



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos

Autor: Alberto Santillán Tituaña

Tutor: Jordi Andreu Batallé

Curs acadèmic: 2015 - 2016

Màster en Energies Renovables i  
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



## **Agradecimientos**

A Dios el creador de todo y de todos

A mis padres y hermanas

A mis profesores y a mi tutor

A la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación como entidad  
auspiciante de mi beca.

Mil gracias

# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Alcance .....	2
1.3. Antecedentes .....	2
1.3.1. Instalación fotovoltaica conectada a la red .....	3
1.3.2. Instalación fotovoltaica aislada.....	4
1.3.3. Instalación fotovoltaica conectada a la red con sistema de almacenamiento .....	4
<b>2. Características de los principales elementos de una central .....</b>	<b>5</b>
2.1. Panel solar FV .....	5
2.2. Sistemas de Almacenamiento .....	7
2.2.1. Características de las baterías .....	8
2.2.2. Comparación entre baterías electroquímicas .....	8
2.3. Sistema de gestión de baterías SGB.....	10
2.3.1. Funciones del SGB .....	10
2.3.2. Criterio de selección de SGB en centrales de potencia.....	11
2.4. Sistema de conversión de potencia .....	11
2.4.1. Inversores de onda.....	11
2.4.2. Rendimiento del inversor de onda.....	12
2.5. Transformador .....	13
2.5.1. Rendimiento del transformador .....	13
<b>3. Descripción del caso de estudio .....</b>	<b>14</b>
3.1. Ubicación.....	14
3.2. Características de los paneles solares.....	14
3.3. Características de las baterías.....	14
3.4. Características de los inversores .....	15
3.5. Potencia contratada.....	16
3.6. Método de cálculo.....	16
3.6.1. Parámetros del sistema.....	17
3.6.2. Análisis de pérdidas.....	18
3.6.3. Procedimiento .....	18
3.6.5. Energía generada.....	20
3.6.6. Precio de la Energía .....	21
<b>4. Evaluación de la producción de energía .....</b>	<b>21</b>
4.1. Modelos de almacenamiento .....	22
4.2. Tratamiento de datos.....	22
4.3. Resultados .....	24
4.4. Comparación de la energía producida y aprovechada.....	27
<b>5. Discusión acerca de la rentabilidad económica.....</b>	<b>28</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>29</b>
<b>7. Referencias .....</b>	<b>30</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Mayores productores de paneles solares en el mundo, año 2015 .....	6
<b>Tabla 2.2.</b> Casas ensambladoras de paneles solares .....	7
<b>Tabla 2.3.</b> Vida útil y costos de algunas baterías .....	9
<b>Tabla 2.4.</b> Tecnologías de almacenamiento a escala de red eléctrica y aplicaciones .....	9
<b>Tabla 2.5.</b> Fabricantes de inversores en el mercado mundial .....	12
<b>Tabla 3.1.</b> Características del panel solar.....	14
<b>Tabla 3.2.</b> Características del sistema de almacenamiento.....	14
<b>Tabla 3.3.</b> Características de las baterías del sistema de almacenamiento.....	15
<b>Tabla 3.4.</b> Información estadística utilizada .....	16
<b>Tabla 3.5.</b> Porcentaje de pérdidas de energía del sistema y módulo .....	18
<b>Tabla 3.6.</b> Ejemplo de cálculo de la productividad para una hora.....	19
<b>Tabla 3.7.</b> Cálculo de la energía generada en el año, sin limitación de potencias .....	20
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados por hora de las energía calculada y algoritmo de almacenamiento .....	23
<b>Tabla 4.2.</b> Resultados de producción para un día típico del mes de julio .....	26
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados diarios del cálculo de la energía y la renta .....	27
<b>Tabla 4.4.</b> Resultados anuales del cálculo de la energía y la renta.....	27
<b>Tabla 5.1.</b> Inversión de acuerdo a la capacidad.....	29

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Diagrama de bloques central fotovoltaica conectada a la red .....	3
<b>Figura 1.2.</b> Esquema de una central fotovoltaica conectada a la red.....	4
<b>Figura 1.3.</b> Instalación fotovoltaica aislada.....	4
<b>Figura 1.4.</b> Diagrama de bloques central fotovoltaica con batería y generador .....	4
<b>Figura 1.5.</b> Esquema de una central fotovoltaica con almacenamiento .....	5
<b>Figura 2.1.</b> Sistemas de almacenamiento de acuerdo a su aplicación y potencia.....	7
<b>Figura 2.2.</b> Esquema de la conexión de los inversores y transformadores .....	11
<b>Figura 2.3.</b> Forma de onda a la salida de un inversor .....	12
<b>Figura 2.4.</b> Izquierda esquema básico de un transformador, Derecha transformador trifásico	13
<b>Figura 3.1.</b> Potencia de un sistema fotovoltaico en función de la hora del día.....	15
<b>Figura 3.2.</b> Productividades de un día típico del mes de enero por horas .....	19
<b>Figura 3.3.</b> Producción mensual.....	20
<b>Figura 3.4.</b> Precio por hora promedio de la energía perteneciente al mes de enero .....	21
<b>Figura 4.1.</b> Producción de energía en los paneles (EDC).....	22
<b>Figura 4.2.</b> Modelo horas finales-energía constante .....	24
<b>Figura 4.3.</b> Modelo hora más rentable .....	24
<b>Figura 4.4.</b> Modelo pérdidas-traslado.....	25
<b>Figura 4.5.</b> Modelo pérdidas-traslado.....	25
<b>Figura 4.6.</b> Modelo pérdidas-traslado.....	26
<b>Figura 4.7.</b> Modelo pérdidas-traslado.....	26

## Nomenclatura

<b>SCADA</b>	(Supervisory Control And Data Acquisition) Sistema de supervisión control y adquisición de datos
<b>TRAFO</b>	Transformador
<b>FV</b>	Fotovoltaico o fotovoltaica.
<b>SA</b>	Sistema de almacenamiento
<b>SGA</b>	Sistema de gestión de almacenamiento
<b>SGB</b>	Sistema de manejo de baterías
<b>CIGS</b>	Cobre, indio, galio, selenio.
<b>CIS</b>	Cobre, indio, selenio.
<b>CC</b>	Corriente continua, también DC.
<b>CA</b>	Corriente alterna, también AC.
<b>CAES</b>	(Compressed Air Energy Storage) Almacenador de energía en forma de aire comprimido.
<b>SMES</b>	(Superconducting Magnetic Energy Storage) Almacenador de energía en forma de campo magnético superconductor.
<b>VRF</b>	(Vanadium Redox Flow) En Baterías redox de flujo de vanadio
<b>MOSFET</b>	Transistor de efecto de campo de tecnología MOS
<b>IGBT</b>	Transistor bipolar de compuesta aislada
<b>BOS</b>	(Balance of System) Balance del sistema.
<b>NOCT</b>	(Nominal Operating Cell Temperature) Temperatura de operación en condiciones nominales de la celda

## 1. Introducción

El suministro de electricidad actual posee una combinación de fuentes de energías renovables y no renovables. En un futuro se espera aumentar el aporte de las energías renovables en esta combinación, de modo que la generación eléctrica sea sostenible.

Un ejemplo de energía renovable es la energía solar, que es además una energía libre de gases contaminantes en su fase de producción (en las demás fases de su ciclo de vida, deja una huella de carbono que se debe tomar en cuenta). Por ende, la energía solar será de gran importancia para reducir la contaminación atmosférica en la producción de electricidad y calor.

En la última década se ha invertido con mayor intensidad en la energía solar lo que ha evolucionado en un desarrollo de la tecnología y abaratamiento de costos. Esto hace vaticinar que en los próximos años alrededor del mundo, se seguirán instalando sistemas de aprovechamiento de energía solar. Y por tal razón, es transcendental encontrar métodos de mejoramiento continuo de los procesos de generación FV<sup>1</sup>.

Con el modelo de generación y consumo actual, la electricidad es producida para ser utilizada casi instantáneamente. Entonces, cualquier desequilibrio puede descompensar el proceso (por ejemplo, una nube que interrumpa la radiación directa del sol). Para evitar esto, integrar elementos destinados al almacenamiento de la energía, permitiría flexibilizar la relación entre la demanda y la producción.

Asegurar un correcto balance entre demanda y consumo, promueve la integración de la energía FV en el mix eléctrico; ya que, el almacenamiento de la electricidad permite una mejor interacción entre el consumidor y el generador.

Además, la introducción de elementos de almacenamiento, posibilita la acumulación de energía durante el tiempo en que la producción excede al consumo. Esto permite un incremento de la energía aprovechada, y una mayor facilidad de gestión de la planta.

En una instalación FV, plantearse la idea de implementar un sistema de almacenamiento depende de la potencia de producción y de la configuración de la generación (aislada o conectada a la red). Es así que, la introducción de baterías en sistemas de media o alta potencia, implica un análisis técnico y económico más profundo, para concluir si es conveniente dicha incorporación.

### 1.1. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el aprovechamiento de la energía y comparar la rentabilidad de la incorporación de baterías en un sistema fotovoltaico de generación eléctrica.

Se evaluará la cantidad de baterías óptima a instalar, mediante la nivelación o equilibrio entre las curvas de generación y de consumo (parte técnica) y mediante el cálculo de la rentabilidad (parte económica).

---

<sup>1</sup> Fotovoltaico/a/os/as

## 1.2. Alcance

El trabajo en primer lugar describe en términos generales, un sistema de generación eléctrica a partir de un sistema de paneles fotovoltaicos de una potencia de 1,4 MWp<sup>2</sup>, hasta el punto de conexión a la red, esto implica: convertidor CC/CA<sup>3</sup> y transformador. Luego, se calcula el dimensionamiento de la batería para el almacenamiento de la energía que se puede aprovechar. Finalmente se evalúa la eficiencia y la rentabilidad económica de la incorporación de dicha batería, con el método del periodo de retorno.

## 1.3. Antecedentes

Aun cuando la energía solar fotovoltaica representa el uno por ciento del total de la capacidad eléctrica del mundo, el porcentaje que constituye dentro del mix energético de cada país es mucho mayor; principalmente en países donde se ha favorecido la inversión en energías renovables.

Esto demuestra que el crecimiento de esta energía renovable puede potenciarse dependiendo de los objetivos y políticas que se propongan los países, en favor de la alternabilidad energética.

En los últimos años los costos de inversión para la instalación de sistemas fotovoltaicos se han reducido, lo que ha facilitado el desarrollo de esta fuente de energía. Hasta 2014, se estima que la generación de energía eléctrica a partir de instalaciones fotovoltaicas tenía una capacidad superior a 150 GW en todo el mundo. [1]

En el año 2015 se instalaron 51 GW de potencia fotovoltaica, con respecto al 2014 con 40 GW. China y Japón con 15 GW y 10 GW respectivamente, han colocado a Asia como la región con más sistemas fotovoltaicos instalados el 2015. Por su parte, Estados Unidos instaló 9,8 GW en 2015 y creció un 56% con respecto a 2014. También Europa con 8,5 GW continúa invirtiendo en la energía fotovoltaica, principalmente en el mercado británico con 4 GW instalados y 1,4 GW en Alemania. [2]

Los países mencionados tienen un compromiso muy serio para incrementar la capacidad de generación fotovoltaica, por lo cual, gracias al apoyo brindado por sus políticas económicas, han obtenido una cantidad significativa de inversiones; y por medio de economías de escala, han impulsado la disminución de costes.

Del total de la potencia instalada, la mayoría de centrales solares se encuentra conectada a una red eléctrica; es decir, comparten la energía que será enviada a los consumidores, con otros generadores. Este tipo de centrales no disponen de sistemas de almacenamiento.

Por otro lado, si las centrales se encuentran aisladas de la red, necesitan almacenar la energía para ser capaces de enviarla en las horas de ausencia solar. A continuación se explican ambas instalaciones.

