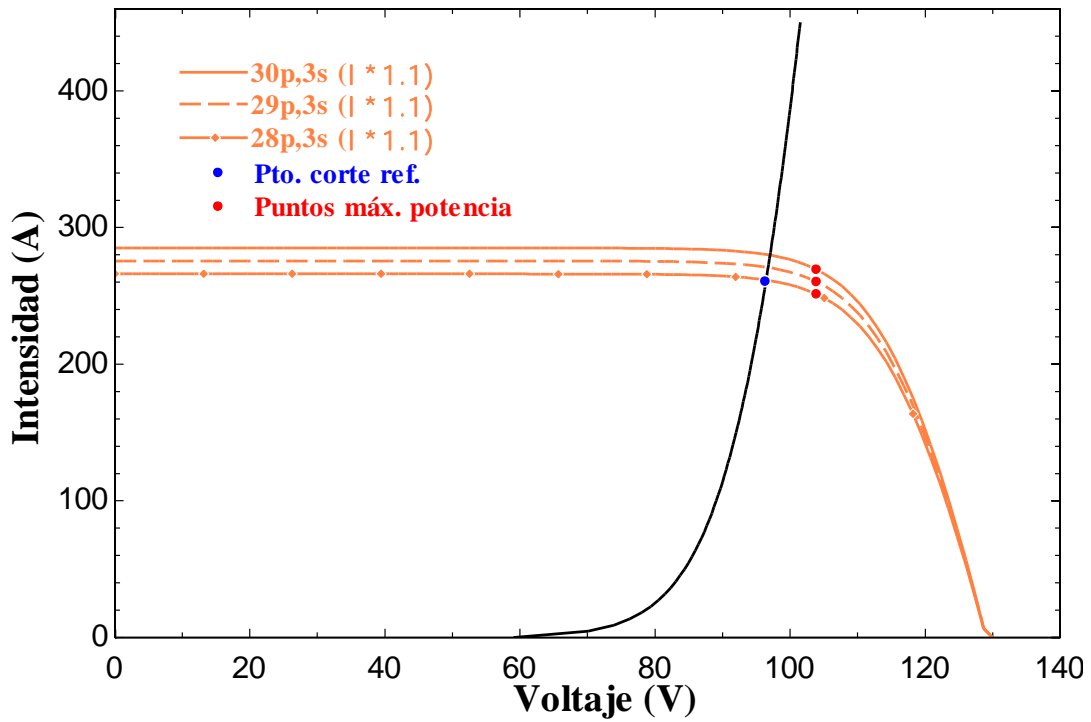


Figura 4-11: Curvas características nueva configuración caso  $\lambda$

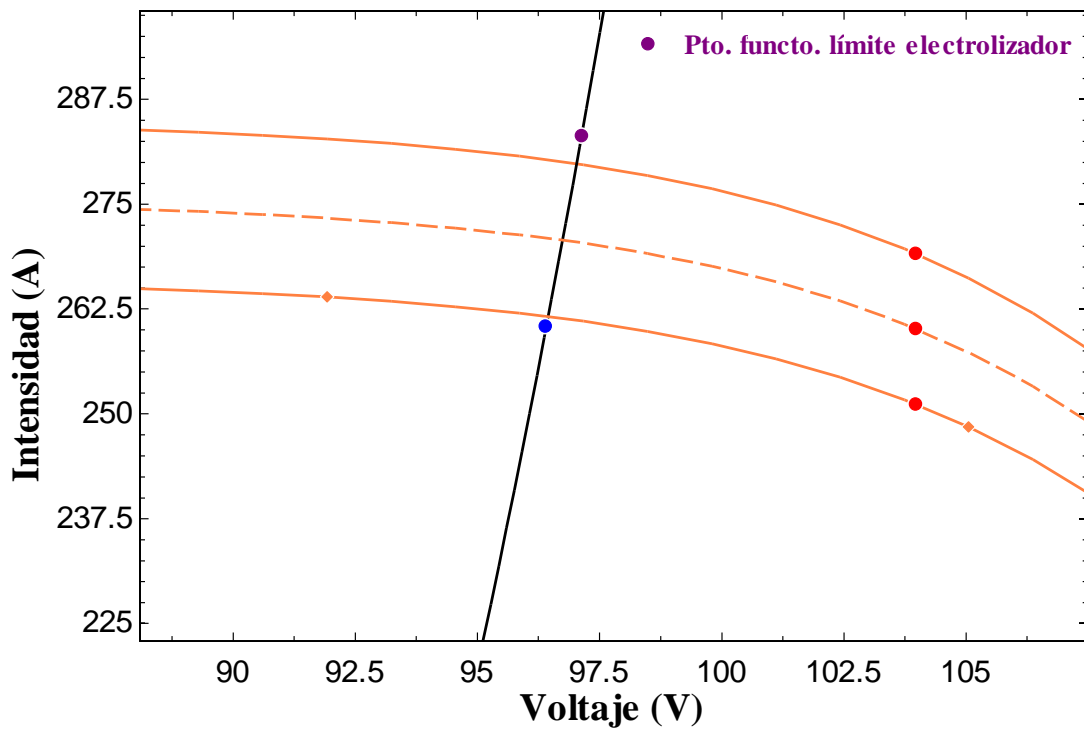


Figura 4-12: Zoom curvas características nueva configuración caso  $\lambda$

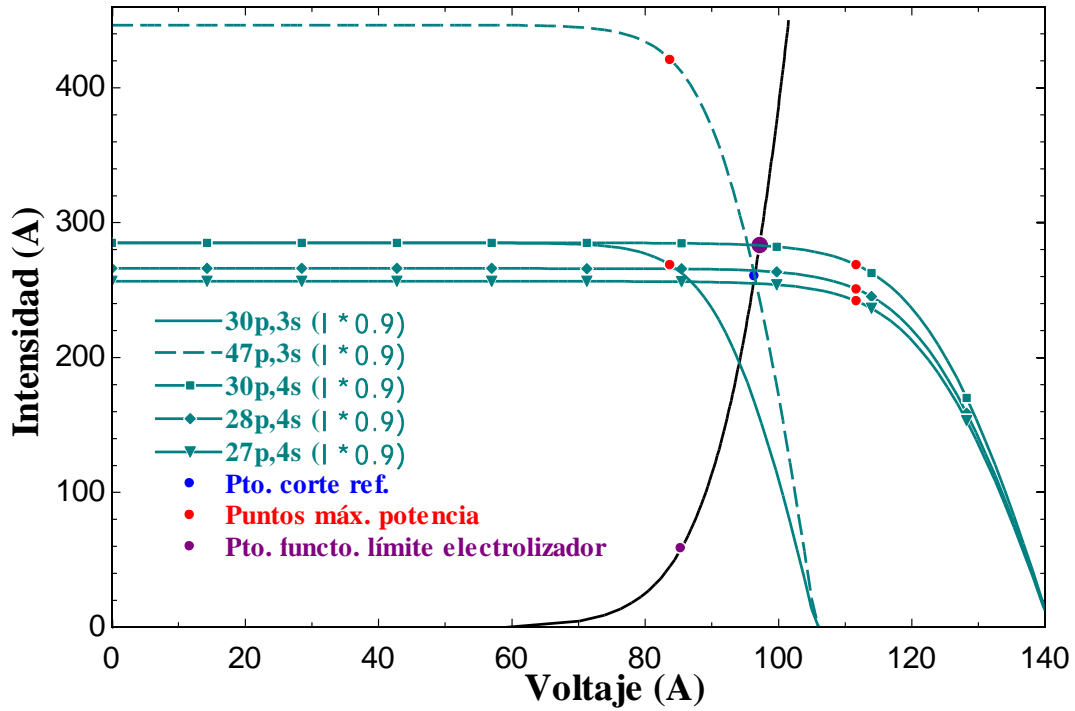


Figura 4-13: Parte 2 - Curvas características nueva configuración caso  $\lambda$

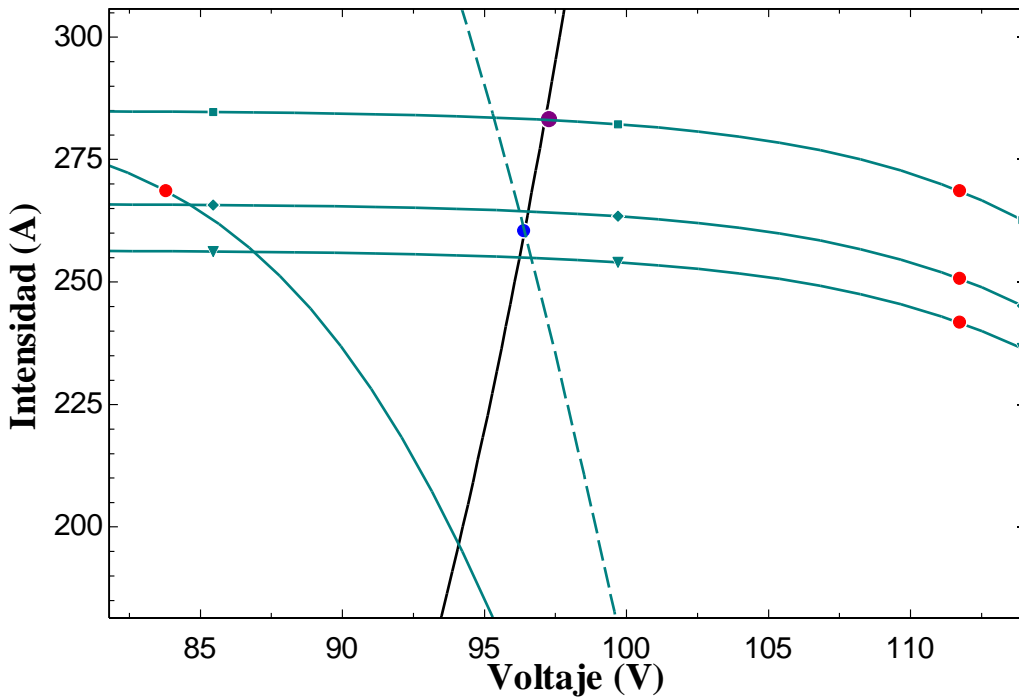


Figura 4-14: Zoom parte 2 - curvas características nueva configuración caso  $\lambda$

En esta ocasión los resultados no son tan clarificadores como los anteriores, por lo que se expondrá las magnitudes de varios puntos de interés para cada uno de los casos de análisis, mas adelante serán comentados en el apartado de interpretación de resultados.

