



Universidad Autónoma de Madrid  
Facultad de Ciencias

Trabajo de Fin de Máster en Energías y Combustibles para el Futuro  
Curso 2014-15

Propuesta de un esquema de monitorización en tiempo real del  
sistema de módulos fotovoltaicos de la empresa Yingli Green  
Energy Spain, Madrid, España

**Autor: Ing. José Alberto Florez**

**Directora: Dra. Raquel Díaz**

**Director: Dr. José María Román**



**Madrid, Junio 2015**



## AGRADECIMIENTOS

A la empresa Yingli Green Energy Spain, por permitirme desarrollar este Trabajo de Fin de Máster en sus instalaciones, a todo el equipo del laboratorio, especialmente a su director, el Dr. José María Román por su valiosa asistencia.

A la Familia García de Bascarán, especialmente a mi Tía Ita, por creer en mí. Sin su apoyo incondicional y cariño no habría podido alcanzar esta meta.

A mi Amada Esposa Linda Hernández, por ser mi punto de apoyo y estar conmigo en cada paso del camino.



## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	i
ÍNDICE GENERAL.....	ii
RESUMEN .....	iv
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Planteamiento del Problema .....	1
1.2.- Objetivos de la Investigación .....	2
1.2.1.- Objetivo General .....	2
1.2.2.- Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO.....	2
2.1.- Sistemas de Energía Fotovoltaica .....	2
2.1.1.- Células Fotovoltaicas.....	2
Curva Característica de las Células Fotovoltaicas .....	3
2.1.2.- Módulos Fotovoltaicos.....	4
2.1.3.- Inversores.....	4
2.2.- Monitorización de Sistemas Fotovoltaicos .....	4
2.2.1.- Parámetros de la Monitorización.....	5
Potencia Pico .....	5
Potencia Específica .....	5
Performance Ratio (PR) .....	6
2.2.2.- Rendimiento de un Sistema Fotovoltaico .....	6
Pérdidas de captación .....	6
PÉRDIDAS DE CÉLULA .....	7
Pérdidas de módulo y sistema .....	8
CAPÍTULO 3 – MARCO METODOLOGICO .....	9
3.1.- Tipo de Investigación .....	9



3.2.- Descripción del Sistema Fotovoltáico Instalado en Yingli Green Energy Spain .....	10
3.2.1.- Módulos Fotovoltáicos.....	10
3.2.2.- Inversores.....	11
3.2.3.- Sensores Ambientales.....	12
Célula de Referencia.....	12
Piranómetro .....	12
Otros Sensores .....	13
3.3.- Metodología aplicada .....	13
3.3.1.- Establecimiento del esquema de cálculo.....	13
3.3.2.- Obtención de relaciones gráficas.....	13
3.3.3.- Determinar los posibles fallos de funcionamiento de la planta fotovoltaica .....	14
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
4.1.- Estructura General Para la Monitorización.....	14
4.1.1.- Pérdidas de Irradiancia .....	15
4.1.2.- Cálculos con Datos Reales.....	16
4.1.3.- Cálculos Teóricos.....	17
4.1.3.- Bloques Básicos.....	17
4.2.- Relaciones Gráficas Entre los Parámetros Obtenidos.....	19
4.3.- Identificación de Fallos en el Sistema .....	22
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	25
ANEXOS .....	27



## RESUMEN

Este trabajo presenta como objetivo desarrollar un esquema para la monitorización en tiempo real del sistema de módulos fotovoltaicos instalado en la empresa Yingli Green Energy Spain. La monitorización es un procedimiento que permite conocer el funcionamiento de un sistema mediante el análisis de graficas representativas, su importancia reside en la detección oportuna de posibles anomalías y en el control de la producción de energía. Se ha escogido la herramienta informática EXCEL, de Microsoft Office, para desarrollar el esquema debido a su practicidad, economía y flexibilidad con el usuario. El sistema fotovoltaico estudiado se encuentra instalado en la sede de Yingli Green Energy Spain en San Agustín de Guadalix, Madrid, y tiene una potencia pico instalada de 207,32 kWp, está compuesta por 739 módulos Yingli Panda YL260C-30b de 260 Wp y 132 módulos Yingli BIPV YL116, conectados a 12 inversores fabricados por SMA modelo Sunny Tripower de diferentes tamaños.

El esquema propuesto permite analizar cada paso involucrado en la generación de energía, y proporciona relaciones gráficas para mejorar su visualización, cumple con los requisitos para la detección oportuna de comportamientos anómalos en el sistema, que ayudan a un mantenimiento eficiente y a maximizar la producción de energía siempre que su aplicación sea continua y correcta. La estructura de cálculo en que se basa la propuesta cuenta con la flexibilidad suficiente para ser utilizada en cualquier análisis necesario por la empresa. Mediante la aplicación del esquema de monitorización realizado se detectó un comportamiento inusual en los sensores de temperatura de la Zona 3 – Cubierta y una desviación en la orientación del sensor de irradiancia de la misma zona, falla que fue corregida oportunamente. Se recomienda utilizar la base de datos SQL disponible en la empresa junto con un programa realizado con un lenguaje adecuado para realizar el análisis de datos, y trasladar la tabla de datos generada en EXCEL a la base de datos. Esto con el objetivo de controlar más eficientemente las grandes cantidades de datos producidos.