---

<sup>2</sup> Mega vatios pico

<sup>3</sup> Corriente continua/corriente alterna

### 1.3.1. Instalación fotovoltaica conectada a la red

Las centrales fotovoltaicas conectadas a la red poseen la estructura mostrada en la Figura 1.1



**Figura 1.1.** Diagrama de bloques central fotovoltaica conectada a la red

En las instalaciones solares conectadas a la red, la energía producida es vertida el mismo instante que se genera. De acuerdo con el diagrama de bloques estas instalaciones constan principalmente de:

- a) Paneles solares fotovoltaicos: Son los encargados de captar los fotones para crear una corriente eléctrica continua. Los paneles se conectan en serie formando varias cadenas, que a su vez forman el campo FV. Además, poseen una estructura soporte, que es la encargada de asegurar el anclaje del generador, facilitando la instalación y mantenimiento de los paneles. Con los soportes se podrá la orientar correctamente el panel; de modo que se seleccione el ángulo de inclinación idóneo para un mejor aprovechamiento de la radiación solar.
- b) Inversores: Tiene la misión de transformar la corriente continua del grupo fotovoltaico en corriente alterna perfectamente sincronizada con la red existente, ya sea trifásica, monofásica o bien de alta, media o baja tensión.
- c) Transformador: Es el dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.

También se necesita de las protecciones adecuadas:

- d) Armario general de protección y medida: debe contener, interruptores magneto-térmicos, diferenciales, contadores de energía, fusibles y seccionadores.

Para realizar el control lógico de la planta se tiene:

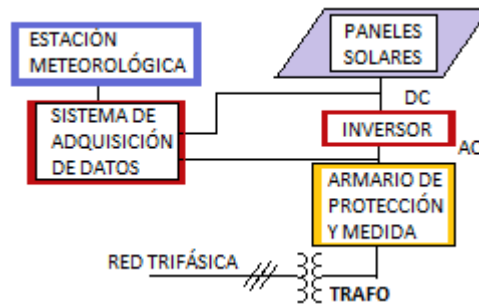
- e) Un sistema de control SCADA<sup>4</sup>: Encargado de monitorear y controlar los diferentes parámetros de la central, tanto de los paneles solares, contadores (sistema más utilizado en centrales FV de gran potencia).
- f) La estación meteorológica: Es de mucha importancia para recopilar información que servirá para calcular estadísticas de la radiación solar.

---

<sup>4</sup> Supervisory Control And Data Acquisition



La Figura 1.2 muestra un esquema de la central solar.

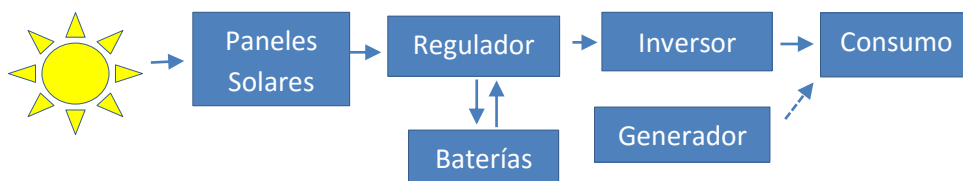


**Figura 1.2.** Esquema de una central fotovoltaica conectada a la red

Hasta aquí no se ha hablado de un sistema de almacenamiento, pues en este tipo de centrales fotovoltaicas, se considera que la energía siempre se entregará a la red. Sin embargo, en las centrales aisladas de la red principal, el mencionado almacenamiento será necesario.

### 1.3.2. Instalación fotovoltaica aislada

Los sistemas FV aislados, dependen de la energía obtenida de los paneles y de las baterías. Además, para evitar que por cualquier eventualidad el sistema se quede sin energía, se suele complementar estos sistemas con generadores. La Figura 1.3 muestra el diagrama de bloques de un sistema FV aislado.

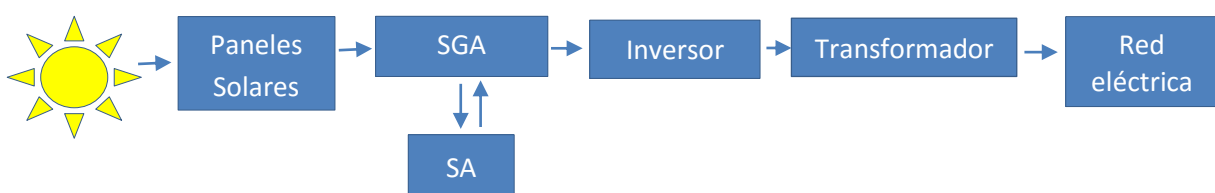


**Figura 1.3.** Instalación fotovoltaica aislada

Usualmente estos sistemas son de baja potencia y se utilizan para cubrir el consumo doméstico de energía. No entregan su energía a la red eléctrica, se dedican exclusivamente al autoconsumo. Al colocar el sistema de baterías, es necesario conectar junto con este un regulador, que controle la energía que entra o sale de dichas baterías para no provocar daños en las mismas.

### 1.3.3. Instalación fotovoltaica conectada a la red con sistema de almacenamiento

Este tipo de sistema es el que se plantea en el presente trabajo. Usualmente los sistemas FV conectados a la red no utilizan almacenamiento, pero existe la posibilidad de incorporar dicho almacenamiento, si se demuestran las ventajas del mismo a gran escala. El diagrama de bloques de la Figura 1.3 indica los elementos de la instalación FV mencionada.

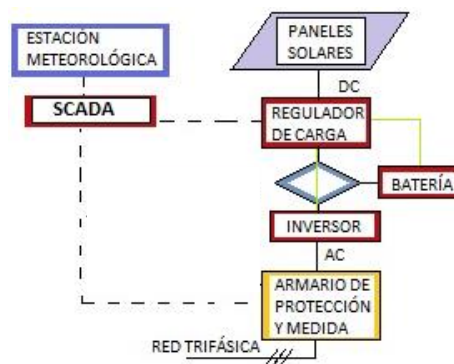


**Figura 1.4.** Diagrama de bloques central fotovoltaica con batería y generador

Los elementos que se añaden son:

- a) Sistema de almacenamiento (SA): son acumuladores de energía que permiten disponer de la potencia necesaria por la carga cuando esta la requiera, (no necesariamente en el instante de la generación). El coste y la vida útil son parámetros que se toman en cuenta al seleccionar el tipo de sistema, esto dependerá del material de construcción y del desarrollo de la tecnología.
- b) Sistema de gestión de almacenamiento (SGA): Está encargado de gestionar la energía del SA, de modo que la vida útil de dicho SA sea la máxima.

La Figura 1.4 muestra el esquema del funcionamiento de una central fotovoltaica con un sistema de almacenamiento basado en baterías.



**Figura 1.5.** Esquema de una central fotovoltaica con almacenamiento

El SCADA estará encargado de la medición, control y comunicaciones que necesita la planta. Asimismo puede encargarse de la forma de cargar y descargar a la batería, mediante algoritmos que nivelen la curva de generación de energía eléctrica. Adaptando la generación de energía de acuerdo a la demanda.

Sin duda tener un respaldo de alimentación es mejor que depender de las condiciones atmosféricas pero se debe tomar en cuenta el costo del sistema de almacenamiento y las ventajas técnicas que ofrece para realizar la inversión. Para esto, el siguiente capítulo resume el estado del arte de los principales elementos de los sistemas FV.

## 2. Características de los principales elementos de una central

A continuación se revisa las principales características; y un poco del estado del arte de los elementos principales de una central FV.

### 2.1. Panel solar FV

Un panel FV está compuesto por celdas o células de material semiconductor que si bien en sus inicios, su fabricación se basaba en unos cuantos materiales como el silicio cristalino o el arseniuro de galio, hoy en día utiliza muchos más materiales para su fabricación.

De acuerdo al tipo de material que están formadas las celdas se tiene:

- a) *Celdas de silicio monocristalino*: Este tipo de celda tienen alta pureza ya que se fabrican de secciones de un único cristal de silicio de forma cilíndrica y se derrocha una gran cantidad. La eficiencia en estos paneles está por encima del 15% y en algunas marcas supera el 21%. La vida útil de estos paneles es larga. [3]
- b) *Celdas de silicio policristalino*: Su proceso de fabricación es más simple, lo que redundaría en menor precio. Se pierde mucho menos silicio en el proceso que en el monocristalino. Su eficiencia se sitúa típicamente entre el 13-16%, debido a que no tienen un silicio tan puro como los monocristalinos. [3]
- c) *Celdas de película delgada o capa fina*: Consiste en microestructuras de CIGS (Cobre, Indio, Galio, Selenio) alojada en una superficie flexible con menor consumo de materia prima y resultados de producción de mayor eficiencia. Dependiendo del tipo, un módulo de capa fina presenta una eficiencia del 7-13%. Tienden a degradarse más rápido. [3]
- d) *Celdas plásticas*: Basadas en polímeros que dan como resultado un tipo de celda flexible. Su eficiencia es menor que los materiales duros. [4]
- e) *Celdas esféricas*: consiste en una matriz de pequeñas células solares esféricas capaces de absorber la radiación solar con cualquier ángulo, pudiendo aprovechar tanto la radiación reflejada como la difusa, se llega a superar el 20% de la eficiencia de una celda convencional. [5]

Se han desarrollado instrumentos de mercado para apoyar el avance de la tecnología solar. Con mejores precios, la tecnología solar ha ingresado en el mercado de la generación eléctrica. Los mayores productores de paneles FV se encuentran en los países indicados en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Mayores productores de paneles solares en el mundo, año 2015 [6]

	<b>Empresa</b>	<b>País de origen</b>
1	Trina Solar	China
2	Canadian Solar	Canadá
3	JinkoSolar	China
4	JA Solar	China
5	Hanwha Q CELLS	Corea del Sur
6	First Solar	EEUU
7	Yingli Green	China
8	SFCE	China
9	ReneSola	EEUU
10	SunPower Corp	EEUU

Los parámetros más importantes de los paneles FV que se utilizarán en los cálculos son:

- a) Potencia pico ( $W$ ): máxima potencia que puede entregar un panel solar.
- b) Eficiencia: varía de acuerdo al voltaje, la corriente, la temperatura del ambiente, el polvo, entre otros.
- c) Coeficiente de temperatura ( $\%/^{\circ}C$ ): porcentaje de rendimiento que varía de acuerdo a la variación de la temperatura.
- d)  $T_{NOCT}$ : temperatura nominal de operación del módulo.

En la Tabla 2.2, también se puede apreciar las características y precios de los paneles FV a pequeña escala, de algunas casas ensambladoras.

**Tabla 2.2.** Casas ensambladoras de paneles solares [7]

Fabricante	País	Potencia mínima [Wp]	Potencia Máxima [Wp]	Eficiencia Mínima [%]	Eficiencia Máxima [%]	Precio [€/Wp]
AE SOLAR	Alemania	300	330	15,51	17,06	0,418
Resun Solar	China	280	315	15,23	17,00	0,418
Changzhou GS Energy	China	245	275	15,09	16,94	0,505
Tripple Z	Alemania	255	270	15,5	16,40	0,560
Exiom Solution	España	245	265	14,9	16,10	0,500
Tamesol	España	240	260	14,75	15,98	0,402
Sun Electronics	EE.UU.	240	240	14,31	14,31	0,418

Los precios son orientativos, pues se reducen al aumentar la escala de las instalaciones.

## 2.2. Sistemas de Almacenamiento

El almacenamiento de la energía es un vital instrumento para alcanzar la tarea de alimentar a los consumidores eléctricos de acuerdo a la demanda en el tiempo necesario. Los SA acumularán la energía cuando esté disponible; y la entregarán en el momento más conveniente, alcanzando un sistema más eficiente con mejores beneficios para los generadores y los consumidores.

Se han probado diferentes métodos y materiales para mejorar los SA, de modo que se alcance una mayor capacidad. La Figura 2.1 muestra las tecnologías utilizadas de acuerdo a la potencia, aplicaciones y el tiempo de descarga.