$\lambda$	+10%		-10%	
$N_p$	29	28	28	27
$N_s$	3	3	4	4
$I_{pto,corte}$ [A]	270.7	261.6	264.4	255
$V_{pto,corte}$ [V]	96.74	96.45	96.54	96.23
$P_{suministro}$ [W]	26188	25229	25525	24542
$n_{H_2}$ [mol/s]	0.06256	0.06045	0.0611	0.05893
$\eta_{energetico}$ [%]	68.27	68.48	68.41	68.63
$\eta_{acople}$ [%]	96.83	96.62	91.14	90.9
$\Delta n_{H_2}$ [%]	4	0.45	1.54	2.1
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	0.34	0.04	0.13	0.18
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	2.65	2.9	8.4	8.6

Tabla 4-12:Parte 2 -Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $\lambda$ )

### 4.2.3. Parámetro $I_o$

	Caso de referencia	+10%	-10%
$I_o$ [A]	3.40E-09	3.74E-09	3.06E-09
$I_{pto,corte}$ [A]	260.4	258.5	262.3
$V_{pto,corte}$ [V]	96.41	96.35	96.47
$P_{suministro}$ [W]	25102	24905	25307
$n_{H2}$ [mol/s]	0.06017	0.05973	0.06062
$\eta_{energetico}$ [%]	68.5	68.55	68.46
$\eta_{acople}$ [%]	99.45	99.21	99.7
$\Delta n_{H2}$ [%]	-	0.73	0.74
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	-	0.06	0.06
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	-	0.25	0.2

Tabla 4-13: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $I_o$ )

$I_o$	+10%	-10%	Caso de referencia
$\Delta I_{sc}$ [%]	0	0	
$\Delta V_{oc}$ [%]	0.44	0.5	
$\Delta P_{pmp}$ [%]	0.54	0.6	
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	0.8	0.8	
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	0.01	1.15	0.54

Tabla 4-14: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $I_o$ )

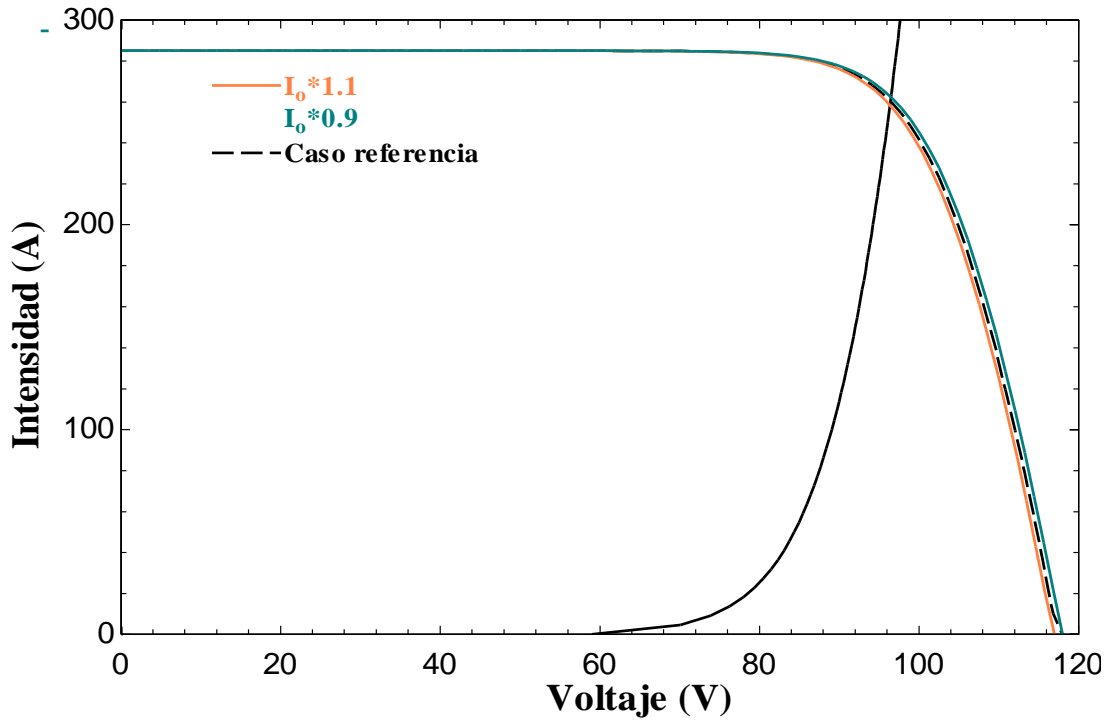


Figura 4-15: Variación parámetro  $I_0$ , curvas características

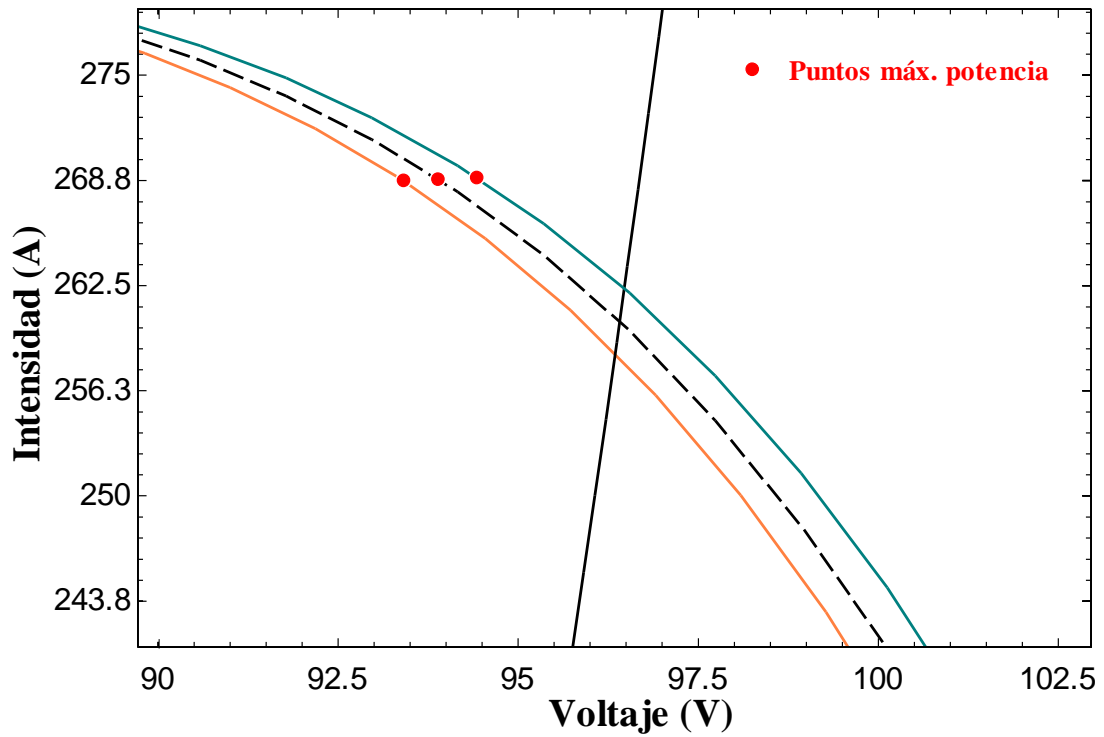


Figura 4-16: Zoom-variación parámetro  $I_0$ , curvas características



Nueva configuración conexión módulos PV:

$I_o$	+10%			-10%	
$N_p$	31	30	29	30	29
$N_s$	3	3	3	3	3
$I_{pto,corte}$ [A]	266	258.5	250.9	262.3	254.5
$V_{pto,corte}$ [V]	96.59	96.35	96.1	96.47	96.22
Distanciamiento $I_{pmp}$ [%]	6.2	3.1	0.25	3.2	0.18
Distanciamiento $V_{pmp}$ [%]	3.2	3.2	3.2	2.1	2.1
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	2.3	0.8	4	0.81	2.5
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	3.3	0	3.3	1.1	2.2
$P_{suministro}$ [W]	25694	24905	24110	25307	24486
$\eta_{acople}$ [%]	99.05	99.21	99.36	99.66	99.76

Tabla 4-15: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $I_o$ )

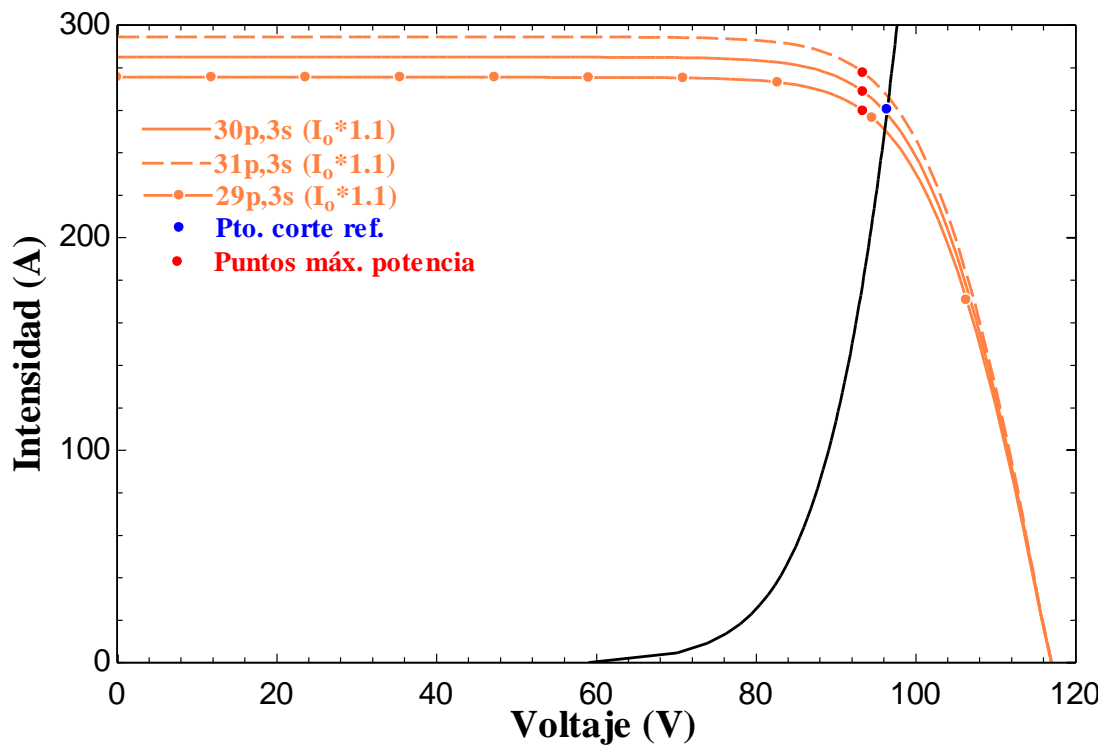


Figura 4-17: Curvas características nueva configuración caso  $I_o$ .