**Palabras claves:** Sistemas Fotovoltaicos, Módulos Solares, Esquema de Monitorización, Análisis de Datos, Yingli Green Energy Spain.



## CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

Con la creciente demanda de energía y las implicaciones medioambientales del uso de energías no renovables se ha hecho imperativo cada vez a mayor escala no solo la promoción de alternativas más limpias para el ecosistema sino también que estos métodos sean efectivos para lograr competir en el feroz mundo de la distribución actual de la energía. Para alcanzar estos niveles de eficiencia es necesario que las empresas de energías renovables detecten en tiempo real sus problemas operacionales para evitar costos y tiempos improductivos que dificulten la operación del sistema.

La empresa Yingli Solar (en España, Yingli Green Energy Spain S.L.U.) es una de las mayores empresas de fabricación de módulos fotovoltaicos del mundo, su sede en España, ubicada en San Agustín de Guadalix, Madrid, cuenta con el mayor centro de investigación y desarrollo (I+D) de la industria fotovoltaica y en pro de optimizar sus métodos de investigación requiere la creación de un esquema propio para la monitorización continua y en tiempo real de sus sistemas de energía fotovoltaica que cumpla la condición sine qua non de ser suficientemente versátil para poder ser aplicable a cualquier configuración de estudio posible. De lo anterior, surge esta propuesta de estructuración de un procedimiento que permita determinar las condiciones del sistema y corregir las debilidades identificadas mediante un análisis sistemático. Este trabajo Final de Máster se encuentra estructurado de la siguiente manera:

**Capítulo 1:** plantea las necesidades, se justifica su desarrollo con base en la problemática existente y se presentan los objetivos que determinan el enfoque y alcance de la investigación.

**Capítulo 2:** hace referencia al marco teórico vinculado a los objetivos de la investigación, y a su vez proporciona soporte a las conclusiones presentadas.

**Capítulo 3:** muestra el procedimiento metodológico que se llevó a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados.

**Capítulo 4:** contiene los resultados que derivan del análisis de la monitorización y ejemplos que demuestran las ventajas de una óptima aplicación del esquema desarrollado.

**Capítulo 5:** establece las conclusiones y recomendaciones que surgieron de acuerdo a los criterios preestablecidos.

### 1.1.- Planteamiento del Problema

La sede de Yingli Green Energy en España, ubicada en San Agustín de Guadalix, Madrid, cuenta con un sistema de módulos fotovoltaicos en las fachadas sur, oeste y en la cubierta. Dicho sistema tiene incorporado todo el conjunto de sensores necesarios para realizar una completa monitorización del mismo. Las operaciones realizadas en el laboratorio de ensayo de módulos



fotovoltaicos, requieren un programa para la monitorización de sus módulos que funcione con un protocolo abierto, es decir, extensible y adaptable que proporcione la versatilidad necesaria para realizar cambios en el mismo dependiendo de los requerimientos de fuente de datos o estimación de pérdidas necesarios. Por lo que se plantea una herramienta informática que permita visualizar en representaciones gráficas las relaciones existentes entre los diversos parámetros y no se encuentre restringido por las consideraciones establecidas por los programas comerciales y sus protocolos cerrados.

## 1.2.- Objetivos de la Investigación

### 1.2.1.- Objetivo General

Proponer un esquema versátil para realizar la monitorización en tiempo real del sistema de módulos fotovoltaicos de la empresa Yingli Green Energy Spain.

### 1.2.2.- Objetivos Específicos

1. Establecer un esquema de cálculo para la monitorización del proceso de generación de energía.
2. Obtener de relaciones gráficas entre los diferentes datos registrados y calculados.
3. Determinar los posibles fallos de funcionamiento de la planta fotovoltaica basándose en las representaciones gráficas obtenidas.

## CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO

### 2.1.- Sistemas de Energía Fotovoltaica

Un sistema de energía fotovoltaica es una serie de equipos mediante los cuales se genera energía eléctrica a partir de la luz solar. El elemento principal del sistema son las células fotovoltaicas (también llamadas células solares), varias células se combinan para formar un módulo y varios módulos se conectan juntos para formar una cadena, las células producen electricidad en corriente continua (DC). (1)

#### 2.1.1.- Células Fotovoltaicas

Una célula fotovoltaica es esencialmente un diodo semiconductor con una capa activa que cuando se expone a la luz, convierte en electricidad una parte de la energía que se encuentra en los fotones que llegan a la célula. Para generar electricidad la célula tiene que realizar dos funciones básicas, en primer lugar, conseguir la absorción de la luz solar para generar

portadores de carga, y en segundo lugar separar los portadores generados antes de que se recombinen para que puedan ser aprovechados. (2)

### Curva Característica de las Células Fotovoltaicas

Una célula solar en oscuridad es un diodo semiconductor estándar, permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. La curva característica de un diodo (I-V) consta de dos regiones: por debajo de cierta diferencia de potencial, se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de ella como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña, como se aprecia en la Ilustración 1(b).