**Figura 2.1.** Sistemas de almacenamiento de acuerdo a su aplicación y potencia [8]

Se observa que cuando las potencias son muy grandes, el tipo de almacenamiento utilizado es el bombeo hidráulico o la batería neumática (CAES<sup>5</sup>); las baterías electroquímicas se utilizan cuando la aplicación es dar un apoyo a la red mediante el desplazamiento de la potencia generada hacia las horas de demanda de la carga. Se indican también los llamados súper-capacitores y las baterías magnéticas (SMES<sup>6</sup>), que por su gran rapidez para cargar y descargar su energía, se usan para mejorar la calidad de la red. [8]

Los sistemas de baterías más utilizados son:

- a) Plomo-ácido (Pb)
- b) Alcalinas: de Níquel- Cadmio (NiCd), Níquel-Zinc (alcalinas), Níquel-Hidruros metálicos (Ni-MH).
- c) Sodio alta temperatura: Sodio-Azufre (NaS), Sodio-Cloruro de níquel (Na-NiCl<sub>2</sub> Zebra).
- d) Litio: Ion Litio, Litio-Polímero.
- e) Flujo Redox: Vanadio (VFR), Zinc-Bromo (Zn-Br).

### 2.2.1. Características de las baterías

Para escoger la batería, se analiza las características técnicas que poseen, como son: profundidad de descarga, ciclado, vida útil, madurez de la tecnología, etc. A continuación se describe las características principales de una batería.

*Rendimiento:* Es la relación entre la energía que se extrae de la batería y la energía que ingresa en la misma. Se debe a las pérdidas en la batería durante la carga y descarga, especialmente por efectos caloríficos.

*Profundidad de descarga:* Es el valor en porcentaje de la energía que se puede sacar de un acumulador plenamente cargado en una descarga. Por ejemplo, si tenemos una batería de 100Ah y la sometemos a una descarga de 20Ah, esto representa una profundidad de descarga del 20%.

*Ciclos de carga/descarga:* Es la cantidad de veces que se puede cargar y descargar una batería en su vida útil. Si la descarga es profunda el número de ciclos se reduce, por tanto su vida útil disminuye.

Para la presente aplicación, la batería debe ser capaz de sostener corrientes moderadas, durante varias horas. Además, debe permanecer activa sin recibir carga alguna (horario nocturno). Debe ser capaz de trabajar sin períodos de reposo, ya que está siendo cargada o descargada a lo largo del día; y también, debe ser de ciclo profundo.

### 2.2.2. Comparación entre baterías electroquímicas

En la Tabla 2.3 se compara las diferentes tecnologías de almacenamiento electroquímico según el número de ciclos y el coste de inversión.

---

<sup>5</sup> Compressed Air Energy Storage

<sup>6</sup> Superconducting Magnetic Energy Storage

**Tabla 2.3.** Vida útil y costos de algunas baterías [9]

Tecnología	Numero de ciclos	Costes de inversión €/kWh
Plomo ácido	>3000	150-1000
Ni-MH	6000-8000	250-1000
Li ion/Energy version	>5000	200
VFR	>30000	<120

En una aplicación práctica es indispensable escoger una tecnología madura pues la recuperación de la inversión dependerá del correcto trabajo del sistema. Por esto, es necesario analizar el estado de desarrollo de las baterías en el mercado sin descuidar sus precios. La Tabla 2.4 muestra un resumen de las baterías solares con sus aplicaciones y características.

**Tabla 2.4.** Tecnologías de almacenamiento a escala de red eléctrica y aplicaciones [8]

Baterías	Aplicaciones	Características	Oportunidades de mejora
Plomo-ácido Avanzada	Nivelación y regulación de la carga, reserva rodante, estabilización de la red, red aislada	Tecnología madura, aún sigue fuerte luego de más de 150 años en el mercado, bajo costo, buena duración de la batería, alto contenido reciclado	Limitada profundidad de descarga, baja densidad energética, huella de contaminación grande, alta necesidad de mantenimiento, corrosión de los electrodos, vida útil limitada.
Níquel Cadmio	Sistema aislado	Tecnología madura	Costos elevados, densidad de energía baja, usa químicos tóxicos.
Ni-MH <sup>7</sup>	Sistema aislado	Tecnología madura	Auto-descarga elevada, densidad de energía baja.
Sulfuro de Sodio NaS	Calidad de la energía, relevo en congestión, apoyo a la integración de las fuentes renovables	Densidad de energía elevada, ciclos de descarga largos, respuesta rápida, larga duración, buen potencial de escala.	Temperatura de operación requerida entre 250° y 300° C, problemas de contención de líquidos (corrosión y sellos de vidrio frágiles).
Batería NaNiCl	Gran almacenamiento	Tecnología madura	Temperatura de operación requerida entre 250° y 300° C.
Ion litio	Calidad de la energía, frecuencia de regulación, gran almacenamiento	Gran densidad de energía, buen ciclo de vida, alta eficiencia de carga y descarga, buena escalabilidad, aplicaciones versátiles.	Alto costo de producción, extremadamente sensible a sobrecalentamiento sobrecarga, intolerancia a las descargas profundas de larga duración.
Metal líquido Mg-Sb	Destinado para grandes almacenamientos	En desarrollo, disponibilidad de prototipos, no existen instalaciones comerciales aún, elevada densidad de energía.	Voltaje de la celda 0.4 Volts solamente, temperatura de operación elevada, tecnología no probada, escala
Baterías de flujo VFR <sup>8</sup>	Reducción de picos, variabilidad del tiempo, regulable en frecuencia, calidad de la energía, gran almacenamiento	Elevada capacidad de almacenamiento de energía, largo ciclo de vida, baja eficiencia de carga y descarga.	Tecnología en desarrollo, no madura para la escala comercial, diseño complicado, baja densidad de energía.

<sup>7</sup> Metal Hydride: Hidruros metálicos

<sup>8</sup> Vanadium redox flow: Baterías redox de flujo de vanadio

### 2.3. Sistema de gestión de baterías SGB [10]

En una central fotovoltaica, un sistema de gestión o manejo de baterías (SGB), no solo monitorea y controla los parámetros clave durante su carga y descarga (voltaje, corriente, temperatura) para la protección y vigilancia de las baterías; sino que también abarca los procesos para mantener el sistema de almacenamiento listo para suministrar alimentación completa cuando sea necesario, y las técnicas para prolongar su vida útil.

Hay tres objetivos principales en un sistema de gestión de la batería:

- a) Proteger la batería contra daños
- b) Prolongar la vida útil de la batería
- c) Mantener la batería preparada para cumplir con los requisitos funcionales de la demanda.

#### 2.3.1. Funciones del SGB [10]

*Protección de la batería:* Esta función sirve para evitar que la batería salga de las condiciones de tolerancia de funcionamiento. En la práctica, el SGB debe proporcionar la protección completa para cubrir cualquier eventualidad. Si la batería está trabajando fuera de sus límites de diseño especificados, se podrá producir algún fallo.

*Control de carga:* La mayoría de los daños en las baterías se deben a la carga inadecuada.

*Gestión de la demanda:* Se refiere a la aplicación en la que se utiliza la batería. Su objetivo es reducir al mínimo el consumo de corriente de la batería mediante el diseño de técnicas de ahorro de energía y así prolongar el tiempo entre carga y carga de la batería.

*Estado de Carga:* Puede proporcionar al usuario una indicación de la capacidad restante en la batería, o puede ser útil para asegurar el buen manejo del proceso de carga en un circuito de control.

*Estado de funcionamiento:* Mide la capacidad de una batería para obtener en su salida, su energía nominal. Es un indicador para conocer si se necesitan acciones de mantenimiento.

*Equilibrio de carga (baterías multi-celda):* Esta función es útil cuando se producen pequeñas diferencias de tensión entre las celdas, debido a tolerancias de producción o las condiciones de operación. Estas tensiones tienden a magnificarse con cada ciclo de carga/descarga. El equilibrio de las celdas mediante la nivelación de la carga en toda la serie, extiende la vida útil de la batería.

*Sistemas de comunicación:* La mayoría de los SGB incorporan algún tipo de comunicación entre la batería y el cargador. Algunos tienen enlaces a otros sistemas de interfaz con la batería para su seguimiento. También se necesitan interfaces para permitir al usuario el acceso a la batería, para la modificación de los parámetros de control o para el diagnóstico y prueba.

La vida se puede ampliar mediante el uso de un sistema de carga inteligente que facilite las comunicaciones entre la batería y el cargador. Además, si se conoce la información de la batería, se podrá determinar el perfil de carga óptima.

### 2.3.2. Criterio de selección de SGB en centrales de potencia

Los tipos del SGB son diferentes de acuerdo a los requerimientos de cada planta respecto de sus baterías, por ejemplo: En plantas de estado espera, se mantienen conectadas las baterías, aun cuando se completa la carga (punto flotante); o en plantas de emergencia, las baterías se cargan de período en período, pues trabajan de vez en cuando.

Para el presente proyecto es necesario que el SGB trabaje con frecuencia, al menos con un ciclo de carga/descarga por día. La función necesaria para cumplir el cometido es conocer el estado de carga de las baterías para poder utilizarlas. Para esto, el SGB debe tener las funciones *estado de funcionamiento* y *estado de carga*.

También es necesario un *sistema de control automático*, donde la batería suministre información acerca de su condición actual de carga, al SGB. Este comparará dicha condición con la deseada y genera una señal que se usará para realizar las acciones de control necesarias, de modo que el sistema regrese al punto de carga deseado.

### 2.4. Sistema de conversión de potencia

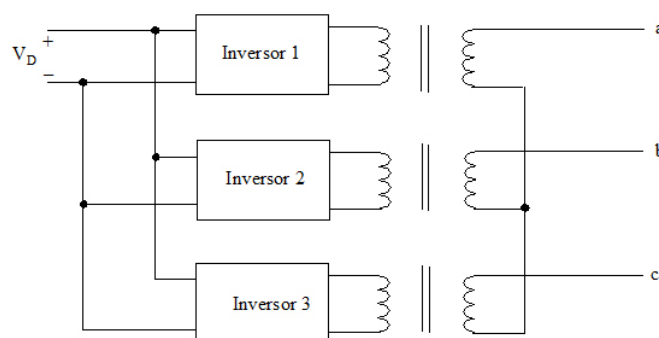
Está formado por inversores de corriente, también conocidos como convertidores DC/AC u onduladores; que son los encargados de convertir la corriente alterna en corriente continua. Esto debido a que los paneles FV generan corriente continua y la demanda de energía es en corriente alterna.

Se condiciona la potencia durante la conversión para asegurar que no se produzcan daños en los dispositivos del sistema, que suelen ser principalmente semiconductores (MOSFET o IGBT). Estos tendrán la misión de generar la forma de onda deseada (sinusoidal).

#### 2.4.1. Inversores de onda

Los inversores sinusoidales son la mejor opción para alimentar cargas de corriente alterna, ya que no presentan problemas por distorsión de armónicos o estabilidad de tensión. En los sistemas de generación FV conectados a la red, es necesario convertir la corriente obtenida, en una corriente alterna trifásica para enviar la energía a la red eléctrica.

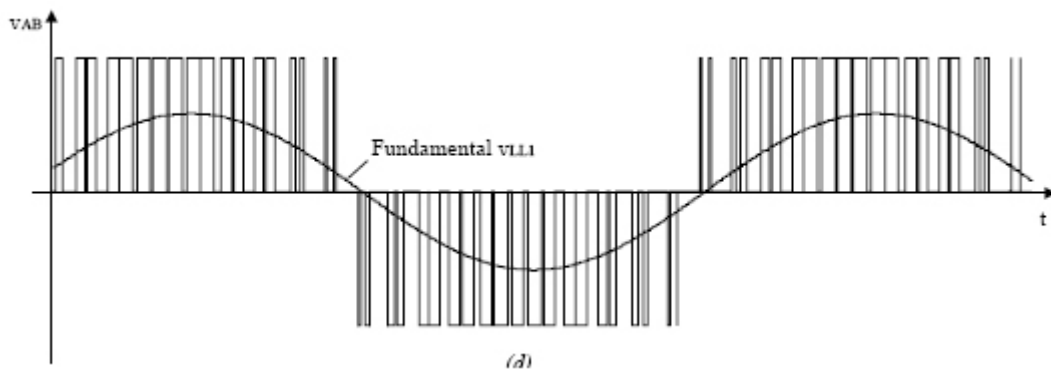
La configuración esquemática de los inversores junto con el transformador trifásico, se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Esquema de la conexión de los inversores y transformadores. V<sub>D</sub>: voltaje directo [11]



Básicamente se obtendrán tres formas de onda desfasadas un ángulo de  $120^\circ$ . La onda característica obtenida tiene la forma indica en la Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Forma de onda a la salida de un inversor [11]

Los inversores solares tienen normalmente períodos de garantía estándar más reducidos en comparación con los módulos FV, y pueden causar alteraciones importantes en los sistemas si sufren alguna falla. Por ende, el inversor jugará un papel fundamental en la rentabilidad global del sistema.