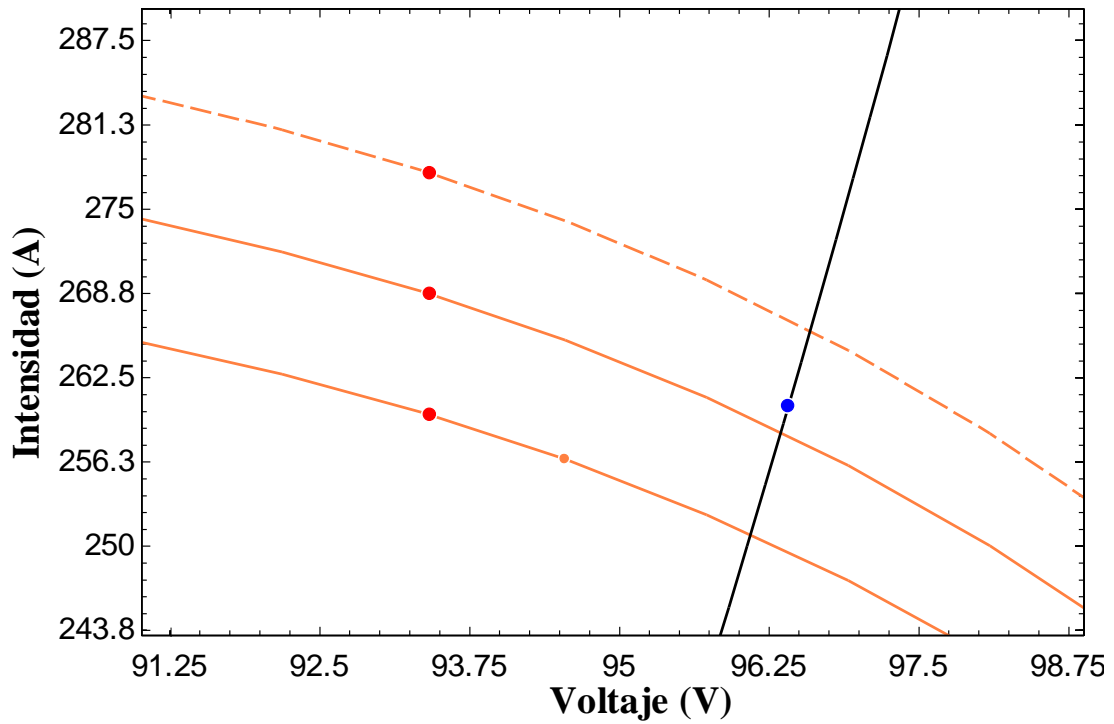


Figura 4-18: Zoom curvas características nueva configuración caso  $I_0$

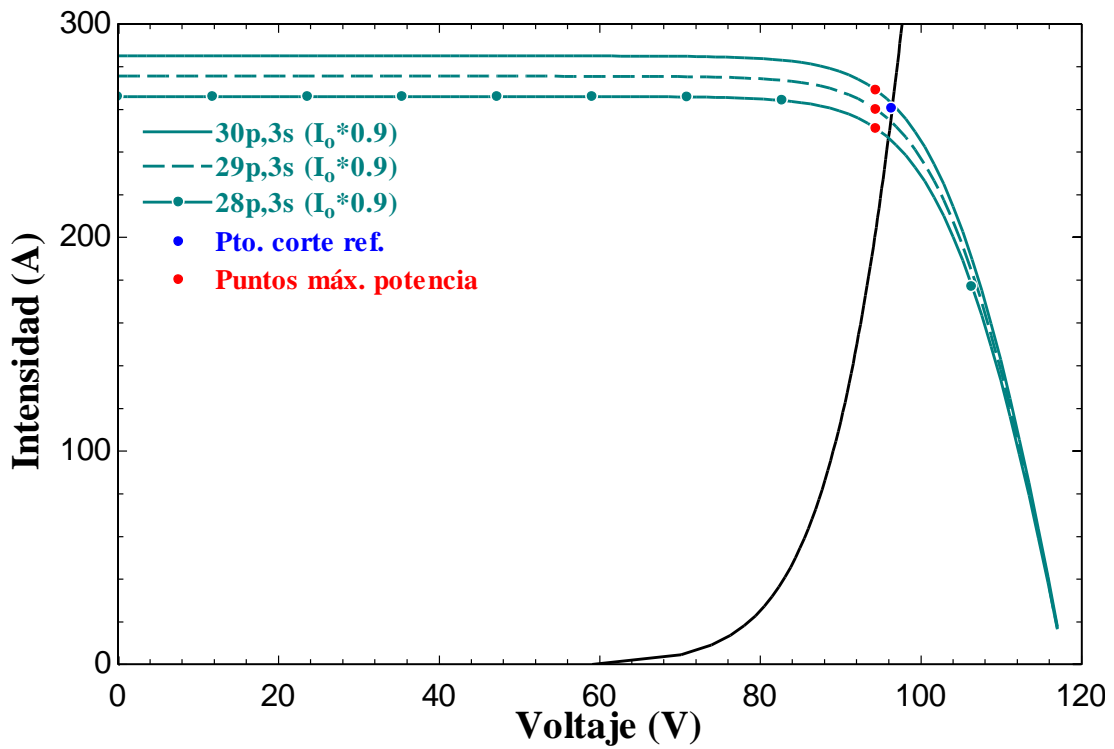


Figura 4-19: Parte 2 - Curvas características nueva configuración caso  $I_0$

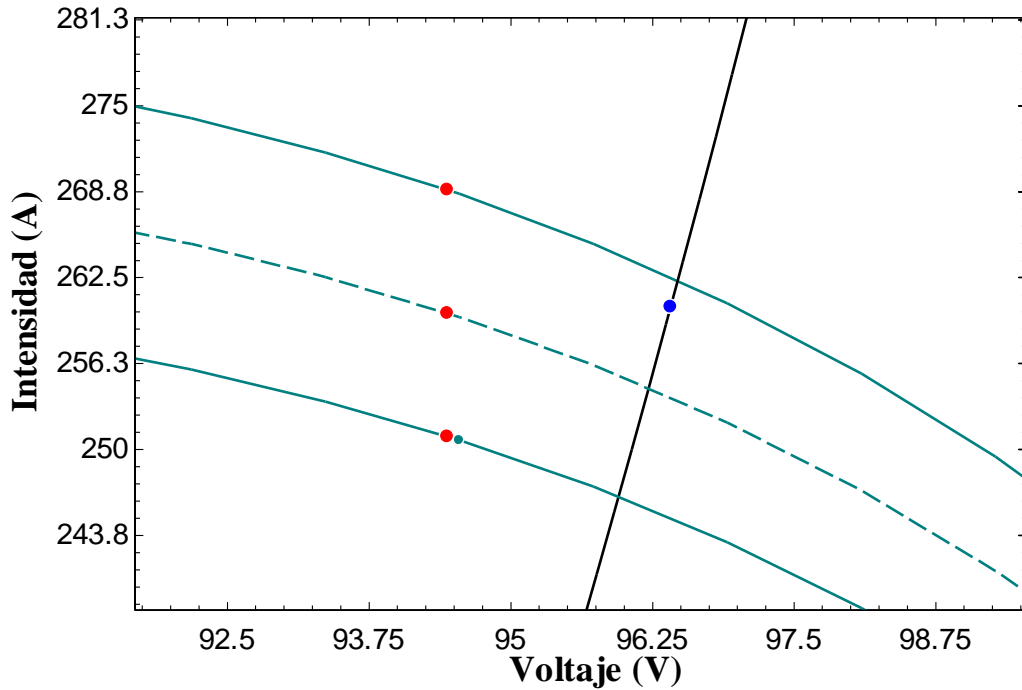


Figura 4-20: Zoom parte 2 - curvas características nueva configuración caso  $I_o$

$I_o$	+10%		-10%	
$N_p$	30	29	30	29
$N_s$	3	3	3	3
$I_{pto,corte}$ [A]	258.5	250.9	262.3	254.5
$V_{pto,corte}$ [V]	96.35	96.1	96.47	96.22
$P_{suministro}$ [W]	24905	24110	25307	24486
$n_{H_2}$ [mol/s]	0.05973	0.05797	0.06062	0.05881
$\eta_{energetico}$ [%]	68.55	68.72	68.46	68.64
$\eta_{acople}$ [%]	99.21	99.36	99.66	99.76
$\Delta n_{H_2}$ [%]	0.74	3.7	0.74	2.3
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	0	0.3	0	0.2
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	0.25	0.1	0.2	0.3

Tabla 4-16: Parte 2 - Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $I_o$ )

#### 4.2.4. Parámetro $I_L$

	Caso de referencia	+10%	-10%
$I_L$	9.5	10.45	8.55
$I_{pto,corte}$ [A]	260.4	282	237.6
$V_{pto,corte}$ [V]	96.41	97.1	95.64
$P_{suministro}$ [W]	25102	27382	22728
$n_{H_2}$ [mol/s]	0.06017	0.06518	0.0549
$\eta_{energetico}$ [%]	68.5	68	69
$\eta_{acople}$ [%]	99.45	98.9	99.8
$\Delta n_{H_2}$ [%]	-	8.3	8.7
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	-	0.7	0.8
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	-	0.55	0.35

Tabla 4-17: Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $I_L$ )

$I_L$	+10%	-10%	Caso de referencia
$\Delta I_{sc}$ [%]	0.1	0.1	
$\Delta V_{oc}$ [%]	0.44	0.48	
$\Delta P_{pmp}$ [%]	9.7	9.8	
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	9.1	9.5	
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	10.3	9.3	0.54

Tabla 4-18: Parte 2 - Nuevos valores magnitudes del acople de las curvas características (caso  $I_L$ )

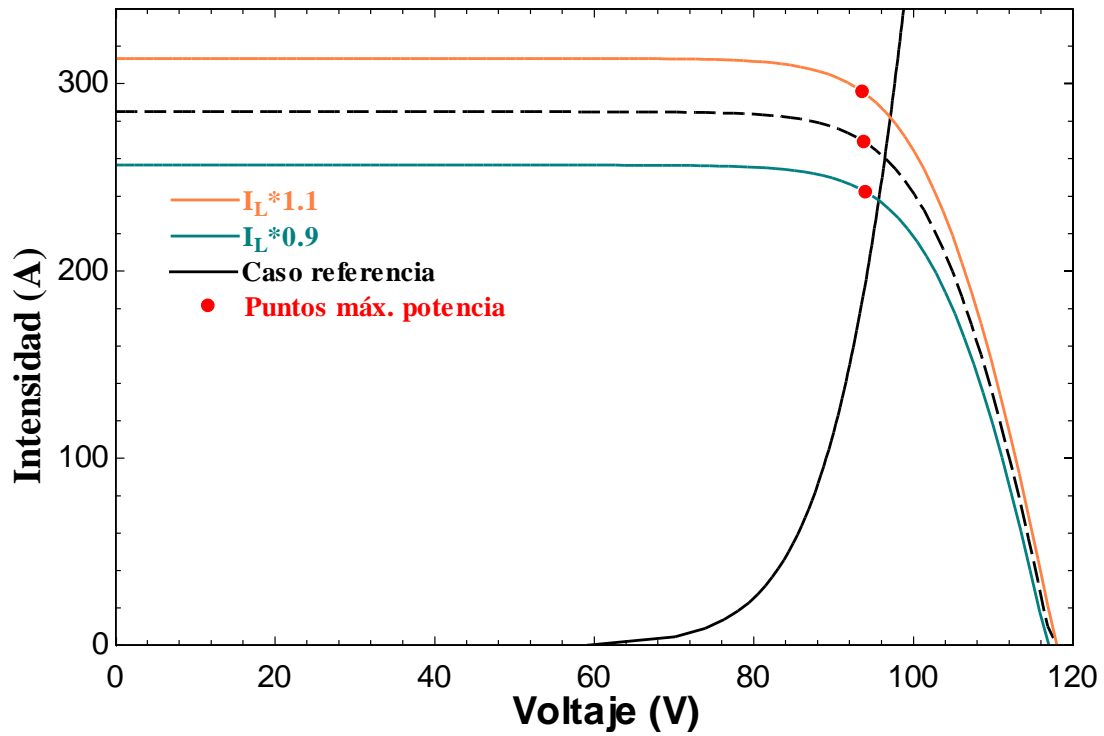


Figura 4-21: Variación parámetro  $I_L$ , curvas características

Nueva configuración conexión módulos PV:

$I_L$	+10%			-10%		
$N_p$	30	28	27	33	32	30
$N_s$	3	3	3	3	3	3
$I_{pto,corte}$ [A]	282	265.5	257.2	258.8	251.8	237.6
$V_{pto,corte}$ [V]	97.1	96.58	96.3	96.36	96.13	95.64
Distanciamiento $I_{pmp}$ [%]	11.9	5.6	2.1	2.2	0.9	7.6
Distanciamiento $V_{pmp}$ [%]	2.9	2.9	2.9	2.5	2.5	2.5
Distanciamiento $P_{pdc}$ [%]	9.1	2.15	1.35	0.7	3.6	9.5
Distanciamiento $P_{pmp}$ [%]	10.3	2.9	0.8	0.23	3.25	9.3
$P_{suministro}$ [W]	27382	25645	24767	24934	24203	22728
$\eta_{acople}$ [%]	98.91	99.26	99.41	99.55	99.65	99.81

Tabla 4-19: Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $I_L$ )

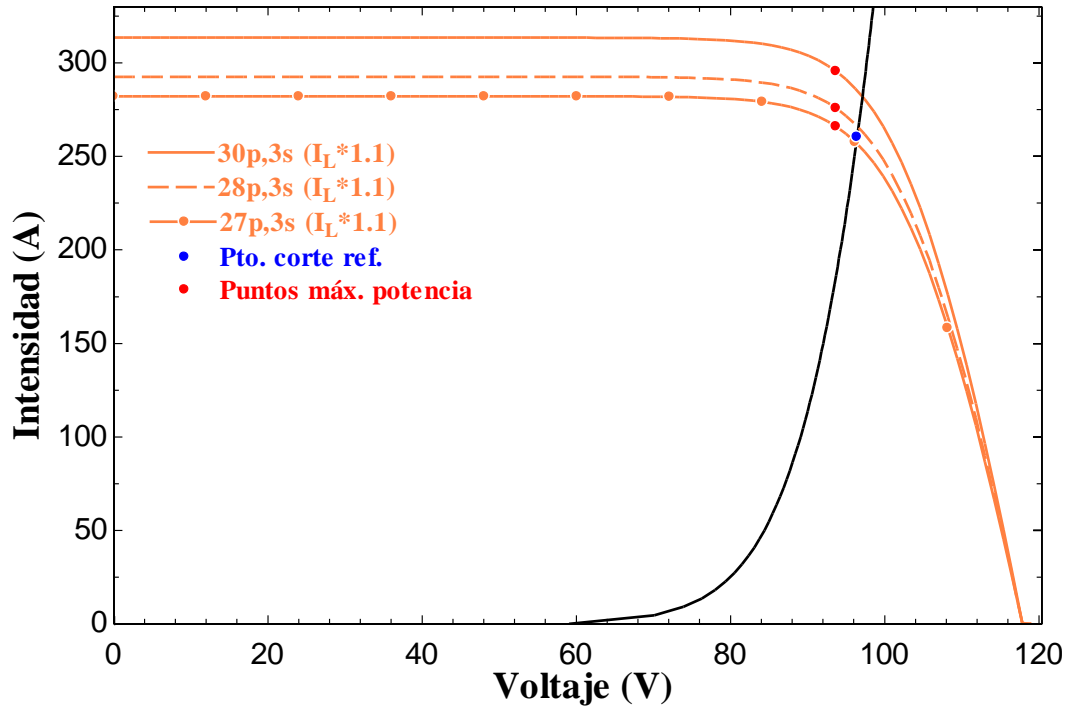


Figura 4-22: Curvas características nueva configuración caso  $I_L$

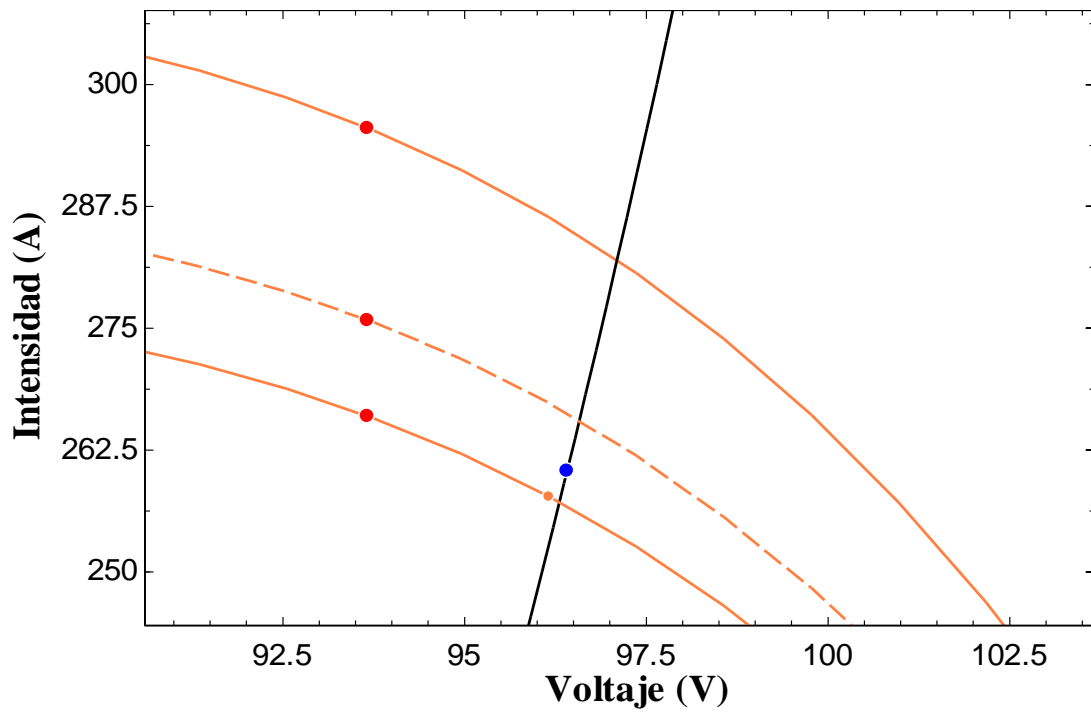


Figura 4-23: Zoom curvas características nueva configuración caso  $I_L$

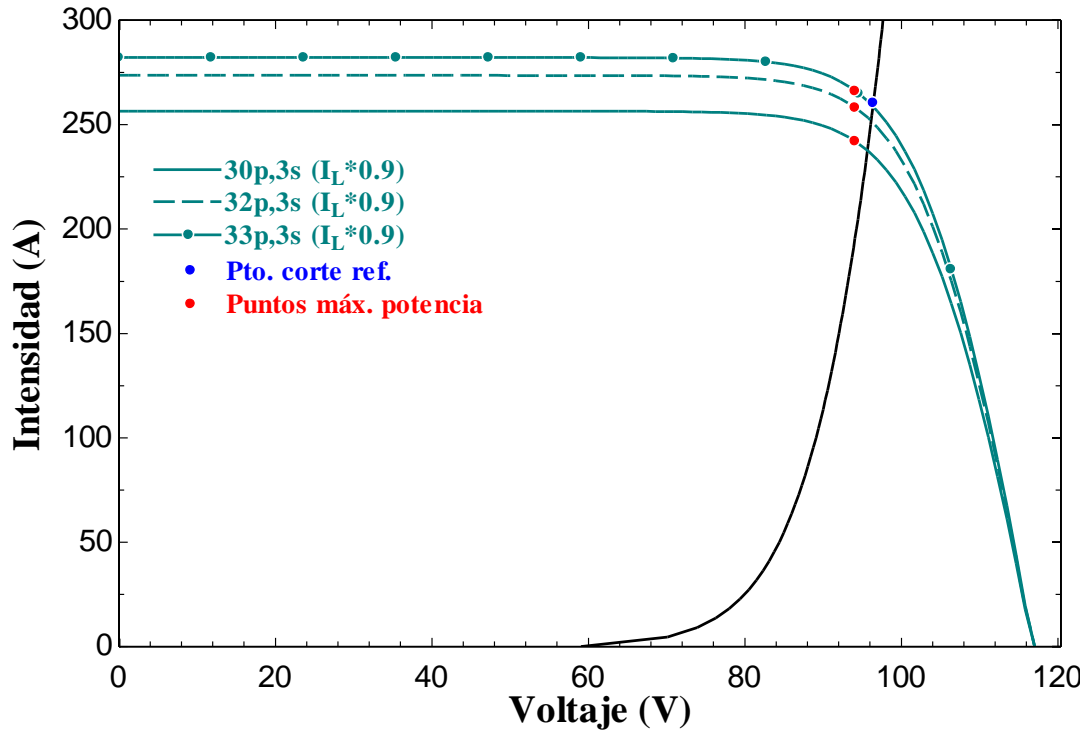


Figura 4-24: Parte 2 - Curvas características nueva configuración caso  $I_L$

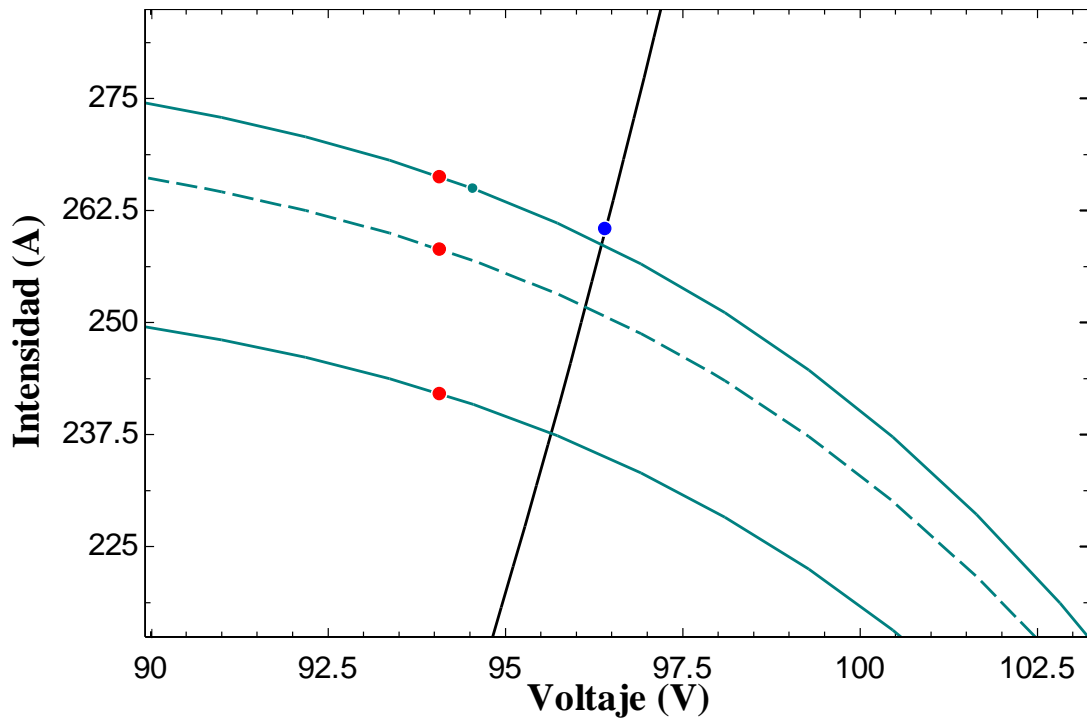


Figura 4-25: Zoom parte 2 - curvas características nueva configuración caso  $I_L$

$I_L$	+10%		-10%	
$N_p$	28	27	33	32
$N_s$	3	3	3	3
$I_{pto,corte}$ [A]	265.5	257.2	258.8	251.8
$V_{pto,corte}$ [V]	96.58	96.3	96.36	96.13
$P_{suministro}$ [W]	25645	24767	24934	24203
$n_{H_2}$ [mol/s]	0.06136	0.05943	0.0598	0.05819
$\eta_{energetico}$ [%]	68.4	68.6	68.54	68.7
$\eta_{acople}$ [%]	99.26	99.41	99.55	99.65
$\Delta n_{H_2}$ [%]	2	1.24	0.63	3.3
$\Delta \eta_{energ}$ [%]	0.17	0.1	0.0	0.3
$\Delta \eta_{acople}$ [%]	0.21	0.0	0.0	0.2

Tabla 4-20:Parte 2 -Valores magnitudes del acople de las curvas características de nueva configuración (caso  $I_L$ )



## 5. Interpretación de los resultados

Durante el desarrollo de este apartado se comentaran los valores numéricos obtenidos en cada uno de los casos de análisis con el propósito de proporcionar al lector una visión global de la sensibilidad que presenta la configuración de módulos fotovoltaicos respecto a cada uno de ellos. Es decir, como se modifica la curva característica del generador fotovoltaico ( que no es más que su comportamiento) respecto a la curva característica del caso de referencia, que a su vez está directamente ligado al punto de operación del acople con el electrolizador.

Para poder valorar y cuantificar las modificaciones sufridas se estableció un punto de referencia, este es el punto de operación o suministro nominal, muy próximo al punto de suministro nominal del electrolizador, aceptado como tal el que proporcionaba el fabricante en la ficha de características de este.

### 5.1. Parámetro $R_S$

El parámetro  $R_S$ , como ya se explico con anterioridad agrupa de forma aproximada el efecto de la resistencia en serie que presenta tanto las conexiones, como el colector (“bulk”) y la superficie , distribuido dichas resistencias por todo el volumen de la célula o modulo fotovoltaico.

Como ya Townsend demostró y contraste con numerosos análisis en su tesis, el parámetro  $R_S$  adquiere relevancia en condiciones lejanas a las denominadas condiciones de referencia, ya que aproxima con mayor precisión la curva simulada por el modelo matemático a la correspondiente curva empírica del modulo o célula fotovoltaica.

*Lejos de las condiciones de referencia, los modelos I-V que incluyen una resistencia en serie describen una curva I-V que es bastante diferente a las curvas descritas por modelos en los que la resistencia en serie es desestimada. Durante un rango completo de condiciones de operación, como en una simulación anual, la predicción de producción cuando la resistencia en serie es desestimada oscila entre un 5-8% menor que si esta estuviese presente (Townsend, 1989).*

Este hecho justifica que durante su tesis Townsend presente varios modelos que no conciben una resistencia en paralelo para la modelización de la curva característica.

Sin embargo, aunque el análisis de este trabajo solo se haya desarrollado en las condiciones de referencia, de cierta manera la idiosincrasia de este parámetro queda reflejada en los valores obtenidos del análisis de sensibilidad. De manera añadida el número de módulos conectados en serie no ha sido muy numeroso por lo que el calado de este parámetro tiene sentido que no haya tenido mucho trasfondo.

Al aumentar el valor  $R_S$  un 10%, se puede observar como la curva se contrae en su punto de máxima potencia y de manera análoga al reducirse un 10%, la curva se ha expandido en el mismo punto. Sin embargo en ambas situaciones no se modifica ni el voltaje de circuito abierto ni la intensidad de cortocircuito.

La intensidad de cortocircuito está totalmente ligada al parámetro  $I_L$ , por lo que al mantenerlo constante esta permanece inmutada.

Por otra parte, el voltaje de circuito abierto por definición es el voltaje en bornes cuando la intensidad que recorre el circuito es cero, o visto de otro modo a través de la ley de ohm, la resistencia tiende a infinito. Siendo de tal manera, una pequeña variación en la resistencia no supone un cambio sustancial como para modificar este valor.

De la modificación del comportamiento una célula o módulo fotovoltaico ante una variación en la resistencia en serie ya hizo referencia Townsend durante su estudio, ya que, más que en la curva V-I de la célula o módulo fotovoltaico, el efecto del parámetro se evidenciaba en la generación de potencia, es decir en la curva Potencia-V.