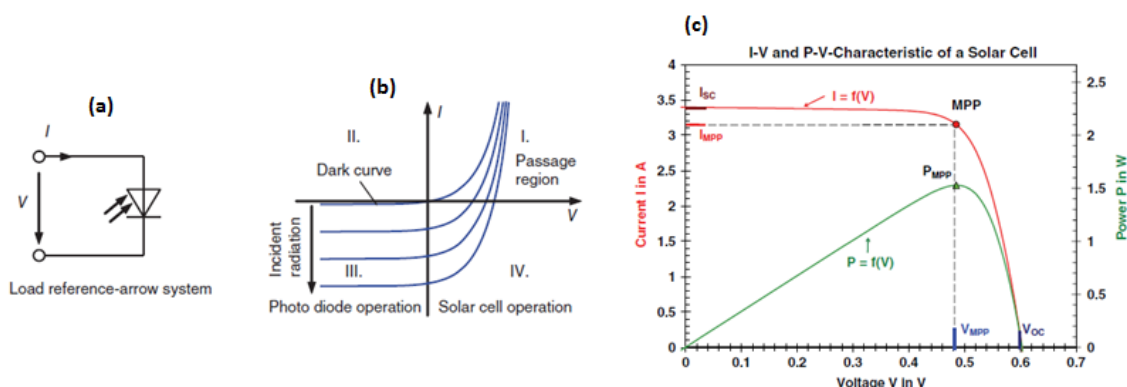


Ilustración 1 - (a) Representación de un diodo semiconductor. (b) Curva característica del diodo semiconductor. (c) Curva I-V y P-V de una célula fotovoltaica.

La presencia de iluminación genera portadores de carga que fluyen por el circuito eléctrico creando una corriente llamada fotocorriente en la célula, lo que desplaza la curva I-V en la dirección negativa, debido a que la fotocorriente y la corriente del diodo fluyen en direcciones opuestas. La célula solar consume energía en los cuadrantes 1 y 3, pero la genera en el cuadrante 4. Debido a la importancia de este cuadrante en la operación de las células solares, usualmente se presenta este, invirtiendo el eje vertical, para obtener la curva I-V de una célula, un ejemplo de esta curva se aprecia en la Ilustración 1(c) (2)

De la curva I-V de una célula se obtienen sus principales parámetros, la tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente en cortocircuito ( $I_{sc}$ ) definen la célula, adicionalmente en esta curva se puede hallar un punto donde el producto tensión-corriente sea máximo, este es llamado el punto de máxima potencia, y es el punto de operación óptimo de la célula, a este punto están asociados los puntos de tensión a máxima potencia ( $V_{mp}$ ), y corriente a máxima potencia ( $I_{mp}$ ).





### 2.1.2.- Módulos Fotovoltaicos

Una sola célula fotovoltaica de silicio produce baja tensión (0,6 V) y tiene unas pobres características mecánicas, por lo que para su utilización y comercialización las células solares son interconectadas y encapsuladas en un módulo fotovoltaico. (3)

Es importante conocer las características eléctricas y físicas de los módulos para su adecuado uso. Las características eléctricas más importantes son: capacidad instalada, tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente en cortocircuito ( $I_{sc}$ ), tensión a máxima potencia ( $V_{mp}$ ), corriente a máxima potencia ( $I_{mp}$ ), factor de forma, coeficiente de temperatura y eficiencia. Los principales parámetros físicos son: dimensiones, peso, material de cubierta, empaquetado, requerimientos de montaje y método de conexión a tierra. (4) Los módulos son comúnmente conectados en serie formando una cadena, para aumentar la tensión obtenida, luego, las cadenas son conectadas en paralelo para aumentar la intensidad de corriente producida por todo el sistema, obteniéndose un generador fotovoltaico. (5)

### 2.1.3.- Inversores

Después de los módulos, los inversores son el equipo más relevante en cuanto a costes de un sistema fotovoltaico, típicamente representa entre el 5% y el 10% del coste total para un sistema comercial conectado a red y el 15% y el 25% de un sistema residencial aislado. (4)

La principal tarea del inversor es convertir la corriente continua en una corriente alterna con una forma sinusoidal, pero además, este equipo tiene que cumplir con otros requerimientos, como por ejemplo: alcanzar altas eficiencias (mayores a 95%), alimentar la corriente a la red de forma síncrona con la frecuencia de esta, rastrear el punto de máxima potencia (MPPT), monitorizar los parámetros de la red para evitar un funcionamiento aislado, y proporcionar información del estado de la planta para su monitorización mediante una interfaz de datos. (6)