Gracias al desarrollo de la electrónica de potencia, se ha logrado incorporar nuevos tipos de inversores, por ejemplo: inversores en cadena, optimizadores etc. Se han desarrollado productos que utilizan innovaciones tales como: seguimiento del punto de máxima potencia, y protección anti-isla; como forma de incrementar la eficiencia y la seguridad del sistema.

#### 2.4.2. Rendimiento del inversor de onda

El rendimiento del inversor es la relación entre la potencia que se obtenga a la salida, y la potencia de los paneles solares o la batería en la entrada. El rendimiento es función de la potencia y del tipo de carga que alimente el inversor, (resistiva, inductiva o capacitiva); por lo cual el factor de potencia está relacionado. Trabajando a plena carga y condiciones óptimas se puede obtener rendimientos del 90 y 95%. Por esto es necesario dimensionar la potencia pico de generación FV, un valor un poco mayor a la potencia máxima del inversor. Por supuesto, sin sobredimensionar la potencia pico FV para no incurrir en desperdicios.

#### 2.4.1. Fabricantes de inversores encontrados en el mercado

La Tabla 2.5 muestra algunos fabricantes de inversores encontrados en el mercado.

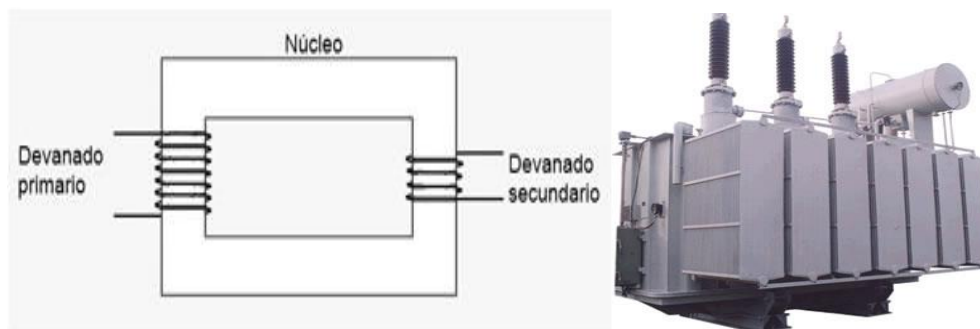
**Tabla 2.5.** Fabricantes de inversores en el mercado mundial

	Empresa	País de origen
1	Siemens	Alemania
2	SMA	Alemania
3	SUNGROW	China
4	JEMA	España
5	REFUSOL	Alemania

## 2.5. Transformador

Un transformador es una máquina estática de corriente alterna, que permite variar la corriente o el voltaje, manteniendo la frecuencia y la potencia. Mediante el devanado de entrada, transforma en magnetismo la energía que ingresa; para volver a transformarla en electricidad, en las condiciones deseadas en el devanado secundario (Figura 2.4, izquierda).

El transformador, al igual que otros elementos, hará que la energía sufra de pérdidas, por esto es necesario considerarlo al calcular los rendimientos de generación energética. La Figura 2.4 muestra un transformador sencillo donde se puede observar los devanados o bobinados que posee (izquierda) y un transformador trifásico real (derecha).



**Figura 2.4.** Izquierda esquema básico de un transformador, Derecha transformador trifásico [12]

La importancia del transformador se debe a que, es el encargado de convertir el valor de la tensión del generador en el valor de la tensión de la red donde se entrega la energía producida, por lo que es un punto crítico al ser por donde sale toda la energía eléctrica.

### 2.5.1. Rendimiento del transformador

Los transformadores poseen rendimientos muy elevados y requieren de muy poco mantenimiento. También, mientras más se acerque su trabajo a la potencia nominal son más eficientes. Las pérdidas más conocidas en un transformador son:

- a) Las pérdidas en el hierro o magnéticas.
- b) Las pérdidas en el cobre u óhmicas.

Dentro de las pérdidas en el hierro se encontrarán las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas como los valores más importantes.

### 3. Descripción del caso de estudio

El sistema será evaluado con diferentes potencias de almacenamiento para conocer la viabilidad en cada caso. Se plantea un sistema fotovoltaico de 1,4 MW de potencia nominal, con almacenamiento y conectado a la red. Con esta potencia, se dimensiona los componentes principales para realizar el análisis del presente trabajo.

#### 3.1. Ubicación

Se escoge la localización de la planta fotovoltaica en la ciudad de Barcelona, España. La ciudad se encuentra situada a nivel del mar y es privilegiada por la irradiación solar que posee.

#### 3.2. Características de los paneles solares

Se utiliza las características de los paneles solares Sun Power debido a su eficiencia. La Tabla 3.1 muestra las características principales del módulo. Se coloca como anexo las hojas del fabricante.

**Tabla 3.1.** Características del panel solar

Modelo	Potencia	Dimensión	K <sub>PT</sub>	NOCT	Eficiencia
Sun Power	W	m <sup>2</sup>	%/°C	°C	%
SPR-435NE-WHT-D	435 @STC, 323 @NOCT	2,16	- 0,38	45	20,1

#### 3.3. Características de las baterías

Los sistemas de almacenamiento que utilizan ion-litio poseen un ciclado mayor a cinco mil veces y su tecnología es madura de acuerdo a lo mencionado en el apartado 2.2.2.

Como ejemplo, la Tabla 3.2 indica las características del sistema de almacenamiento encontrado en el mercado A123 Systems Grid Solutions basado en baterías de nano fosfato de ion-litio.

**Tabla 3.2.** Características del sistema de almacenamiento [13]

Especificaciones por unidad		
Voltaje AC	480	trifásico [V]
Voltaje DC	960	[V]
Potencia	2	[MW]
Energía	500	[kWh]
Eficiencia	90	%
Temp. Operación	-30	a +60 °C
Temp. Almacen	-30	a +60 °C
Tiempo de recarga	15	Minutos

El sistema posee reserva rodante, lo que significa que en cuestión de milisegundos es capaz de proporcionar de forma automática megavatios de potencia para un máximo de 15 minutos, o un período más largo de tiempo, dependiendo de la configuración del sistema. Esto permite a las plantas de energía operar con la máxima eficiencia y capacidad.

Para el análisis se eligen cuatro capacidades de energía de acuerdo a las características del sistema de almacenamiento. Se toma en cuenta las características del acumulador del análisis del presente trabajo. La Tabla 3.3 describe las capacidades que se toman en cuenta para las hipótesis del problema.

**Tabla 3.3.** Características de las baterías del sistema de almacenamiento

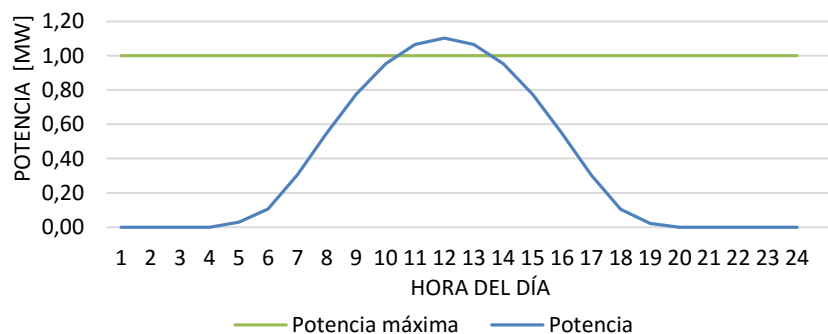
<b>Rendimiento</b>	<b>90%</b>
<b>Profundidad de descarga</b>	<b>80%</b>
<b>Capacidad [MWh]</b>	
Nominal	Real
0,25	0,2
0,5	0,4
1	0,8
2	1,6

### 3.4. Características de los inversores

Se supone para los cálculos, una potencia máxima de 1MW en los inversores. Este valor es un poco más del 70% de la potencia en los paneles solares (1,4 MWp).

Los inversores tienen un rendimiento aproximado del 97%. Esto equivale a unas pérdidas aproximadas del 3% en los inversores, que se tomarán en cuenta para el cálculo final. Los inversores deben operar con una tensión de salida compatible con el sistema de baterías, cuando esto no ocurre, se producen también las pérdidas por acoplamiento de impedancias.

Para analizar el funcionamiento de las baterías, cuando el sistema tiene pérdidas de energía, se toma el valor de 1MW arbitrariamente en los inversores. Conociendo la potencia de los paneles (1,4MW) se debería dimensionar los inversores a 1,2 MW, ya que la productividad de un sistema fotovoltaico está alrededor del 80%. Sin embargo se dimensiona a 1MW para obtener aproximadamente un 10 a 20% en pérdidas. En la Figura 3.1 se observa un ejemplo de cómo se cortan las curvas de potencia de producción de los paneles, con la de potencia máxima limitada por los inversores.



**Figura 3.1.** Potencia de un sistema fotovoltaico en función de la hora del día

Entonces, los inversores no permitirán el ingreso de potencias mayores a 1MW hacia el transformador.

### 3.5. Potencia contratada

El valor de la potencia contratada en la central fotovoltaica debe ser menor a la potencia obtenida en la entrada del transformador, debido a las pérdidas en el mismo. Este dato es de suma importancia, pues de acuerdo a la potencia contratada se obtendrán ganancias o pérdidas económicas. También se deben tomar en cuenta las pérdidas de balance del sistema (BOS).

### 3.6. Método de cálculo

El modelo de cálculo, no considera la potencia instantánea que se puede generar en el sistema, ya que los datos que se poseen son discretos con un tiempo de muestreo de 15 minutos. Sin embargo, al calcular la energía generada por hora, se puede calcular la potencia media de dicha energía.

Con esto se relaciona la potencia media por hora del sistema con la máxima permitida en los inversores. Se toma como referencia el valor de 1MW como potencia máxima en el programa de cálculo.

También se consideran la temperatura y la radiación solar de acuerdo a la hora del día y a la época del año, gracias a los datos disponibles.

Para observar la variación climática que se tiene en el año, se indica la Tabla 3.4 La información se adquiere de la base de datos del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica de la Comisión Europea (PVGIS); y, de acuerdo a la localización indicada y la inclinación óptima (37°), se determinan las principales medidas de radiación (H) y temperatura promedio ( $T_d$ ) para cada mes del año.

**Tabla 3.4.** Información estadística utilizada [14]

Mes	$T_d$ °C	H plano óptimo FV kWh/m <sup>2</sup> /día
Ene	10,7	3,9
Feb	10,9	4,9
Mar	12,6	6,0
Abr	14,6	6,0
May	17,4	6,5
Jun	21,4	6,7
Jul	23,9	6,9
Ago	24,8	6,6
Sep	22,2	5,9
Oct	19,4	5,1
Nov	14,8	4,0
Dic	11,7	3,7
Prom	17,0	5,5

Ahora bien, para alcanzar el objetivo de evaluar el sistema de almacenamiento se debe encontrar un modelo de producción diaria hora a hora, pues se analizará la eficiencia de aumentar las horas equivalentes de la curva de producción diaria. A continuación se explica los parámetros del sistema utilizados para alcanzar lo propuesto.

### 3.6.1. Parámetros del sistema [15]

*Productividad de radiación (radiation yield,  $Y_r$ ):* Se calcula la productividad de radiación, también conocida como productividad de referencia, como el cociente de irradiación solar incidente en los paneles en un intervalo de tiempo y la irradiancia de referencia en condiciones estándar ( $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ).

$$Y_r = \frac{H_{\text{opt}}}{G_0} \quad (1)$$

*Productividad de los módulos fotovoltaicos ( $Y_m$ ):* Está definida como el cociente de la energía útil generada por el módulo o arreglo de módulos ( $E_m$ ), por unidad de potencia nominal instalada en condiciones estándar (STC). La ecuación (2) indica la relación.

$$Y_m = \frac{E_m}{P_0} \quad (2)$$

La energía generada en los módulos sufrirá de pérdidas debido a varios factores climáticos del día, por lo cual se definen parámetros de corrección para obtener una medida más exacta.