En definitiva, debido a las características del análisis, no es un término que afecte notoriamente al comportamiento de los módulos fotovoltaicos. Evidencia de ello se observa en la figura 4-9, donde presentan mejor acople las configuraciones iniciales que las otras opciones que se modelan. Siendo absolutamente innecesario cerciorarse de otras configuraciones aparte de las graficadas, ya que es obvio que el punto de corte iba a estar muy alejado del fijado como referencia, aunque si fuese posible que la curva del electrolizador se arrimase más al punto de máxima potencia de los módulos fotovoltaicos obteniéndose mejores rendimientos de acoplamiento.

## 5.2. Parámetro $\lambda$

Townsend define este parámetro como el factor de forma por el número de células en serie. El factor de forma es una medida de lo cuadrada que es la curva característica, mide de cierta manera las imperfecciones que presenta la célula fotovoltaica y no es directamente medible.

Al modificar este factor se está actuando directamente sobre lo ideal que son las células fotovoltaicas que componen los módulos.

En la figura 4-10 se observa como una variación solo el 10% afecta de manera notoria a la curva característica de los módulos fotovoltaicos y queda patente que al aumentar este parámetro la curva se desplaza hacia un voltaje en circuito abierto mayor, adquiriendo una forma más cuadrada.

A simple vista es obvio que la sensibilidad que muestra la curva característica hacia este parámetro es bastante pronunciada y como el punto de máxima potencia y la producción de potencia en este se modifica en un porcentaje similar al parámetro  $\lambda$ .

Cuando  $\lambda$  aumenta un 10%, a diferencia del caso anterior la curva se expande, traduciéndose esto en un aumento de la producción máxima de los módulos fotovoltaicos que disminuye los rendimientos energéticos y de acople, un 0.6% y 2.4% respectivamente. Aunque la producción de hidrogeno aumente (7.5 %) ya que la intensidad del punto de acople aumenta también.

La modificación de estas magnitudes no es muy pronunciada ya que el nuevo punto de acople cae aun por la zona curva del punto de máxima potencia, donde la pendiente es bastante

liviana. Si el valor se hubiese aumentado en mayor cantidad la conexión de dos módulos en paralelo en vez de tres posiblemente seria la opción más viable para aproximar de nuevo el acople a un escenario más adecuado, sin embargo recalcar que el suministro óptimo del electrolizador está muy próximo a la potencia máxima de suministro admitida por este, por lo que un aumento mucho más significativo incapacitaría el acople entre el electrolizador y los módulos fotovoltaicos, esto se puede apreciar en la figura 4-12 En definitiva la variación de los módulos conectados en paralelo son la mejor alternativa para el retorno al punto de referencia.

Como los punto de máxima potencia se desplaza en una vertical ya que el parámetro  $\lambda$  está directamente relacionado con las conexiones en serie, al reducir el número de módulos en paralelo se estará aproximando el punto de acople al punto de referencia de partida, siendo la nueva configuración más próxima la de 28 módulos en paralelo (siendo solo un 0.5% superior). Es lógico que a medida que se aproxime la nueva curva característica a la situación de referencia, ambas potencias, la de suministro (la del punto de corte) y la de producción máxima de los módulos descendan, sin embargo a medida que desciende, la diferencia entre estas aumenta ligeramente, es decir la diferencia entre el valor del distanciamiento  $P_{pmp}$  y distanciamiento  $P_{pdc}$  aumenta (3.3 % para 30 módulos en paralelo, 3.4% para 29 módulos en paralelo y 3.5% para 28 módulos en paralelo), lo que se traduce en un descenso del rendimiento del acople. Sin embargo el rendimiento energético aumenta ya que el descenso de la potencia de suministro es mas acuciado que el de la producción de hidrógeno (del paso de 29 módulos a 28 módulos en paralelo, el descenso en la potencia de suministro es de un 3.8 % frente a los 0.00211 mol/s que desciende la producción de hidrogeno, que aproximadamente corresponde a un 3.4%).

En definitiva la configuración serie-paralelo que mas aproxima al punto de referencia es la de 28 módulos en paralelo y 3 en serie, siendo el rendimiento energético similar al de referencia y la producción de hidrogeno un 0.45% mayor. Sin embargo al trabajar con 29 módulos en paralelo, que supone un potencia de suministro de 1kW mayor, la producción de hidrogeno aumenta un 3.55% respecto a la de 28 módulos en paralelo y un 4% respecto a las condiciones de referencia, solo viéndose penalizado el rendimiento energético en un 0.38% y en un 2.65% el rendimiento del acople respecto al caso de referencia, 0.25% menor que la penalización del rendimiento de acople con 28 módulos en paralelo (2.9%)

A continuación se interpretara cuando  $\lambda$  disminuye un 10%. Al disminuir el valor se está caracterizando numéricamente el distanciamiento de las células fotovoltaicas respecto de su carácter ideal. En la figura 4-10 queda reflejado como la curva característica correspondiente sufre una recesión, lo que provoca una disminución de la producción máxima potencia de los módulos fotovoltaicos y un nuevo punto de acople bastante alejado del punto de referencia.