## 2.2.- Monitorización de Sistemas Fotovoltaicos

La monitorización de un sistema consiste en observar mediante instrumentos adecuados uno o varios parámetros para detectar posibles comportamientos anómalos. En el campo de la fotovoltaica esta monitorización es crucial para un eficiente funcionamiento del sistema, sus principales objetivos son calcular la producción de energía, controlar su funcionamiento y detectar fallos en tiempo real en el sistema. (7)

La Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) en el marco del Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica (Photovoltaic Power Systems Programme-PVPS) propone una monitorización mediante un análisis gráfico en el que se estudian relaciones que se

mantienen constantes durante el tiempo, con el fin de apreciar desviaciones en el comportamiento del sistema, aplicando líneas de regresión a los parámetros graficados. (7)

### 2.2.1.- Parámetros de la Monitorización

Para monitorizar efectivamente un sistema fotovoltaico es importante contar con una fuente de datos constante y adecuada, los parámetros más importantes se mencionan en la Tabla 1.

*Tabla 1 - Parámetros para ser monitorizados en tiempo real. (7)*

Parámetro	Símbolo	Unidad
Irradiancia en el plano de los módulos	$G_I$	$W/m^2$
Temperatura Ambiente	$T_{amb}$	$^{\circ}C$
Temperatura del Módulo	$T_{mod}$	$^{\circ}C$
Velocidad del Viento	$SW$	m/s
Tensión de salida del campo fotovoltaico	$V_{DC}$	V
Corriente de salida del campo fotovoltaico	$I_{DC}$	A
Potencia de salida del campo fotovoltaico	$P_{DC}$	kW
Tensión producido por el sistema	$V_{AC}$	V
Corriente producida por el sistema	$I_{AC}$	A
Potencia producida por el sistema	$P_{AC}$	kW
Duración de interrupciones en el sistema	$t_{outage}$	s

Adicionalmente a los parámetros que se miden con sensores en una instalación fotovoltaica, en la monitorización de la misma se utilizan una serie de parámetros calculados, que permiten tener un mejor entendimiento del sistema.

#### Potencia Pico

Es la máxima potencia producida por un módulo o sistema fotovoltaico a condiciones estándar de medida (CEM 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1,5 y 25°C de temperatura de módulo) y en el punto de máxima potencia. La potencia pico se expresa en vatios pico (Wp) en lugar de en vatios (W) para indicar que es un valor máximo alcanzado en condiciones controladas. (2)

#### Potencia Específica

En el marco de los sistemas fotovoltaicos la potencia específica se define como la relación entre la potencia generada y la potencia pico del sistema, este parametro permite comparar equipos de diferentes tamaños y es un recurso de gran valor en monitorizaciones de sistemas. Se expresa en W/kWp.



### Performance Ratio (PR)

El Performance Ratio (PR) es uno de los parámetros más utilizados en la industria fotovoltaica para determinar el funcionamiento de una planta, esta relación proporciona información de la calidad de la planta independientemente de su localización. El PR se representa en porcentaje y describe la relación entre la producción de energía en un periodo determinado y la posible producción teórica de la planta en el mismo periodo. (8)

#### 2.2.2.- Rendimiento de un Sistema Fotovoltaico

Durante todo el proceso de captación y conversión de la energía por el sistema fotovoltaico se suceden una cantidad importante de pérdidas que es necesario identificar y controlar. Las principales pérdidas de este tipo de instalaciones son:

##### Pérdidas de captación

Las pérdidas de captación antes de la llegada de la radiación a la célula, influyen elementos que no permiten que llegue la totalidad de fotones que podrían llegar a la célula.

- *Horizonte*

La cantidad de luz que deja de recibirse debido a que es bloqueada por el horizonte se conoce como pérdida de horizonte. Este parámetro se considera al momento de diseñar e instalar la instalación fotovoltaica, y se mantiene constante durante toda su operación. (9)

- *Orientación e inclinación*

Si se considera un periodo anual, un sistema fotovoltaico recibe un máximo de energía solar a una orientación e inclinación determinadas, estos parámetros varían en función de la localización geográfica de la instalación, y la superficie disponible para su instalación. Si el soporte de los módulos es fijo, esta pérdida es una constante durante la operación de la instalación, pero se puede minimizar con el uso de soportes con seguimiento.