*Rendimiento (Performance Ratio, PR):* Es la relación entre la energía generada y la teóricamente disponible. También se puede encontrar como el cociente de las productividades del módulo y de la radiación. La ecuación (3) indica el rendimiento para los módulos fotovoltaicos.

$$PR_m = \frac{Y_m}{Y_r} \quad (3)$$

*Productividad de la planta fotovoltaica ( $Y_F$ ):* Se define como la energía útil generada por el sistema por unidad de potencia nominal instalada en condiciones estándar (STC). Al calcular esta relación se considera todos los elementos de la planta. La ecuación (4) indica la relación.

$$Y_F = \frac{E}{P_0} \quad (4)$$

*Rendimiento de la planta ( $PR_f$ ):* Se define como el cociente de las productividades de la planta y de la radiación. La ecuación (5) indica el rendimiento para la planta.

$$PR_F = \frac{Y_F}{Y_r} \quad (5)$$

### 3.6.2. Análisis de pérdidas

Para calcular de una forma más exacta la generación de la energía, se debe considerar las pérdidas que se producen en los elementos del sistema. También es necesario considerar las variables del ambiente en temperatura y radiación. La Tabla 3.5 muestra los rendimientos de acuerdo a los elementos del sistema y las condiciones climáticas.

**Tabla 3.5.** Porcentaje de pérdidas de energía del sistema y del módulo. [15] [16]

Balance del sistema (BOS)	%
Polvo	2
acoplamiento de impedancia	0,4
óhmicas CC	1
Inversor	3
Óhmicas CA	0,1
Transformador	2,5
<b>PR<sub>BOS</sub></b>	<b>91</b>

Módulo	%
Nivel espectral e irradiancia	1
<b>PR<sub>0</sub></b>	<b>99</b>

Se puede observar que existen pérdidas en el módulo y en el sistema en conjunto. El rendimiento del módulo PR<sub>0</sub>, considera las pérdidas por nivel espectral e irradiancia, se aproxima un 1% en pérdidas.

El rendimiento del sistema PR<sub>BOS</sub>, considera las pérdidas por ensuciamiento con polvo, las pérdidas eléctricas: óhmicas en DC, en el inversor, óhmicas en AC y en el transformador. Se aproxima un total de 9% en pérdidas en el sistema.

Se utiliza un modelo de corrección simple, con la ecuación (6), para considerar los efectos de la temperatura ambiente en los módulos.

$$PR_m = PR_0 [1 + K_{PT}(T_A - 25 + T_{NOCT} - 20)] \quad (6)$$

El coeficiente de temperatura K<sub>PT</sub> está indicado en los datos de los módulos fotovoltaicos, T<sub>A</sub> es la temperatura a la que se encuentra el módulo; y, T<sub>NOCT</sub> es la temperatura nominal de operación del módulo.

### 3.6.3. Procedimiento

Se utiliza el ángulo óptimo de inclinación de los paneles (37 °) en las coordenadas de ubicación seleccionadas para el sistema, para obtener las irradiancias probables (G) proporcionadas por la base de datos. La información tiene un periodo de muestreo de 15 minutos. Con estos valores se procede a calcular los parámetros característicos del sistema para obtener la producción de energía diaria.

Se calcula la irradiación en el ángulo óptimo (Hopt), multiplicando el intervalo de tiempo por la irradiancia. Se realiza la operación indicada en la ecuación (1) y se obtiene la productividad de radiación por hora (Yr) al sumar cuatro muestras.

Utilizando la ecuación (6) se calcula el rendimiento de los módulos (PRm), que es variable de acuerdo a la temperatura del día (Td). Luego, con la ecuación (3) se obtiene la productividad de los módulos (Ym). Al multiplicar esta productividad por la potencia nominal del arreglo de paneles fotovoltaicos, se conoce la energía generada a la salida de los paneles fotovoltaicos (potencia en corriente continua, P<sub>DC</sub>).

Para calcular el rendimiento global de la planta (PRf), se multiplica el rendimiento del sistema (PR<sub>BOS</sub>) por el rendimiento de los módulos (PRm), para considerar todas las pérdidas en el sistema. Utilizando la ecuación (5) se calcula la productividad de la planta (Yf), la cual al multiplicarla por la potencia nominal del arreglo de paneles fotovoltaicos da como resultado la Energía generada en barras de central.

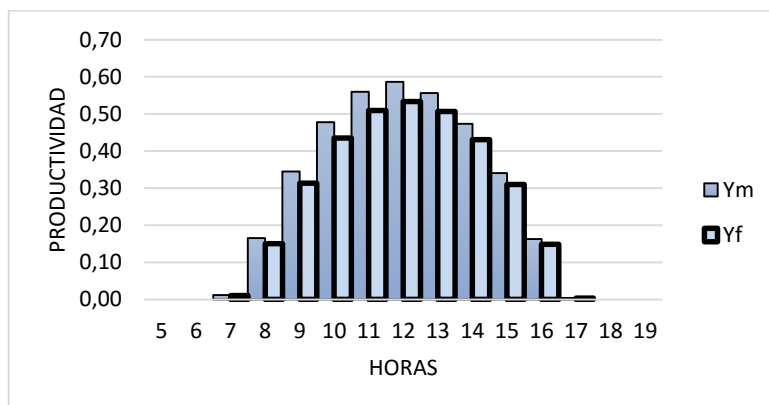
### 3.6.4. Cálculos justificativos

La Tabla 3.6 muestra un ejemplo del procedimiento.

**Tabla 3.6.** Ejemplo de cálculo de la productividad para una hora

Enero	G	T <sub>d</sub>	Irradiación	Y <sub>r</sub>	PR <sub>m</sub>	Y <sub>m</sub>	PR <sub>f</sub>	Y <sub>f</sub>
Hora	W/m <sup>2</sup>	°C	(Wh/m <sup>2</sup> )	Horas		horas		Horas
11:52	618	11,6	154,5	0,155	0,946	0,146	0,861	0,133
12:07	622	11,7	155,5	0,156	0,946	0,147	0,861	0,134
12:22	622	11,9	155,5	0,156	0,945	0,147	0,860	0,134
12:37	618	12	154,5	0,155	0,945	0,146	0,860	0,133
Resultados/Hora			620	0,620	-	0,586	-	0,534
<b>Energía generada (P<sub>n</sub>*Y) [MWh]</b>						<b>0,88</b>	-	<b>0,80</b>

Efectuando los cálculos con todas las muestras del día se puede observar el comportamiento de la productividad en los módulos y en la planta. La Figura 3.2 muestra los valores obtenidos para un día típico del mes de enero. Se observa, de acuerdo a la hora del día, una variación de la productividad; además se puede apreciar cómo influyen las pérdidas del sistema en la productividad final.



**Figura 3.2.** Productividades de un día típico del mes de enero por horas



Al multiplicar cada valor por la potencia nominal se puede conocer la energía producida en los módulos y por ende en el total de la planta.

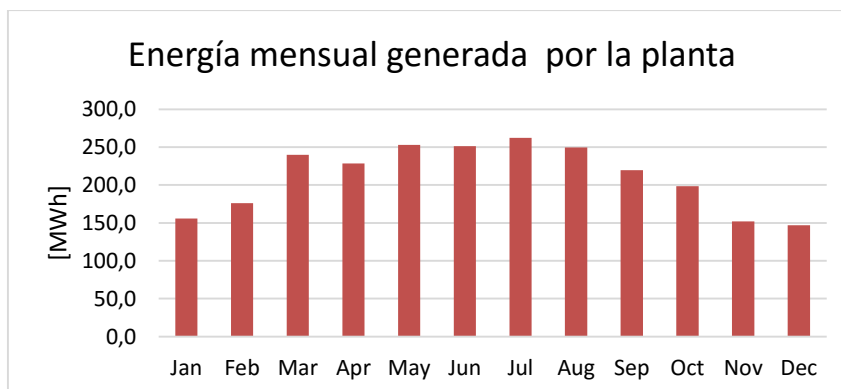
### 3.6.5. Energía generada

Con los valores de productividad y rendimiento se puede calcular la producción de energía mensual y anual del sistema para la potencia nominal instalada de los paneles (1,4 MWp). La Tabla 3.7 indica los resultados calculados para cada mes del año.

**Tabla 3.7.** Cálculo de la energía generada en el año, sin limitación de potencias

Mes	Yf h	Energía kWh
Enero	103,95	145,49
Febrero	117,27	163,93
Marzo	159,81	223,40
Abril	152,14	212,69
Mayo	168,49	235,38
Junio	167,35	233,90
Julio	174,69	244,28
Agosto	166,45	232,63
Septiembre	146,25	204,57
Octubre	132,19	184,75
Noviembre	101,26	141,74
Diciembre	97,94	136,75
anual	1687,8	2359,51

En la Figura 9 se puede observar los flujos de energía diarios correspondientes a cada mes del año tipo. Se observa los meses de más baja producción son: enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre. Además, se puede ver que la producción es máxima en el mes de julio.



**Figura 3.3.** Producción mensual

En los valores de la Tabla 3.7, no se toma en cuenta la energía perdida, debido a la limitación de la potencia en los inversores. Este análisis se hará en el punto 4.

### 3.6.6. Precio de la Energía [17]

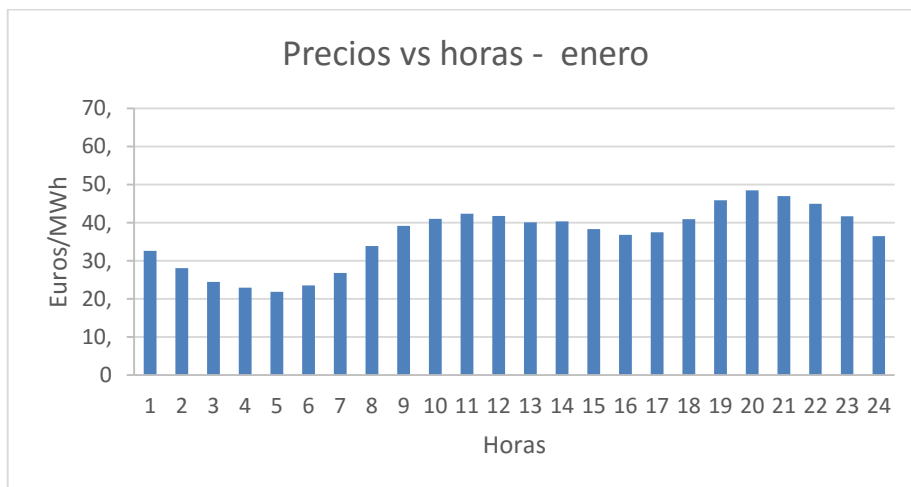
Para realizar el análisis de rentabilidad, es necesario establecer un precio a la energía de acuerdo a la ubicación donde se han tomado los datos. En el mercado Europeo se sigue un modelo marginalista, mediante el cual el precio y la cantidad de energía se determinan en el cruce de las curvas de oferta y demanda.

Este proceso se realiza diariamente a las 12:00 horas, para las veinticuatro horas del día siguiente, con lo cual se obtienen los precios de la electricidad en lo que se conoce como Mercado Diario.

Los valores de los precios de la electricidad serán bastante variables dentro de un año y estos dependen de factores políticos, sociales y económicos. Por esto, en el presente análisis se han tomado como referencia los datos de los últimos años encontrados en la base de datos del OMIE (Operador de Mercado Ibérico de Energía), con el fin de omitir demasiadas varianzas innecesarias para el estudio que se desea realizar.

Se obtiene los precios diarios hora a hora de la electricidad, mediante una media aritmética entre todos los días pertenecientes al mes respectivo.