Con un simple vistazo a la tabla 4-9, se detecta como la producción de hidrogeno y el rendimiento del acople han disminuido de forma notoria (un 24,6% y un 17,4% respectivamente), mientras que el rendimiento energético solo ha sufrido un pequeño cambio, ya que como se ha recalcado durante el texto, este depende únicamente de la producción de hidrogeno y el punto de suministro, al descender ambos se mantiene un valor aproximadamente constante.

En esta ocasión a partir de la configuración inicial, para aproximar el nuevo punto de acople al punto de acople de referencia habría que añadir un número considerable de módulos en paralelo para lograr esta labor. En la figura 4-13 se aprecia como susodicho número se corresponde al valor de 47 módulos en serie, que aunque prácticamente el corte entre ambas curvas

características tenga lugar por el punto de acople de referencia, la máxima potencia producida por los módulos se aleja un 40% de la de suministro del electrolizador, lo que se traduce en una caída del rendimiento del acople.

Parece lógico conectar 4 módulos en serie para posicionar la curva característica para un acople mas óptimo. Si se mantiene el numero de módulos en paralelo original, el nuevo punto de acople se sitúa casi en el límite de operación del electrolizador figura 4-14, por lo que una se tendrá que buscar una configuración con un menor número de módulos en paralelo para aproximar el nuevo punto de operación al punto de acople de referencia.

Esta configuración, tal como muestra la figura 4-14 se halla en 27 o 28 módulos en paralelo. En el caso de 27 módulos en paralelo la potencia máxima producida por los módulos fotovoltaicos está más próxima a la potencia de suministro de referencia (del orden de un 7.6% superior) por lo que cabria esperar un rendimiento de acople mayor, sin embargo con la configuración de 28 módulos en paralelo el nuevo punto de acople se sitúa más cercano al de referencia, lo que compensa el aumento de la potencia máxima generada, obteniéndose un rendimiento de acople ligeramente mayor que el anterior (un 8.4% inferior al rendimiento de acople de referencia frente a un 8.6% de la otra configuración). De forma añadida se sitúa por encima del punto de acople de referencia, por lo que la producción de hidrogeno es mayor, del orden del 1.5% penalizando sutilmente el rendimiento energético, un 0.1% menor. Por la tanto la disposición de 4 módulos en serie y 28 en paralelo se posiciona como la más adecuada.

### 5.3. Parámetro $I_0$

El parámetro  $I_0$  se corresponde a la corriente de saturación inversa del diodo, que como muestra la ecuación 3.3 es uno de los valores que define la corriente que atraviesa el diodo. Este valor ronda del orden del pico al nano amperio y depende de la temperatura de operación y del material.

La corriente del diodo es la que le da su forma característica a la curva I-V, que como ya se menciono en el apartado 3.1.2 dicha curva solo genera potencia en el primer cuadrante.

Al igual que ocurre con la modificación de la resistencia en serie, al variar la corriente inversa de saturación no se aprecia un efecto muy pronunciado. Si es verdad que en esta ocasión se diferencia una variación en el voltaje en circuito abierto, y aproximadamente a partir del punto de máxima potencia de ambos casos de análisis, se distingue la separación entre las nuevas curvas características y la curva de referencia.

Si se observa la ecuación de 3.18, la corriente inversa de saturación aparece multiplicando la exponencial de un cociente por el voltaje en circuito abierto, por lo tanto si la corriente inversa de saturación se contrae el voltaje de circuito abierto tendrá que aumentar y viceversa para mantener el valor de la igualdad ya que  $I_L$  se mantiene constante.

Sea como fuere, se puede apreciar una situación en la misma línea de comportamiento que en el caso de la resistencia en serie. Al aumentar la intensidad inversa de saturación y contraer la curva, disminuye la intensidad del punto de corte afectando de manera similar a la producción de hidrogeno ya que la eficiencia de faradays permanece casi constante, sin embargo al disminuir

también el voltaje del punto de corte el resultado es que el rendimiento energético aumenta ligeramente aunque descienda la producción de hidrogeno. Tal producción de hidrogeno desciende un 0.73%, siendo la disminución de la intensidad en el punto de corte de 2 amperios, que corresponden aproximadamente a un 0.73% de los 260.4 amperios del caso de referencia, aumentando el rendimiento energético en un 0.06%.

Por otra parte cuando  $I_0$  se disminuye, la curva se expande, el punto de corte se desplaza a parámetros algo superiores, como la potencia máxima producida por los módulos fotovoltaicos apenas se ve afectada, el rendimiento del acople aumenta ligeramente. El punto de corte de ambas curvas se desplaza un 0.8%, es decir que aumenta un 0.8%, mientras que la potencia máxima producida por los módulos crece un 0.6%.

En definitiva, el escenario se sitúa en una tesitura parecida a la presentada en el primer caso. El acople más cercano al punto de operación de referencia lo presenta las configuraciones de conexión serie-paralelo de partida, en ambos caso al reducir de 30 módulos en paralelo a 29 módulos, se aproxima el punto de máxima potencia al punto de corte de las curvas con la curva del electrolizador, a la misma vez que la potencia máxima producida por los módulos disminuye. Esto se traduce en un aumento del rendimiento del acople (entre 0.2 y 0.3 %) y un aumento del rendimiento energético (0.2-0.3%), ya que como se puntualizó anteriormente la disminución de la producción de hidrogeno es menor que la disminución del punto de acople. Sin embargo el beneficioso adquirido en estas magnitudes es muy leve, tanto que no justificaría operar casi a 1 kW y 500 W por debajo del punto de referencia o de operación nominal del electrolizador.

## 5.4. Parámetro $I_L$

$I_L$  es la corriente generada por el generador de corriente. Townsend la denomina como “light-generated current”. Es directamente proporcional a la irradiancia y relacionada linealmente con la temperatura de la célula, también depende del material y del proceso de fabricación de este.

A partir de las simplificaciones propuestas por Townsend para la resolución lineal del circuito equivalente “UP model”, el parámetro  $I_L$  equivale aproximadamente a la intensidad en cortocircuito, ec. 3.17, por lo que al variar este se estará modificando directamente la  $I_{sc}$ .

Al actuar sobre la intensidad de cortocircuito y no modificar el resto de valores, la curva se desplazara prácticamente de forma vertical, por lo que el punto de máxima potencia de esta lo hará de forma similar y un porcentaje aproximado, situación similar a la acontecida con la modificación del parámetro  $\lambda$  pero esta vez en disposición vertical. En la figura 4-21 se puede apreciar este hecho.

Al incrementar en un 10%  $I_L$ , debido a lo que se ha comentado anteriormente, la curva crece de forma vertical, alejándose el punto de máxima potencia del punto de acople con el electrolizador de referencia ya que la curva del electrolizador tiene pendiente positiva (figura 4-21). Como resultado, el rendimiento del acople cae un 0.5% mientras que la producción de hidrogeno se ve incrementada en un 8.3%.

Para volver a aproximar el punto de máxima potencia al punto de operación de referencia para un acople mas óptimo habrá que reducir el número de módulos en paralelo. En la figura 4-22

y 4-23 se aprecian las diferentes opciones, siendo la configuración más certera la de 27 módulos en paralelo. El rendimiento del acople es similar al correspondiente en el punto de referencia, la producción de hidrogeno es de 0.05943 mol/s, un 1.24% menor que la producción de hidrogeno de referencia, con una eficiencia energética prácticamente idéntica. La potencia de suministro es 1.35% menor, es decir unos 24767 W.

Por otra parte al reducir en un 10%  $I_L$ , el punto de máxima potencia de la nueva curva característica prácticamente coincide con el nuevo punto de acople, lo que se traduce en un rendimiento del acople de casi el 100%. Sin embargo, la producción máxima de potencia se ve reducida en torno un 10% al igual que la potencia de suministro.

Para volver a una situación parecida a la de referencia habrá que aumentar el número de módulos en paralelo. En la figura 4-24 y 4-25 se presentan las diferentes opciones. La disposición de 33 módulos en paralelo presenta un acople prácticamente similar al de referencia. Al igual que la nueva configuración acatada cuando se aumento un 10%  $I_L$ , el rendimiento de acople y energético es similar al de referencia, la producción de hidrógeno un 0.63% menor (el nuevo punto de acople esta algo por debajo del de referencia), con una potencia de suministro 0.7% inferior (24934 W), y una producción de potencia máxima solo un 0.23% superior a la potencia de suministro de referencia.

En resumen se puede extraer que la variación de un 10% de la corriente generada por el generador de corriente supone una variación de 3 módulos fotovoltaicos conectados en paralelo para volver aproximadamente a la situación inicial.

## 6. Conclusiones

En el apartado anterior, donde se han interpretado individualmente los resultados obtenidos a raíz de la modificación de cada uno de los parámetros, ha quedado patente que la curva característica del electrolizador se muestra más sensible a unos parámetros que otros.

Para facilitar la apreciación de esta sensibilidad, a partir de la curva modificada, obtenida al incrementar o disminuir un 10% el valor de referencia de uno de los parámetros de la curva característica de referencia de los módulos fotovoltaicos (la obtenida con 30 módulos conectas en paralelo y 3 en serie), se examina si una nueva configuración en serie-paralelo aproxima la nueva curva alterada a su posición original, con el propósito de arrimar el nuevo punto de acople al punto de operación de referencia.

Al actuar de la forma anterior, de una manera simple se puede apreciar si, dado el caso, la variación de un parámetro en un tanto por ciento implica la conexión o desconexión de un número de módulos, ya sea en serie o paralelo. Tal modificación conlleva un efecto, que supondrá una variación de cierto número de módulos. En definitiva con este proceder la finalidad es la de medir los efectos acontecidos por la variación de uno de los parámetros de partida a partir de la variación del numero de módulos, y de esta manera evidenciar a cuál de los parámetros, y valores del fabricante ligados con la descripción o cálculo de este, hay que prestar un mayor cuidado y esmero a la hora de su elección para el diseño de un sistema de producción de hidrogeno a partir del acople directo de un electrolizador y un generador fotovoltaico..

A continuación se va a recapitular las diferentes singularidades en el comportamiento de los módulos durante el desarrollo del análisis de sensibilidad:

### *Parámetro $R_s$*

El parámetro  $R_s$  a primera vista no tiene un efecto significativo, figura 4.6. La curva solo se expande y contrae levemente en las cercanías del punto de máxima potencia. Debido a esto la configuración en serie-paralelo permanece inmutada.