- *Sombreado por elementos cercanos*

Un factor con gran influencia en los sistemas fotovoltaicos es el sombreado, al estar los módulos conectados en serie, el sombreado de incluso una parte de uno de ellos repercutirá en la generación de todo el sistema. Por lo tanto es vital evitar sombreado de objetos como postes o árboles en el diseño e instalación del sistema, adicionalmente, durante su operación, puede ser necesario considerar sombras nuevas, como el crecimiento de vegetación o nuevas construcciones. La colocación del medidor de irradiancia debe evitar en cualquier caso las sombras para poder hacer un análisis adecuado del rendimiento. (1)



- *Suciedad*

Dependiendo de las condiciones atmosféricas del lugar donde se encuentra la instalación fotovoltaica, la suciedad de los módulos puede ser un factor más o menos relevante, es importante planificar limpiezas periódicas para mejorar el funcionamiento de los módulos, y considerar la diferencia de suciedad entre los módulos y el sensor de irradiancia (por ejemplo, limpiezas en diferentes momentos) para una correcta monitorización del sistema.

- *Reflectividad*

La superficie del módulo produce una reflexión cuando el ángulo de incidencia del sol es muy grande, especialmente a primeras y últimas horas del día. Es importante considerar la diferencia en reflexión entre el instrumento de monitorización y los módulos, por ejemplo, un piranómetro no es afectado por ningún tipo de reflexión, mientras que una célula de referencia, sí.

#### *Pérdidas de Célula*

Las pérdidas de célula ocurren durante el proceso de transformar la energía solar en energía eléctrica. Para los efectos de este trabajo se consideran las pérdidas que se pueden medir a niveles de módulos fotovoltaicos, y se obvian las pérdidas propias de la fabricación de la célula, como la recombinación de electrones o el sombreado introducido por los contactos metálicos.

- *Desacople espectral*

La respuesta espectral de una célula solar permite relacionar como fotones con diferentes longitudes de onda contribuyen con la generación de corriente. Las células se caracterizan con un espectro solar determinado y variaciones en la composición atmosférica afectan el espectro recibido por esta y pueden crear desviaciones del comportamiento esperado, adicionalmente es importante considerar la diferencia de comportamiento espectral entre los módulos y el sensor de irradiancia de la instalación, si se utiliza una célula de referencia de tecnología equivalente (CTE), se comportará igual que los módulos, pero si se utiliza un piranómetro, su desacople espectral será diferente. (4) (9)

- *Periodos de baja irradiancia*

La relación entre la energía producida por los módulos y la irradiación incidente en los mismos no es completamente lineal y esta desviación con la idealidad aumenta a baja irradiancia, por debajo de  $400 \text{ W/m}^2$  existe una clara pérdida de eficiencia en las células, lo que se conoce como pérdidas de baja irradiancia. (9)



- *Temperatura*

Un aumento en la temperatura de las células conlleva dos efectos contradictorios, por un lado se produce un aumento en la corriente de corto circuito, por otro, una disminución en la tensión de circuito abierto. Estos efectos compiten en la célula, pero la caída de tensión es mucho mayor que el aumento de la corriente, lo que en definitiva hace que un aumento de temperatura se traduzca en una disminución de la potencia de la célula. (6)

### *Pérdidas de Módulo y Sistema*

Estas pérdidas de energía tienen lugar una vez la células han conseguido generar corriente, incluye incompatibilidad de las células, cableado y otros efectos después del módulo.

- *Mismatch*

En una instalación fotovoltaica, pueden existir diferencias en los parámetros de operación de los módulos debido a las tolerancias del fabricante, es decir un módulo puede presentar unas características de generación diferentes a otro del mismo tipo. Para minimizar lo más posible esta pérdida es importante interconectar los módulos con los parámetros eléctricos más similares entre sí. Las pérdidas por este efecto pueden ser del orden del 1% al 3%. (6) (9)

- *Cableado*

Tanto en la sección de corriente continua (DC) como de corriente alterna (AC) de una instalación fotovoltaica se producen pérdidas debidas a la caída de tensión en los cables, un adecuado diseño y una correcta selección de los mismos durante la instalación del sistema minimizan estas pérdidas, pero es importante considerarlas al monitorizar el sistema pues varían en función de la corriente que circula por el cable. Es aconsejable que el máximo no supere 1,5%. (9) (10)

- *Sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)*

Para un óptimo funcionamiento del sistema fotovoltaico es importante que se encuentre en su punto de máxima potencia, de esto se encarga el sistema de seguimiento de máxima potencia (MPPT) el algoritmo de control más común para este tipo de equipo se basa en la perturbación y la observación (6) lo que implica que no siempre el sistema trabaja en el punto exacto, estas pérdidas son mayores en días con nubes, o cuando hay sombras que barren el campo. (9)

- *Inversor*

El inversor es uno de los componentes principales en una instalación conectada a red, a pesar de su alta eficiencia, tienen pérdidas intrínsecas a su funcionamiento por el orden de 1,5% a 7%. Su funcionamiento óptimo se caracteriza para altos valores de carga, pero en una

instalación fotovoltaica en caso de bajos valores de irradiancia es posible que el equipo trabaje a valores bajos, donde las pérdidas pueden alcanzar valores del 20%, para reducir este efecto se sobredimensiona la potencia pico respecto del valor nominal del inversor en 10-20%. (9)

- *Pérdidas de transporte y transformación*

El paso final de la energía generada por los módulos es su transporte hasta la red y su adecuación a los valores de voltaje requeridos. En esta clasificación se incluye las pérdidas del transformador, y las generadas por el cableado final de transporte. (8)

## CAPÍTULO 3 – MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se revisa la metodología aplicada para el cumplimiento de los objetivos planteados, se define el tipo de investigación además de las técnicas y herramientas utilizadas.