La Figura 10 muestra como ejemplo la media obtenida para el mes de enero, donde se puede observar la variación hora a hora del precio de la energía.



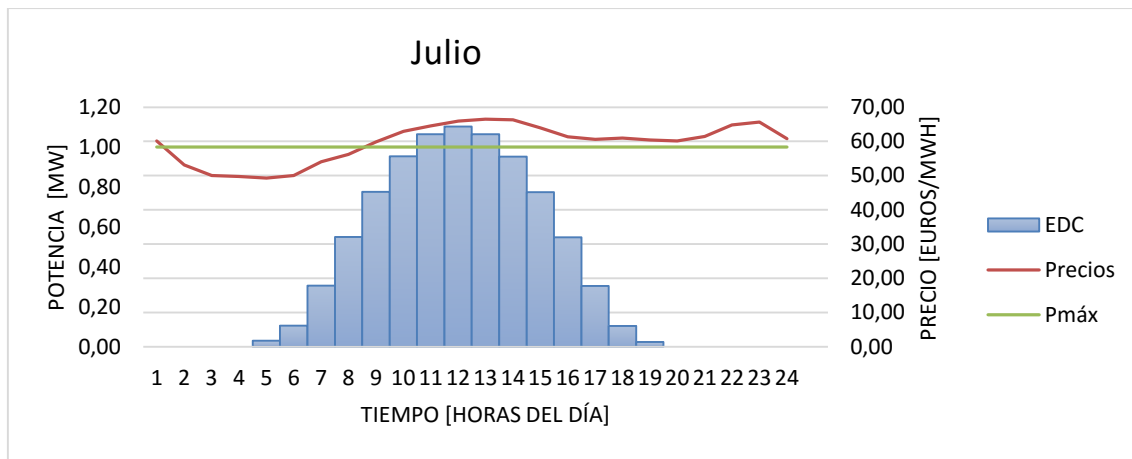
**Figura 3.4.** Precio por hora promedio de la energía perteneciente al mes de enero

Con esta información se puede realizar el análisis de rentabilidad de incorporar baterías al sistema fotovoltaico.

## 4. Evaluación de la producción de energía

Se procede a calcular la producción de energía de acuerdo a lo indicado en el procedimiento punto 3.6.3, donde se obtiene la productividad ( $Y_f$ ). Multiplicando  $Y_f$  por la potencia de los paneles fotovoltaicos, se obtiene la energía generada ( $E_g$ ).

Para observar el comportamiento simultáneo de la energía y los precios por hora del día se grafica la Figura 4.1. El área bajo la curva de potencia, es la energía generada (MWh).



**Figura 4.1.** Producción de energía en los paneles ( $E_{DC}^9$ ), precios de la energía y potencia máxima ( $P_{max}$ )

Se observa como la potencia a la salida de los paneles, supera la potencia máxima, en las horas del mediodía. En estas horas, la energía se desperdicia, cuando no se dispone de un sistema de almacenamiento. Por esto se supondrá un sistema de almacenamiento a continuación.

#### 4.1. Modelos de almacenamiento

Para simular el sistema de almacenamiento se han probado dos modelos:

- a) *Modelo solo pérdidas:* El sistema solo almacena los picos de energía.
- b) *Modelo pérdidas/traslado:* El sistema almacena también la energía cuando los precios son bajos.

De acuerdo a la hora que se descargan las baterías se pueden obtener dos modelos más:

- a.1) *Modelo horas finales/energía constante:* La energía se descarga de forma constante en las horas finales del día, para emular un sistema más real. Ya que, en el escenario del mercado, debe existir una seguridad de suministro; esto se puede traducir en una obligación de enviar la energía almacenada inmediatamente después de que los paneles dejen de generar.
- a.2) *Modelo hora más rentable:* La energía se descarga en la hora más rentable, si se considera que no se tiene ningún impedimento de enviar la energía almacenada a cualquier hora del día.

Se generó un programa de simulación donde se cambian los algoritmos de acuerdo al modelo deseado y combinarlos, a fin de probar todas las variables.

#### 4.2. Tratamiento de datos

Se debe considerar las pérdidas por almacenar la energía para realizar los cálculos. La Tabla 4.1 muestra un ejemplo de la información calculada necesaria para realizar el algoritmo de almacenamiento del *Modelo hora más rentable*.

<sup>9</sup> Energía en corriente continua (salida de los paneles solares).

**Tabla 4.1.** Resultados por hora de las energía calculada y algoritmo de almacenamiento

hora	Julio			Panel	Energía en la batería		Sin Batería		Con Batería	
	E <sub>AC</sub> *	Precio	Renta	E <sub>DC</sub>	Entra	Sale	E <sub>AC</sub>		E <sub>AC</sub> +	
	MWh	€/MWh	€	MWh	MWh	MWh	MWh	€	MWh	€
1	0,00	60,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	53,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	50,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	49,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,03	49,32	1,33	0,03	0,00	0,00	0,03	1,33	0,03	1,33
6	0,10	49,99	4,79	0,11	0,00	0,00	0,10	4,79	0,10	4,79
7	0,28	54,09	15,06	0,31	0,00	0,00	0,28	15,06	0,28	15,06
8	0,50	56,17	28,14	0,55	0,00	0,00	0,50	28,14	0,50	28,14
9	0,71	59,87	42,28	0,78	0,00	0,00	0,71	42,28	0,71	42,28
10	0,87	62,95	54,60	0,95	0,00	0,00	0,87	54,60	0,87	54,60
11	0,97	64,56	62,55	1,06	0,06	0,00	0,91	58,10	0,91	58,10
12	1,00	65,97	66,22	1,10	0,10	0,00	0,91	59,37	0,91	59,37
13	0,97	66,47	64,39	1,06	0,06	0,00	0,91	59,82	0,91	59,82
14	0,87	66,35	57,49	0,95	0,00	0,00	0,87	57,49	0,87	57,49
15	0,70	63,96	45,07	0,77	0,00	0,00	0,70	45,07	0,70	45,07
16	0,50	61,34	30,60	0,55	0,00	0,00	0,50	30,60	0,50	30,60
17	0,28	60,65	16,79	0,30	0,00	0,00	0,28	16,79	0,28	16,79
18	0,10	61,01	5,80	0,10	0,00	0,00	0,10	5,80	0,10	5,80
19	0,02	60,42	1,26	0,02	0,00	0,00	0,02	1,26	0,02	1,26
20	0,00	60,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	61,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	64,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	65,69	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,16	11,82
24	0,00	60,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7,88	65,7	496,4		0,20		7,67	482,5	7,83	493,2

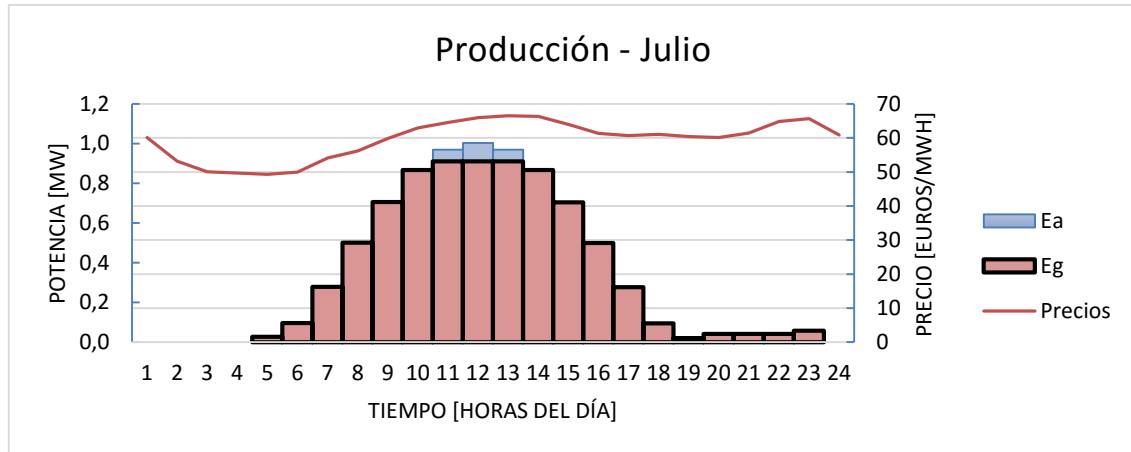
Para el mes de julio, en la Tabla 4.1 se observan los siguientes datos por hora, de izquierda a derecha:

- La energía que se entrega a la red si no existiera limitación debido a los inversores (E<sub>AC</sub>\*).
- Los precios medios de la energía, resaltando los mayores.
- Los ingresos que se obtendrían para el caso E<sub>AC</sub>\*.
- La energía que sale de los paneles solares (E<sub>DC</sub>).
- La energía que ingresa en las baterías, cuando se excede el límite (1MW). Al final de la columna se observa la capacidad máxima seleccionada para la batería.
- La energía que se extrae de las baterías a la hora más rentable.
- La energía generada en corriente alterna (E<sub>AC</sub>). La máxima potencia de los inversores es 1MW, entonces, la máxima energía que se obtiene en barras de central será ese valor por el rendimiento de balance del sistema (91%).
- Los ingresos que se obtendrían para el caso E<sub>AC</sub>.

- i) La energía generada considerando las baterías ( $E_{AC+}$ ). La energía que se extrae de dichas baterías, sufre unas pérdidas del 10%.
- j) Los ingresos que se obtendrían para el caso  $E_{AC+}$ .

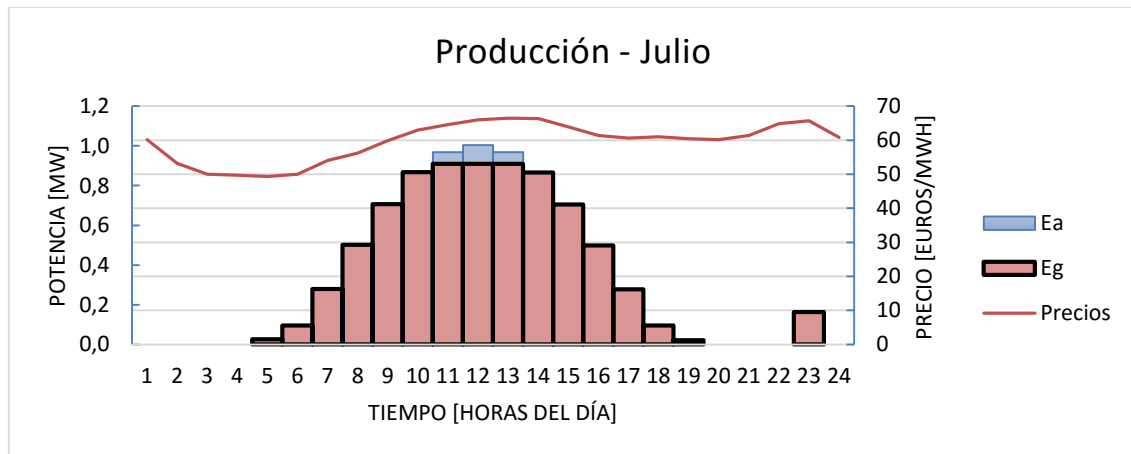
#### 4.3. Resultados

La Figura 4.2 muestra el *Modelo solo pérdidas-horas finales/energía constante*. El sistema de almacenamiento tiene una capacidad de 0,25 MWh.