Aunque no se aprecie, al despreciar este parámetro o bien reducirlo, la curva Potencia-V se expande de una manera acuciada en los alrededores del punto de máxima potencia hacia el voltaje de circuito abierto, por lo tanto a la hora de predecir la producción de potencia puede sobreestimar los resultados frente a la producción real. De manera análoga al aumentar este valor se contrae la curva, subestimando la producción del módulo fotovoltaico.

En definitiva el parámetro  $R_s$  adquiere protagonismo durante la predicción de producción en puntos de medida alejados del punto de máxima potencia.

### *Parámetro $\lambda$*

Al manipular el valor de  $\lambda$ , se está interfiriendo de manera directa en la “idealidad” de la célula o módulo fotovoltaico, ya que como se comento en apartados anteriores, este parámetro es el producto del número de células o módulos en serie y el factor de forma de estas o estos.

El comportamiento de la curva característica se muestra bastante sensible frente a este parámetro. Tal como se aprecia en la figura 4.10, al disminuir el valor de  $\lambda$ , se está expresando o

más bien graficando, que las células o módulos presentan mayores imperfecciones interna por lo tanto la producción disminuye, la curva se retrae de forma horizontal ya que el parámetro  $\lambda$  esta directamente ligado con las conexiones en serie. Al aumentar el valor se comporta de forma inversa.

Al disminuir el valor el efecto es algo mas acuciado, exige conectar un modulo mas en serie y disponer de 28 en paralelos. Por su parte al aumentar el valor, para volver aproximar los puntos de acople y el de acople de referencia, se disponen de 28 módulos en paralelo manteniéndose la conexión de 3 en serie.

#### *Parámetro $I_0$*

Al igual que sucede en la modificación de la resistencia en serie, los efectos de variar la corriente inversa de saturación no presenta unas secuelas considerables en la curva característica (figura 4-5). Debido a esto la configuración inicial en serie-paralelo sigue siendo la que mejor acople atesora.

Sin embargo en esta ocasión, al alterar este parámetro habría que puntualizar un cierto aspecto. Debido a que modifica ligeramente el voltaje de circuito abierto, aproximadamente a partir del punto de máxima potencia se dejan de solapar las diferentes curvas características (la correspondiente una disminución del 10%, la de referencia y la del un incremento del 10%). Por lo cual, aunque la corriente inversa de saturación en condiciones de referencia no tiene un efecto brusco en el comportamiento de los módulos fotovoltaicos. Sí que puede adquirir protagonismo cuando el electrolizador, por la razón que sea, trabaje a bajas temperatura, desplazando la curva de este hacia la zona de bajas intensidades donde el efecto de  $I_0$  es apreciable. Recordar que la producción de hidrogeno del electrolizador es directamente proporcional a la corriente que lo atraviesa.

#### *Parámetro $I_L$*

Este parámetro, debido a la resolución simplificada del circuito de equivalente, está directamente asociado a la intensidad de cortocircuito. Como ya se expuso en la interpretación de resultados (apartado 5.4), al variar este en un tanto por ciento, se estará variando la intensidad de cortocircuito en la misma cantidad, por lo tanto la curva característica crecerá o menguará de forma vertical desplazando el punto de máxima potencia prácticamente en el mismo orden.

Debido a lo anterior la curva característica se muestra bastante sensible a este parámetro (figura 4-21), muestra de ello es que la modificación en un 10% supone la conexión o desconexión de 3 módulos en paralelo para volver aproximar los puntos de acople.



## Anexo A: Código EES

### Código para el electrolizador

---

$$T = 80$$

$$U_{rev} = 1.23$$

$$r_a = 0.0018791 - 0.000021166 \cdot T$$

*Coefficientes experimentales en función de la temperatura.*

$$s = 0.2982$$

$$t_a = 2.891 - 0.0707 \cdot T + 0.0006 \cdot T^2$$

$$N_{celdas,electrolizador} = 48$$

$$U_{elec} = N_{celdas,electrolizador} \cdot (U_{rev} + r_a \cdot I_{elec} + s \cdot \log(t_a \cdot I_{elec} + 1))$$

*Curva característica I-V.*

$$Pot_{nom} = 25000$$

$$Pot_{nom} = U_{corte} \cdot I_{corte}$$

*Curva de potencia de suministro nominal.*

$$U_{corte} = N_{celdas,electrolizador} \cdot (U_{rev} + r_a \cdot I_{corte} + s \cdot \log(t_a \cdot I_{corte} + 1))$$

## Código para módulo el fotovoltaico

- Datos

$$I_{sc} = 9.5$$

$$V_{oc} = 39.1$$

$$I_{mp} = 8.96$$

$$V_{mp} = 31.3$$

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19}$$

$$k = 1.381 \times 10^{-23}$$

$$\text{bandgap} = 1.12$$

$$T_c = 25$$

- Resolución

$$I = I_l \cdot N_p - I_0 \cdot N_p \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot N_s \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot \left( V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p} \right) \right] \quad \text{Curva característica I-V.}$$

$$-I_{sc} + I_l = 0 \quad F1$$

$$I_l - I_0 \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot V_{oc} \right] = 0 \quad F2$$

$$-I_{mp} + I_l - I_0 \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s) \right] = 0 \quad F3$$

$$1 - \left[ \exp \left( \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot (V_{mp} - V_{oc} + I_{mp} \cdot R_s) \right) \cdot \left( 1 + \frac{\frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot V_{mp}}{1 + \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot R_s \cdot I_{sc} \cdot \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \right] \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot (V_{mp} - V_{oc} + I_{mp} \cdot R_s) \right]} \right) \right] = 0 \quad F4$$

$$\lambda_{may} = \frac{\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mp}} + \ln \left[ 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right]}{2 \cdot V_{mp} - V_{oc}}$$

$$R_s = \frac{\frac{1}{\lambda_{may}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right] + V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}$$

$$I_0 = I_{sc} \cdot \exp(-\lambda_{may} \cdot V_{oc})$$

$$\lambda = \frac{q}{\lambda_{may} \cdot k \cdot (T_c + 273)}$$

$$N_p = 30$$

*Numero de módulos en serie y paralelo.*

$$N_s = 3$$

*Sustituciones consecutivas de las funciones objetivos.*

*Con ella se obtiene los parámetros iniciales si hay problemas de compilación con los limites.*

## Código para las gráficas

---

### Electrolizador

$$T = 80$$

$$U_{rev} = 1.23$$

$$r_a = 0.0018791 - 0.000021166 \cdot T$$

$$s = 0.2982$$

$$t_a = 2.891 - 0.0707 \cdot T + 0.0006 \cdot T^2$$

$$U_{ptocorteref} = 96.41$$

$$I_{ptocorteref} = 260.4$$

*Punto de acople de referencia*

$$U_{elec} = 48 \cdot (U_{rev} + r_a \cdot I_{elec} + s \cdot \log(t_a \cdot I_{elec} + 1))$$

### Módulos fotovoltaicos

- Datos

$$I_{SCref} = 9.5$$

$$V_{OCref} = 39.1$$

$$I_{mpref} = 8.96$$

$$V_{mpref} = 31.3$$

$$P_{maxref} = I_{mpref} \cdot V_{mpref}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19}$$

$$k = 1.381 \times 10^{-23}$$

$$T_{Cref} = 25$$

$$f_{inoct} = 800$$

$$\text{bandgap} = 1.12$$

$$T_{ambnoct} = 20$$

$$T_{Cnoct} = 46$$

$$\alpha_{isc} = \frac{0.04}{100}$$

$$\text{betha}_{voc} = \frac{-0.3}{100}$$

*Coefficientes para cuantificar las características térmicas del módulo fotovoltaico (los proporciona el fabricante).*

Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño de sistemas de producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica

---

$$\text{betha}_{\text{vmp}} = \frac{-0.4}{100}$$

$$\text{mi}_{\text{pmax}} = \frac{-0.42}{100}$$

$$T_c = T_{\text{amb}} + \left[ \frac{T_{c_{\text{noct}}} - T_{\text{amb}_{\text{noct}}}}{f_{i_{\text{noct}}}} \right] \cdot f_i$$

$f_i = 1000$

*Ecuación que caracteriza el cambio de la irradiancia en variación de temperatura del modulo.*

- Resolución

*Curva característica I-V extrapolada al número de conexiones en serie o paralelo.*

$$I = I_l \cdot N_p - I_0 \cdot N_p \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot N_s \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot \left( V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p} \right) \right]$$

$$I_{sc} = I_{sc_{\text{ref}}} \cdot (1 + \alpha_{isc} \cdot (T_c - T_{c_{\text{ref}}}))$$

$$V_{oc} = V_{oc_{\text{ref}}} \cdot (1 + \text{betha}_{\text{voc}} \cdot (T_c - T_{c_{\text{ref}}}))$$

$$V_{mp} = V_{mp_{\text{ref}}} \cdot (1 + \text{betha}_{\text{vmp}} \cdot (T_c - T_{c_{\text{ref}}}))$$

$$P_{max} = P_{max_{\text{ref}}} \cdot (1 + \text{mi}_{\text{pmax}} \cdot (T_c - T_{c_{\text{ref}}}))$$