### 3.1.- Tipo de Investigación

Para el cumplimiento del objetivo general se utilizaron tres tipos de investigación. Inicialmente se empleó una investigación descriptiva para caracterizar los equipos que componen el sistema fotovoltaico instalado en Yingli Green Energy Spain, este tipo de investigación se define como la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. (11)

Posteriormente se empleó una metodología de tipo diagnóstica la cual permite delimitar los espacios estratégicos para la acción, (12) lo que permitió especificar las necesidades del análisis requerido. Factores que justificaron la propuesta generada a través de la última y más importante etapa de la investigación, el desarrollo del esquema de monitorización en tiempo real del sistema de módulos fotovoltaicos, que se considera una investigación aplicada, pues “sus resultados pueden ser utilizados para la solución directa de un problema” y específicamente de tipo desarrollo tecnológico, ya que la presente propuesta “se entiende como la adaptación, complementación o mejora de los resultados de un proceso” (13)

El trabajo se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de Yingli Green Energy Spain, utilizando los equipos y sensores disponibles. Para realizar la propuesta se planteó una estructura de bloques en el programa de hojas de cálculo EXCEL, producido por Microsoft, que debido a su interfaz altamente amigable con el usuario y alta popularidad, proporciona una plataforma versátil, que permite observar en conjunto la estructura planteada. Este programa facilita que la estructura realizada pueda ser implementada en conjunto con otra herramienta que permita una mayor automatización y control de grandes cantidades de datos.

## 3.2.- Descripción del Sistema Fotovoltaico Instalado en Yingli Green Energy Spain

La sede de Yingli Solar en Madrid cuenta con el mayor centro de I+D y servicio postventa de la industria fotovoltaica. Sus instalaciones ubicadas en San Agustín de Guadalix cuentan con una planta de generación de energía fotovoltaica dividida en tres zonas, dos integradas en las fachadas sur y oeste y una adicional en la cubierta, en la Tabla 2 se presentan los principales datos de la planta.

*Tabla 2 - Principales datos del sistema fotovoltaico instalado en Yingli Green Energy Spain.*

Ubicación	40º 39' 32,8" N / 3º 36' 8,14" W; Pol. Sur San Agustín de Guadalix, Sector 3
Temperatura amb.	Promedio: 16 °C / Máximo: 43 °C / Mínimo: 2 °C
Potencia Nominal	182 kW
Potencia Pico	207,32 kWp
Distribución	3 zonas: Cubierta, Fachada sur, Fachada oeste
Módulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cubierta y Fachada Sur: 739 módulos Yingli Panda YL260C-30b de 260 Wp</li> <li>• Fachada Oeste: 132 módulos BIPV YL116 (14)PQR</li> </ul>
Estructura de Soporte	Cubierta: Fijo 20°; Fachada sur: Fijo 90°; Fachada Oeste: Fijo 90°
Inversores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cubierta: 5 SMA Sunny Tripower 17000 TL</li> <li>• Fachada Sur: 5 SMA Sunny Tripower 15000 TL y 1 SMA Sunny Tripower 10000 TL</li> <li>• Fachada Oeste: 1 SMA Sunny Tripower 12000 TL</li> </ul>
Áreas	Cubierta 564 m <sup>2</sup> ; Fachada Sur 644 m <sup>2</sup> ; Fachada Oeste 226 m <sup>2</sup>
Producción (estimada)	1.237,8 MWh/año o 1.388,2 kWh/kWp/año

### 3.2.1.- Módulos Fotovoltaicos

En la instalación fotovoltaica se utilizan módulos fotovoltaicos de la serie Panda 265 fabricados por Yingli, específicamente el modelo YL260C-30b, que están constituidos por células de silicio monocristalino de 156mm x 156mm, cuyas especificaciones técnicas se pueden observar en la Tabla 3.

*Tabla 3 - Datos técnicos del módulo Panda YL260C-30b.*

Dimensiones	1650mm / 990mm / 50mm
Peso	19,5 kg
Células (cantidad/material/dimensiones)	60/monocristalinas/156mmx156mm
Potencia (Pmax)	260 W
Tensión a Pmax (Vmpp)	30,8 V
Corriente a Pmax (Impp)	8,46 A
Tensión de circuito abierto (Voc)	38,6 V
Corriente de corto circuito (Isc)	8,91 A
Eficiencia del módulo (η)	15,9 %
Coeficiente de temperatura de Pmax (γ)	-0,45 %/°C



La zona oeste de la instalación se encuentra integrada a la fachada del edificio, como se aprecia en la ilustración del anexo C. Estos módulos son el modelo BIPV YL116 fabricado por Yingli, cuya principal característica es que están encapsulados en vidrio, lo que permite el paso de luz al interior. Los datos técnicos de estos módulos se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4 - Datos técnicos del módulo BIPV YL116.