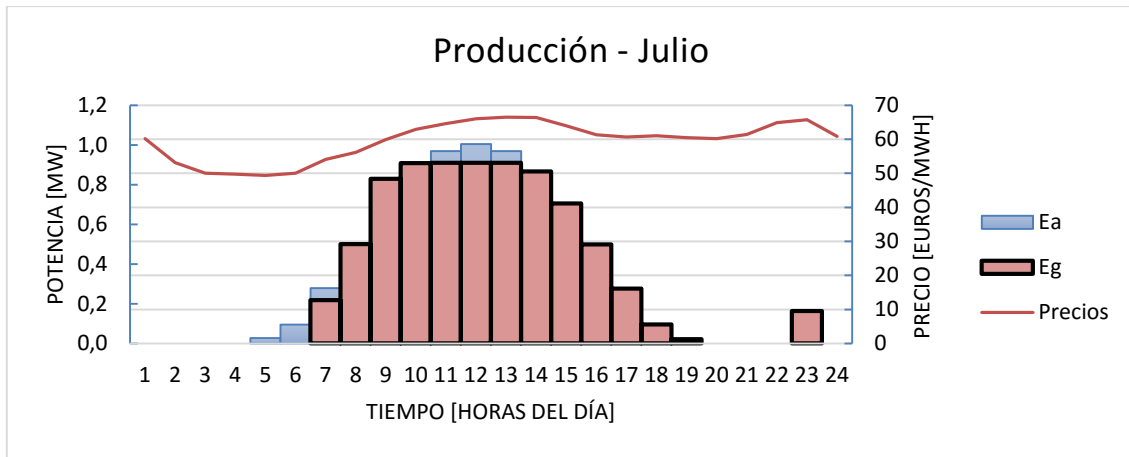
**Figura 4.2.** Modelo horas finales-energía constante, energía aprovechada (Ea), energía generada (Eg)

La Figura 4.3 muestra el algoritmo del *Modelo solo pérdidas-hora más rentable*, donde toda la energía almacenada se envía en la hora de mayor precio.



**Figura 4.3.** Modelo hora más rentable, energía aprovechada (Ea), energía generada (Eg)

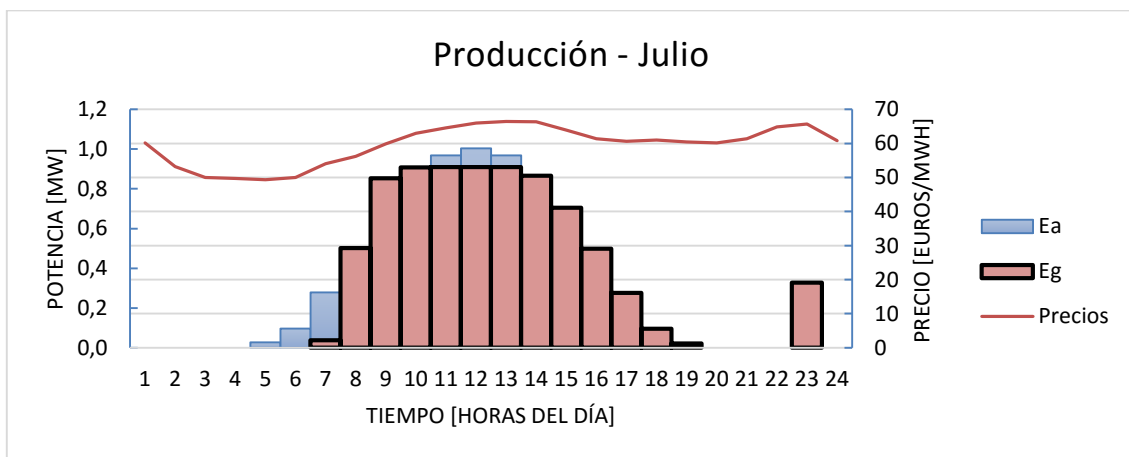
Para probar el *Modelo pérdidas/traslado-hora más rentable*, se debe tener en cuenta que es necesario la disponibilidad de las baterías antes del mediodía, para almacenar la energía que excede la potencia máxima. La Figura 4.4 muestra el modelo, donde en la mayoría de los casos, las primeras horas tienen precios bajos por lo que se puede almacenar la energía, para enviarla en las siguientes horas.



**Figura 4.4.** Modelo pérdidas-traslado (0,25 MWh), energía almacenada (Ea), energía generada (Eg)

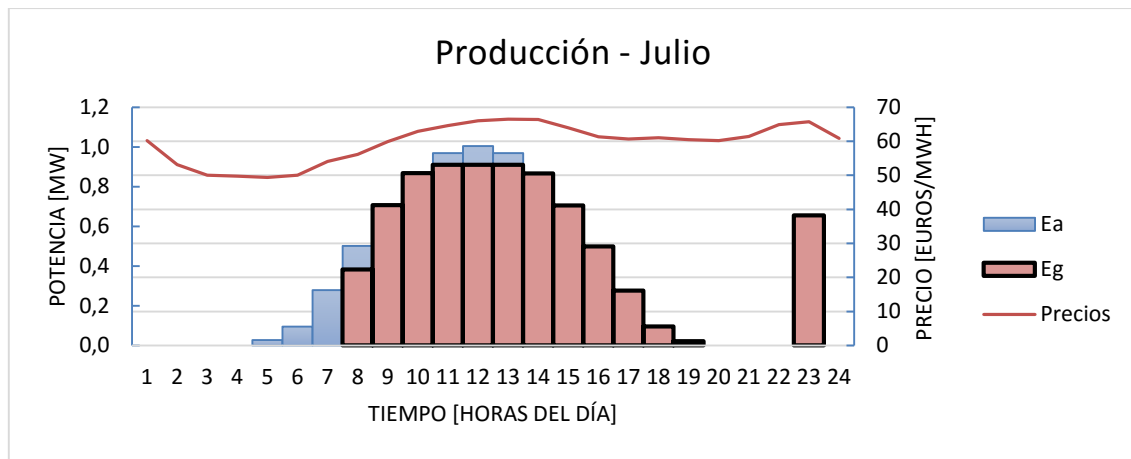
Este método de aprovechamiento es casi imposible de realizar con capacidades de almacenamiento bajas, pues aunque se tenga predicciones de la irradiación solar, no se conoce con exactitud cómo se comportará el clima.

Aunque con los sistemas de control modernos se optimiza mejor la predicción, se ve necesaria una mayor capacidad de las baterías para aprovechar el algoritmo. En la Figura 4.5 se muestra el mismo modelo con un sistema de mayor capacidad (0,5 MWh). Se observa, como se manipula la curva para almacenar la energía que se desperdicia y la que tiene bajos precios, para enviarla en el momento de mayor rentabilidad.



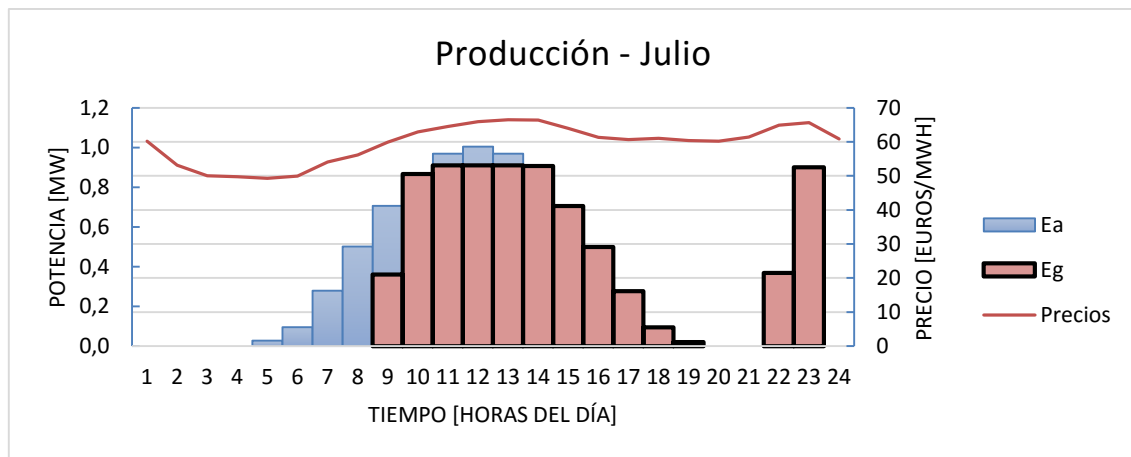
**Figura 4.5.** Modelo pérdidas-traslado (0,5 MWh), energía almacenada (Ea), energía generada (Eg)

La Figura 4.6 muestra otro ejemplo al duplicar la capacidad anterior (1MWh). Se observa como en la hora de mayor precio, se envía toda la energía almacenada.



**Figura 4.6.** Modelo pérdidas-traslado (1 MWh), energía almacenada (Ea), energía generada (Eg)

Se realiza una última prueba para observar el comportamiento con una capacidad de almacenamiento de 2 MWh. En la Figura 4.7 se observa la distribución de la energía.



**Figura 4.7.** Modelo pérdidas-traslado (2 MWh), energía almacenada (Ea), energía generada (Eg)

Al aumentar la capacidad del sistema de almacenamiento, se tiene la flexibilidad de trasladar la energía hacia los horarios con mayores precios sin mayores problemas. Sin embargo, esto no quiere decir que sea el sistema más eficiente o rentable.

Para comparar los ingresos, la Tabla 4.2 muestra los resultados de producción energética y los ingresos correspondientes a las figuras anteriores, para un día típico del mes de julio.

**Tabla 4.2.** Resultados de producción para un día típico del mes de julio

		Sistema							
		Sin límite	Con límite	Con almacenamiento					
<b>Capacidad</b>	MWh	0,0	0,0	0,25*	0,25**	0,25	0,5	1,0	2,0
<b>Producción</b>	MWh	7,88	7,67	7,85	7,94	7,81	7,82	7,80	7,73
<b>Aprovechamiento</b>	kWh	211	0	180	164	146	152	136	62
<b>Ingresos</b>	€	496	482	494	493	494	496	498	498
<b>Aprovechamiento</b>	€	14	0	11	11	11	14	15	16
<b>Observación:</b>		Sin pérdidas	Límite conversor	Almacenar y trasladar pérdidas		Almacenar y trasladar pérdidas y energía de bajo precio			

\*Modelo horas finales/energía constante; \*\*Modelo hora más rentable

Se prueba los modelos de almacenamiento con todos los meses. La Tabla 4.3 muestra los valores calculados para todos los meses del año. Los valores de energía y renta son del día tipo del mes indicado.

**Tabla 4.3.** Resultados diarios del cálculo de la energía y la renta

Sist.	Sin límite		Con límite		Con límite y almacenamiento									
Cap.	-		0,2*		0,2**		0,2 MWh		0,4 MWh		0,8 MWh		1,6 MWh	
Mes	MWh /día	€ /día	MWh /día	€ /día	MWh /día	€ /día	MWh /día	€ /día	MWh /día	€ /día	MWh /día	€ /día	MWh /día	€ /día
Ene	4,69	188	4,69	188	4,69	188	4,66	190	4,62	191	4,62	194	4,55	196
Feb	5,85	266	5,85	266	5,85	266	5,82	269	5,78	271	5,78	275	5,71	281
Mar	7,21	210	7,04	205	7,19	211	7,17	212	7,14	213	7,13	216	7,06	221
Abr	7,09	341	7,08	340	7,09	341	7,07	343	7,06	345	7,01	348	6,95	353
May	7,59	359	7,52	356	7,59	359	7,57	360	7,55	361	7,52	363	7,45	366
Jun	7,80	451	7,67	444	7,78	451	7,76	452	7,75	452	7,73	453	7,65	452
Jul	7,88	496	7,67	482	7,83	493	7,81	494	7,82	496	7,80	498	7,73	498
Ago	7,50	437	7,37	429	7,49	437	7,47	438	7,45	439	7,43	442	7,36	445
Sep	6,82	372	6,80	371	6,82	372	6,80	373	6,78	374	6,75	375	6,67	376
Oct	5,96	318	5,96	318	5,96	318	5,94	319	5,92	320	5,89	322	5,81	322
Nov	4,72	253	4,72	253	4,72	253	4,71	254	4,69	255	4,65	257	4,58	260
Dic	4,41	248	4,41	248	4,41	248	4,39	250	4,38	250	4,34	252	4,26	254

\*Modelo horas finales/energía constante; \*\*Modelo hora más rentable

#### 4.4. Comparación de la energía producida y aprovechada

A continuación se muestran los resultados obtenidos para un año. Se realiza las comparaciones, respecto de un sistema que no posee almacenamiento y desperdicia la energía que supera los límites de potencia permitidos. La Tabla 4.4 indica las ganancias o pérdidas energéticas y económicas que se producen, además, el número aproximado de ciclos utilizados de la batería.