*Ecuaciones para calcular la variación de los parámetros proporcionado por el fabricante con la temperatura.*

$$P_{max_{pv}} = P_{max} \cdot N_p \cdot N_s$$

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$$

$$\text{Potencia} = V \cdot I$$

$$\lambda = 69.98$$

$$I_0 = 3.403 \times 10^{-9}$$

$$I_l = 9.5$$

$$R_s = 0.2952 \cdot 0.9$$

*Parámetros que se obtiene a partir de la resolución del circuito de equivalente, son los parámetros que se modificaran para el análisis de sensibilidad.*

$$T_c = 25$$

$$N_p = 30$$

$$N_s = 3$$

$$V_{mp_{pv}} = V_{mp} \cdot N_s$$

$$I_{mp_{pv}} = I_{mp} \cdot N_p$$

$$I_{ptofuncnomelect} = 259.4$$

$$V_{ptofuncnomelect} = 96.38$$

*Punto de funcionamiento nominal del electrolizador.*

## Código del análisis de sensibilidad.

---

### Electrolizador

$$T = 80$$

$$U_{rev} = 1.23$$

$$r_a = 0.0018791 - 0.000021166 \cdot T$$

$$s = 0.2982$$

$$t_a = 2.891 - 0.0707 \cdot T + 0.0006 \cdot T^2$$

- Datos

$$I_{sc} = 9.5$$

$$V_{oc} = 39.1$$

$$I_{mp} = 8.96$$

$$V_{mp} = 31.3$$

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19}$$

$$k = 1.381 \times 10^{-23}$$

$$\text{bandgap} = 1.12$$

$$T_c = 25$$

• Resolución

$$-I_{sc} + I_l = 0 \quad F1$$

$$I_l - I_0 \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot V_{oc} \right] = 0 \quad F2$$

$$-I_{mp} + I_l - I_0 \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s) \right] = 0 \quad F3$$

$$1 - \left[ \exp \left( \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot (V_{mp} - V_{oc} + I_{mp} \cdot R_s) \right) \cdot \left( 1 + \frac{\frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot V_{mp}}{1 + \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot R_s \cdot I_{sc} \cdot \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \right] \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot (V_{mp} - V_{oc} + I_{mp} \cdot R_s) \right]} \right) \right] = 0 \quad F4$$

$$I_l = 9.5 \cdot 0.9$$

$$I_0 = 3.403 \times 10^{-9}$$

*Parámetros.*

$$\lambda = 69.98$$

$$R_s = 0.2952 \cdot \text{factor}_{\text{casos}} \quad \text{Coeficiente para modificar los parámetros del análisis.}$$

$$N_p = 30$$

$$N_s = 3$$

$$U_{\text{ptocorte}} = 48 \cdot (U_{\text{rev}} + r_a \cdot I_{\text{ptocorte}} + s \cdot \log(t_a \cdot I_{\text{ptocorte}} + 1))$$

$$I_{\text{ptocorte}} = I_l \cdot N_p - I_0 \cdot N_p \cdot \exp \left[ \frac{q}{\lambda \cdot N_s \cdot k \cdot (T_c + 273)} \cdot \left( U_{\text{ptocorte}} + I_{\text{ptocorte}} \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p} \right) \right]$$

*Ecuaciones para el cálculo del punto de corte.*

- Rendimientos y magnitudes de estudio

$$f1 = 20000$$

$$f2 = 0.93$$

$$S_{\text{elect}} = 0.06$$

$$\text{Faraday}_{\text{cte}} = 96485$$

$$PC_h = 142.9 \cdot 2$$

$$\varepsilon_{\text{farady}} = f2 \cdot \left[ \frac{\left( \frac{I_{\text{ptocorte}}}{S_{\text{elect}}} \right)^2}{\left( \frac{I_{\text{ptocorte}}}{S_{\text{elect}}} \right)^2 + f1} \right]$$

$$\eta_{h2} = \varepsilon_{\text{farady}} \cdot 48 \cdot \frac{I_{\text{ptocorte}}}{2 \cdot \text{Faraday}_{\text{cte}}}$$

$$\eta_{\text{stack}} = \frac{\eta_{h2} \cdot PC_h \cdot 1000}{I_{\text{ptocorte}} \cdot U_{\text{ptocorte}}}$$

$$\eta_{\text{acople}} = \frac{P_{\text{otelectrolizador}}}{P_{\text{maxptomaxpot}}}$$

$$\varepsilon_{\text{faradyref}} = f2 \cdot \left[ \frac{\left( \frac{I_{\text{ptocorteref}}}{S_{\text{elect}}} \right)^2}{\left( \frac{I_{\text{ptocorteref}}}{S_{\text{elect}}} \right)^2 + f1} \right]$$

*Cálculo de la eficiencia de Faraday, la producción de hidrógeno, el rendimiento energético (o rendimiento del stack) y el rendimiento del acople.*



$$\eta_{h2ref} = \varepsilon_{faradyref} \cdot 48 \cdot \frac{I_{ptocorteref}}{2 \cdot Faraday_{ote}}$$

$$\eta_{stackref} = \frac{\eta_{h2ref} \cdot PC_h \cdot 1000}{I_{ptocorteref} \cdot U_{ptocorteref}}$$

$$\eta_{acopleref} = \frac{Pot_{electrolizadorref}}{P_{maxptomaxpotref}}$$

$$\delta_{stack} = \frac{\eta_{stackref} - \eta_{stack}}{\eta_{stackref}}$$

$$\delta_{acople} = \frac{\eta_{acopleref} - \eta_{acople}}{\eta_{acopleref}}$$

$$\delta_{nh2} = \frac{\eta_{h2ref} - \eta_{h2}}{\eta_{h2ref}}$$

$$\delta_{Voc} = \frac{39.1 - Voc}{39.1}$$

$$\delta_{Isc} = \frac{9.5 - Isc}{9.5}$$

$$\delta_{P_{ptomaxpot}} = \frac{31.3 \cdot 8.96 - P_{max}}{31.3 \cdot 8.96}$$

$$Pot_{electrolizadorref} = U_{ptocorteref} \cdot I_{ptocorteref}$$

$$P_{maxptomaxpotref} = 30 \cdot 3 \cdot 31.3 \cdot 8.96$$

$$Pot_{electrolizador} = U_{ptocorte} \cdot I_{ptocorte}$$

$$P_{maxptomaxpot} = I_{ptomaxpot} \cdot U_{ptomaxpot}$$

$$Voc_{pvacople} = Voc \cdot Ns$$

$$I_{SC_{pvacople}} = I_{sc} \cdot N_p$$

$$U_{ptocorteref} = 96.41$$

$$I_{ptocorteref} = 260.4$$

$$I_{ptomaxpot} = I_{mp} \cdot N_p$$

$$U_{ptomaxpot} = V_{mp} \cdot N_s$$

$$\text{distanciamiento}_{ptomaxpot} = \frac{Pot_{electrolizadoref} - P_{max_{ptomaxpot}}}{Pot_{electrolizadoref}}$$

$$\text{distanciamiento}_{ptocorte} = \frac{Pot_{electrolizadoref} - Pot_{electrolizador}}{Pot_{electrolizadoref}}$$

$$\delta_{I_{ptomaxnomcorte}} = \frac{I_{mp} \cdot N_p - I_{ptocorte}}{I_{mp} \cdot N_p}$$

$$\delta_{U_{ptomaxnomcorte}} = \frac{V_{mp} \cdot N_s - U_{ptocorte}}{V_{mp} \cdot N_s}$$

$$\delta_{I_{ptomaxnom}} = \frac{I_{mp} \cdot N_p - I_{ptocorteref}}{I_{mp} \cdot N_p}$$

$$\delta_{U_{ptomaxnom}} = \frac{V_{mp} \cdot N_s - U_{ptocorteref}}{V_{mp} \cdot N_s}$$

$$\text{Limite} = 25000 \cdot 1.1 - Pot_{electrolizador}$$

Calculo punto de acople de referencia

$$I_{electnom} = 259.4$$

$$U_{electnom} = 96.38$$

$$Pot_{electnom} = I_{electnom} \cdot U_{electnom}$$

$$\varepsilon_{faradynom} = f2 \cdot \left[ \frac{\left( \frac{I_{electnom}}{S_{elect}} \right)^2}{\left( \frac{I_{electnom}}{S_{elect}} \right)^2 + f1} \right]$$

$$\eta_{h2nom} = 0.45 \cdot \frac{1000}{3600 \cdot 2}$$

$$\eta_{stacknom} = \frac{\eta_{h2nom} \cdot PC_h \cdot 1000}{Pot_{electnom}}$$

$$\delta_{nom} = \frac{\eta_{stacknom} - \eta_{stack}}{\eta_{stacknom}}$$

$$\delta_{nomh2} = \frac{\eta_{h2nom} - \eta_{h2}}{\eta_{h2nom}}$$

$$proximidad_{ptomaxpot} = \frac{Pot_{electnom} - P_{tomaxpot}}{Pot_{electnom}}$$

$$proximidad_{ptocorte} = \frac{Pot_{electnom} - Pot_{electrolizador}}{Pot_{electnom}}$$

## Referencias

(Agencia Andaluza de la Energía, 2010): Estado de las tecnologías del hidrógeno y de las pilas de combustible en Andalucía, Agencia Andaluza de la Energía, 2010.

(Lillo, 2014): Teoría y problemas “Instalaciones Fotovoltaicas”, Isidoro Lillo Bravo, 2014

(Marta Victoria y Rodrigo Moretón, 2013): Marta Victoria y Rodrigo Moretón (miembros del Observatorio Crítico de la Energía) a partir de datos de C. Breyer and A. Gerlach., Prog. in Phot.: Res. and App., 21(1):121–136, 2013.

(Pino, 2010: )Análisis de sistemas integrados de producción de hidrógeno a partir de energía eólica. Aportaciones al modelado dinámico de sistemas, Francisco Javier Pino Lucena, 2010.

(R. García-Valverde, 2011): Optimized method for photovoltaic-water electrolyser direct Coupling, R. García-Valverde/ International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) 10574-10586.

(Townsend, 1989): A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaica systems, Timothy U. Townsend, 1989.

(Ulleberg, 2003): Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, Ø. Ulleberg / International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 21 – 33.

## Bibliografía

- Agencia Andaluza de la Energía (2010). *Estado de las tecnologías del hidrógeno y de las pilas de combustible en Andalucía*.
- Djamila Rekioua, Samia Bensmail, Nabila Bettar (2014). *Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application*, International Journal of Hydrogen Energy 39 (2014) 1604 – 1611.
- Francisco Javier Pino Lucena (2010). *Análisis de sistemas integrados de producción de hidrógeno a partir de energía eólica. Aportaciones al modelado dinámico de sistemas*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2005-2006). *Energías renovables para todos*.
- Héctor Holgado Secas (2011-2012). *Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis*. Proyecto final de carrera. Facultad de Náutica de Barcelona, UPC.
- International Energy Agency (2014). *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy 2014 edition*.
- Isidoro Lillo Bravo (2014). *Teoría y problemas “Instalaciones Fotovoltaicas”*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Jorge G. Karacsonyi (2008). Conferencia: *Panorama energético mundial un desafío para la Ingeniería*.
- Junta de Castilla y León (2007). *El Hidrógeno y las Pilas de Combustible, El recorrido de la energía*.
- Marta Victoria y Rodrigo Moretón, (2013). *Tablas precio panel fotovoltaico, a partir de datos de C. Breyer and A. Gerlach., Prog. in Phot.: Res. and App., 21(1):121–136, 2013*.
- R. García-Valverde, N. Espinosa, A. Urbina (2011). *Optimized method for photovoltaic-water electrolyser direct Coupling*, International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) 10574-10586.
- Timothy U. Townsend (1989). *A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems*. Madison: I University of Wisconsin.
- WWF International, ECOFYS, OMA (2011). *El informe de la energía renovable, 100% de energía renovable para el año 2050*.
- Ziyun Su, Shuiting Ding, Zhiwen Gan, Xiaoyi Yang (2014). *Optimization and sensivity analysis of a photovoltaic-electrolyser direct-coupling system in Beijing*, International Journal of Hydrogen Energy 39 (2014) 7202 – 7215.

Øystein Ulleber (2003). *Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach*, International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 21 – 33.