Dimensiones	1610 mm x 1065 mm
Células (cantidad / material)	30 / monocristalinas
Potencia (Pmax)	115,5 W
Tensión a Pmax (Vmpp)	14,9 V
Corriente a Pmax (Impp)	7,77 A
Tensión de circuito abierto (Voc)	18,9 V
Corriente de corto circuito (Isc)	8,33 A
Eficiencia del módulo ( $\eta$ )	6,8 %
Coefficiente de temperatura de Pmax ( $\gamma$ )	-0,45 %/°C

### 3.2.2.- Inversores

Los inversores constituyen el principal elemento de control de la instalación fotovoltaica, proporcionan los datos a la entrada y a la salida de los mismos. Se utilizan inversores fabricados por SMA, cuyas principales características se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5 - Datos técnicos de los Inversores. (14)

Modelo	STP 10000TL-10	STP 15000TL-10	STP 17000TL-10
Anchura x altura x profundidad	665 mm x 690 mm x 265 mm	665 mm x 690 mm x 265 mm	665 mm x 690 mm x 265 mm
Peso	64 kg	64 kg	64 kg
Temp. operación	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
<b>Entrada – Corriente Continua</b>			
Potencia de CC máxima a $\cos \phi = 1$	10 200 W	15 340 W	17 410 W
Tensión de entrada máxima	1 000 V	1 000 V	1 000 V
Rango de tensión del MPP	320 V - 800 V	360 V - 800 V	400 V - 800 V
Tensión asignada de entrada	600 V	600 V	600 V
Tensión de entrada de inicio	188 V	188 V	188 V
Número de entradas del MPP independientes	2	2	2
Strings por entrada de punto de máxima potencia (MPP)	A: 4, B: 1	A: 5, B: 1	A: 5, B: 1



Tabla 6 - Datos técnicos de los Inversores - Continuación. (14)

Modelo	STP 10000TL-10	STP 15000TL-10	STP 17000TL-10
<b>Salida – Corriente Alterna</b>			
Potencia asignada a 230 V, 50 Hz	10 000 W	15 000 W	17 000 W
Potencia aparente de CA máxima	10 000 VA	15 000 VA	17 000 VA
Tensión nominal de CA	220 V, 230 V, 240 V	220 V, 230 V, 240 V	220 V, 230 V, 240 V
Rango de tensión de CA	160 V - 280 V	160 V - 280 V	160 V - 280 V
Corriente de salida máxima	16 A	24 A	24,6 A
Frecuencia de red de CA	50 Hz/60 Hz	50 Hz/60 Hz	50 Hz/60 Hz
Rendimiento máx.	98,1%	98,2%	98,2%

### 3.2.3.- Sensores Ambientales

#### Célula de Referencia

Se utiliza una célula de referencia fabricada por Pacific Data Systems, modelo SolData Solar Radiation Pyranometer 80-SPC, que consiste de una fotocélula encapsulada en un bloque de plexiglás de 25mm de espesor como se aprecia en la Ilustración 2. En la instalación de Yingli Solar se dispone de una célula por cada zona de operación. Los principales datos de este equipo se encuentran en la Tabla 7.

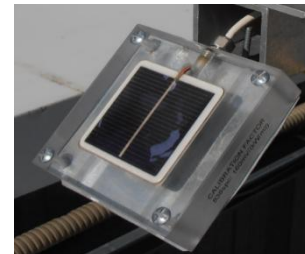


Ilustración 2 - Célula de Referencia.

Tabla 7 - Datos técnicos de la Célula de Referencia.

Elemento de detección	Célula Fotovoltaica Si-Policristalino
Rango espectral	300 a 2800 nm
Respuesta espectral	Sensibilidad máx. 770nm // Longitud de corte 1150nm
Error azimutal (80°)	<+3%
Inestabilidad de la calibración	±2% en 1 o 2 años a condiciones ambientales normales
Rango de temperatura ambiente	0 a 50 °C (Operación) // -25 a +85 °C (Almacenamiento)
Dimensiones	110mm x 110mm x 35mm
Peso	300 g

#### Piranómetro

Para complementar la información de la irradiación disponible, se utiliza un piranómetro CMP 6 clase 1 fabricado por Theodor Friedrichs, instalado horizontalmente como se puede ver en la Ilustración 3, sus principales datos técnicos se listan en la Tabla 8.



Ilustración 3 – Piranómetro.