**Tabla 4.4.** Resultados anuales del cálculo de la energía y la renta

	Incremento de Energía	Incremento de ingresos	Uso de batería
Comparación con sistemas:	MWh/año	€/año	ciclos/año
Sin límite (dimensión de acuerdo al ondulador)	23	1227	0
Capacidad 0,25*[MWh]	20	1115	214
Capacidad 0,25** [MWh]	20	1072	214
Capacidad 0,25 [MWh]	12	1629	553
Capacidad 0,5[MWh]	5	2087	500
Capacidad 1 [MWh]	-4	2860	365
Capacidad 2 [MWh]	-30	3731	365

\*Modelo hora más rentable; \*\*Modelo horas finales, energía constante.

Cuando se compara con un sistema donde no hay límite de potencia máxima (toda la energía generada en los paneles solares es aceptada por los onduladores), se obtienen las mayores ganancias, ya que las pérdidas de energía y económicas son nulas.



Con la capacidad de 0,25 MWh se cubren casi todas las pérdidas en el año (para una potencia de 1,4 MWh pico en la salida de los paneles) y se aprovecha la mayor cantidad de energía, por esto, se realizan tres comparaciones con la mencionada capacidad.

Primero, se contrasta con un modelo donde solo se trasladan las pérdidas hacia la hora más rentable; segundo, con un modelo que igualmente solo traslada las pérdidas, pero repartiendo lo almacenado entre las horas finales del día (cuando no hay radiación), sin dejar que la planta detenga la generación de energía.

Por último, se prueba el modelo donde se aprovechan las pérdidas y se trasladan dichas pérdidas y la energía de bajo precio, hacia la hora más rentable. El último modelo se utiliza con varias capacidades del sistema de almacenamiento y se observa que a mayor capacidad se obtiene más rentabilidad económica. Las principales desventajas de dicho modelo son que el número de ciclos al año aumenta y se pierde energía, debido al rendimiento de las baterías.

Al aumentar la capacidad de las baterías, la energía aprovechada disminuye hasta el punto en que se producen pérdidas. Esto reduce la eficiencia energética de la planta y equivale a una reducción de las horas equivalentes de funcionamiento al año de dicha planta.

## **5. Discusión acerca de la rentabilidad económica**

Con el objetivo de conocer la rentabilidad de la inversión en un sistema de almacenamiento de energía, es necesario realizar un análisis técnico económico acerca de la variabilidad y tendencia de los precios. El presente proyecto plantea el cálculo del periodo de retorno, un método muy sencillo pero válido para el análisis de la rentabilidad.

El cálculo del periodo de retorno, sirve para conocer la rentabilidad en cualquier inversión. Cuanto más corto sea el periodo de retorno, más rentable y menos arriesgado es el proyecto; por ende, cuanto más a futuro se recupere la inversión, son mayores las incertidumbres.

El método tiene las ventajas en su facilidad de aplicación y comprensión y es aplicable en épocas de inestabilidad política y económica; también, da importancia al reparto de los flujos de caja en el tiempo. Sin embargo, tiene poca consistencia científica porque no tiene en cuenta los diferentes vencimientos de los flujos netos de caja y además no considera otros aspectos económicos.

### *Escenario económico*

De acuerdo a los precios de baterías indicados en el capítulo 2, se calculan los valores supuestos de inversión en caso de adquirir un sistema de almacenamiento.

Para un flujo de caja constante e igual al incremento de los ingresos, y considerando dicho incremento como amortización para el costo de las baterías, se obtienen los periodos de retorno indicados en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1.** Inversión de acuerdo a la capacidad

Costos [€/kWh]	200	Incremento de ingreso anual	Periodo de retorno
Potencia	Inversión		
MWh	k€	€	años
0,25	50	1629	30,7
0,5	100	2087	47,9
1	200	2860	69,9
2	400	3731	107,2

El resultado más conveniente, con 0,25 MWh de capacidad, da como resultado un periodo de retorno mayor a 30 años. Esto indica que la inversión no es adecuada debido a que supera los tiempos de vida media de una instalación fotovoltaica y de las propias baterías.

Se debe tomar en cuenta que se puede realizar un análisis técnico económico para profundizar el estudio y contrastar los resultados obtenidos.

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha desarrollado un estudio acerca de la factibilidad de incorporar un sistema de almacenamiento en una central fotovoltaica de media potencia, con el objetivo de: aprovechar de mejor manera la energía que se produce; y capturar la energía que se desperdicia en las horas de potencia máxima.

Se han desarrollado varios algoritmos de almacenamiento, con el fin de obtener la mejor rentabilidad al verter la energía almacenada, desde las baterías hacia los convertidores. El método es interesante, pues se almacena la energía de las horas donde existe demasiada potencia, que normalmente se desperdiciaba; y se descarga dicha energía en la hora donde se obtendrán mayores ingresos. Además, se traslada la energía de precio bajo hacia un horario donde el precio es el mejor. Esto con el fin de obtener mayor rentabilidad.

Mediante el método de aprovechamiento de energía mencionado, la capacidad de almacenamiento de 0,25 MWh presenta los mejores resultados en cuanto a rentabilidad y rendimiento, tomando en cuenta: la potencia máxima de los paneles FV (1,4 MWp), la potencia nominal de los inversores (1 MW), la radiación en la ubicación seleccionada, los precios de la energía en el mercado seleccionado, y el periodo de retorno de la inversión.

Aproximadamente, se aumenta un 10% la potencia nominal pico para simular las pérdidas energéticas, con esto se captura en el año el 1% del total de la energía producida. Esto se traduce en una rentabilidad muy baja en el año, incapaz de cubrir la inversión económica. Estos resultados muestran que aun cuando se trata de aprovechar la máxima energía utilizando las baterías, seguirán produciéndose pérdidas debido principalmente al rendimiento de dichas baterías.

Además, mientras mayor sea la energía a trasladar, menor será la eficiencia del sistema; y aunque se obtienen mayores ingresos al enviar la energía en el horario de mayor precio, la rentabilidad final de implementar el sistema no es la adecuada.

Se concluye que el costo de las baterías es el mayor inconveniente al momento de incorporar un sistema de almacenamiento, pues lo que se puede ahorrar o aprovechar al almacenar la energía no es suficiente como para cubrir los costos de la inversión económica. Sin embargo, se espera una reducción en los precios de los sistemas de almacenamiento en las próximas décadas, de modo que se pueda cambiar de panorama.

## 7. Referencias

[1] *Internacional Energy Agency. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy* [en línea], 2014, [consulta: 7 de abril de 2016]. Key findings and actions. Disponible en: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy---2014-edition.html>>

[2] *The PV Market Alliance* [en línea], 2015. [consulta: 7 de abril de 2016]. Disponible en: <[http://pvmarketalliance.biz/wp-content/uploads/2016/01/20160118PVMA\\_PR2016\\_Final.pdf](http://pvmarketalliance.biz/wp-content/uploads/2016/01/20160118PVMA_PR2016_Final.pdf)>

[3] Energías renovables. Tipos de paneles fotovoltaicos.[en línea]. [consulta: 21 de mayo de 2016]. Disponible en: <<http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>>

[4] Energiza. Paneles *Fotovoltaicos:Concepto y tipos*. [en línea]. [consulta: 21 de mayo de 2016]. Disponible en: <<http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/627-paneles-fotovoltaicos-concepto-y-tipos>>

[5] Sphelar Power. Products. En *SPHELAR BIPV* [en línea]. 2016 [consulta: 20 de julio de 2016]. Disponible en: <[http://sphelarpower.com/product/sphelar\\_bipv.html](http://sphelarpower.com/product/sphelar_bipv.html)>

[6] PVTECH. Top 10 module manufacturers in 2015. En *Ranking list* [en línea]. 2016 [consulta: 20 de julio de 2016]. Disponible en: <<http://www.pv-tech.org/editors-blog/top-10-solar-module-manufacturers-in-2015>>

[7] ENF. Fabricantes de paneles solares. En *Paneles solares en promoción* [en línea]. 2016 [consulta: 21 de mayo de 2016]. Disponible en: <<http://es.ensolar.com/directory/panel>>

[8] Barrie Lawson, Electropedia. En *Grid Scale Energy Storage Systems* [en línea]. 2016 [consulta: 2 de junio de 2016]. Disponible en: <[http://www.mpoweruk.com/grid\\_storage.htm](http://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm)>

[9] Morante, Juan Ramón, El almacenamiento de la electricidad. En *Cuantificación de resultados energéticos y evaluación económica* [en línea]. 2014 [consulta: 13 de junio de 2016]. Disponible en:<[http://www.empresaeficiente.com/wp-content/uploads/2016/01/guia\\_26\\_el-almacenamiento-de-la-electricidad.pdf](http://www.empresaeficiente.com/wp-content/uploads/2016/01/guia_26_el-almacenamiento-de-la-electricidad.pdf)>

- [10] Barrie Lawson, Electropedia. En *BSM* [en línea]. [consulta: 10 de junio de 2016]. Disponible en:<<http://www.mpoweruk.com/bms.htm>>
- [11] Rashid, Muhammad H. Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones, *Control de Voltaje en inversores trifásicos* (Tercera edición). Pearson Educación, S.A.
- [12] Opex energy. Termosolares. En *Sistemas eléctricos, transformador* [en línea]. [consulta: 24 de mayo de 2016]. Disponible en:  
<[http://opex-energy.com/termosolares/sistemas\\_electricos\\_termosolar.html](http://opex-energy.com/termosolares/sistemas_electricos_termosolar.html)>
- [13] A123 Systems Grid Solutions. En *Nanophosphat Lithium Ion Enabling New Possibilities for the Electric Grid* [en línea]. [consulta: 24 de mayo de 2016]. Disponible en:  
<<http://www.a123systems.com/Collateral/Documents/English-US/SGSS%20Brochure.pdf>>
- [14] Photovoltaic Geographical Information System. En *Average Daily Solar Irradiance*[en línea]. 2016 [consulta: 3 de junio de 2016]. Disponible en:  
<<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>>
- [15] Andreu, J. Conversión fotovoltaica. Procedente de las conferencias de Energía Solar. (MERSE 2015-2016). Barcelona, España: Universitat de Barcelona.
- [16] Wu, T. Chang, C. Chang, Y. Lee, K. Power Loss Analysis of Grid Connection Photovoltaic Systems. *IEEE revista digital* [en línea]. [consulta: 13 de julio de 2014]. Disponible en:  
<<http://ieeexplore.ieee.org.sire.ub.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5385738>>. PEDS2009
- [17] OMIE. En *Precio horario de mercado diario* [en línea]. [consulta: 10 de julio de 2016]. Disponible en:  
<<http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>>

## ABSTRACT

Solar energy has become one of the most important sources for generating electricity in the last years. This development has been possible due to the technological advances, the market opening and willingness of governments, in order to promote photovoltaic installations. Then, it is important to find methods to improve the performance of the growing PV systems. A method of improving performance is taking energy losses. This is the reason why emerge the concern of knowing whether the PV system improve its performance and profitability by including an energy storage system. This analysis study developed the idea on how to incorporate batteries as a storage system in a PV power plant. A review of the state of the art about storage systems was performed in order to choose the best technology according to the technological maturity, energy density, cycle life, scalability, depth of discharge, charge/discharge efficiency. Therefore, the result indicates that lithium-ion batteries fulfill the requirements needed. Thus, the simulation model was developed with the parameters of a system of lithium-ion batteries. Several methodologies were tested to get the maximum economic returns by reducing losses assumptions and energy prices variability. It is well known that in a liberalized market there are some electricity high-cost hours in the day. Consequently, the model sold the energy during those hours to increase the economic benefits. The findings of this study revealed that the profits grew while increasing the batteries capacity. However, power wastes appear because of the battery losses at the same time. This causes a limit for the energy density as they begin to water down the system efficiency. At that time, the appropriate storage value and their respective profits were found.

Finally, the profits were compared with the investment and as a result it is observed that is not convenient to perform the investment because of the high investment costs.

In conclusion, the batteries costs still remains being the biggest drawback when incorporating a storage system because all the profits of storing energy are not enough to cover the investment. However, a reduction in the storage systems prices is expected in the coming decades, so this fact may change.