Tabla 8 - Datos técnicos del Piranómetro. (15)

Clasificación ISO	Primera Clase
Tiempo de respuesta (95 %):	18 s
Rango espectral:	310 to 2800 nm
Error azimutal: (a 80 °)	± 2%
Inestabilidad: (cambio/año)	± 1 %
Temperatura de operación:	-40 to +80 °C
Dependencia de la sensibilidad con la temperatura	± 4 % (-10 to +40 °C)
Irradiancia Máxima:	2000 W/m <sup>2</sup>
Precisión diaria esperada:	± 5 %

### Otros Sensores

Se dispone diferentes sensores para medir los parámetros requeridos en la monitorización del sistema, siendo uno de los más importantes los sensores de temperatura de los módulos, el termopar Pt-100, el cual consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Un listado de los demás sensores con sus características se pueden observar en el Anexo D.

## 3.3.- Metodología aplicada

### 3.3.1.- Establecimiento del Esquema de Cálculo

Para la realización del esquema de cálculo es necesaria la identificación y descripción de los equipos involucrados en el proceso de producción de energía, y de los sensores que proporcionan información adicional para la monitorización, así como los datos proporcionados por cada uno. Conocida la información disponible posteriormente se desarrolla una secuencia de cálculo que permita el análisis del proceso de generación de energía, el diseño propuesto se basa en diferentes etapas, cada una de ellas determinada por una pérdida o un punto de medida en el camino de la energía, en cada etapa se realizan los mismos análisis, obteniéndose datos consistentes y comparables en todo el proceso. Para aumentar la versatilidad del sistema se creó un bloque fundacional, el cual realiza todos los cálculos de una etapa, una secuencia de estos bloques conforma la estructura de la monitorización.

### 3.3.2.- Obtención de Relaciones Gráficas

Los parámetros obtenidos por el esquema de cálculo son representados gráficamente, se realizan dos tipos, gráficos temporales, aplicados a cada paso del proceso que permiten observar el comportamiento del sistema en el transcurso de un periodo de operación y gráficos de relación entre parámetros, que proporcionan información adicional y facilitan el

análisis del sistema, para una monitorización exitosa es de vital importancia la correcta selección de los datos representados en estas gráficas.

### 3.3.3.-Determinar los Posibles Fallos de Funcionamiento de la Planta Fotovoltaica

Las gráficas proporcionadas por el sistema permiten una visualización sencilla y rápida de la gran cantidad de datos proporcionados por el proceso, a pesar de esto, es necesario que el análisis de las mismas sea realizado por un operador con el conocimiento necesario para identificar parámetros que se desvíen del funcionamiento óptimo del sistema, y pueda sugerir las acciones necesarias para su solución.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- Estructura General Para la Monitorización

La estructura de análisis requerida para la monitorización se realizó emulando el proceso real de generación de energía, un esquema del proceso real se puede apreciar en la Ilustración 4, cada pérdida del proceso es definida como una etapa donde se realizan una serie de cálculos para su análisis, la sucesión de las etapas analizadas a lo largo del proceso de generación resulta en un esquema de monitorización completo. Para abarcar las correlaciones existentes entre los diferentes parámetros, es necesario realizar el análisis en las tres variables eléctricas: potencia, corriente y tensión. Adicionalmente, es conveniente contar con una base de cálculo teórica, con la que poder comparar los datos obtenidos de los sensores e identificar desviaciones inusuales con los resultados esperados.

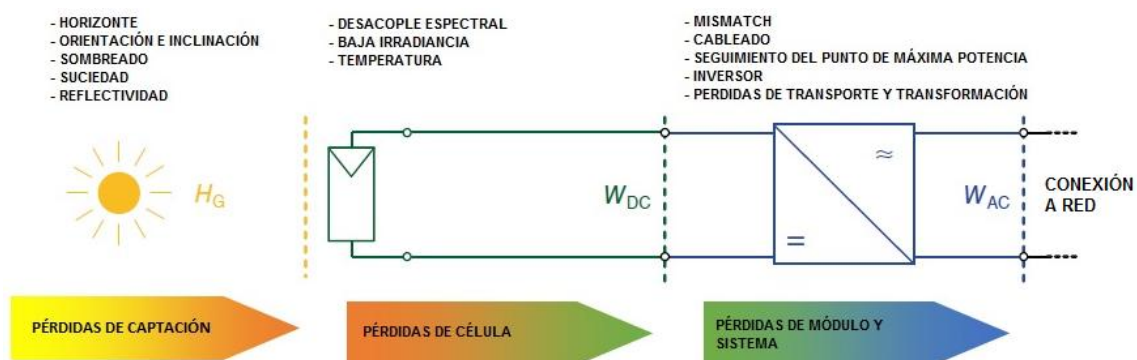


Ilustración 4 - Esquema de la generación de energía por medio de módulos fotovoltaicos y las pérdidas asociadas.

En la Ilustración 5 se puede observar el diagrama de bloques general de la estructura planteada, del cual se pueden diferenciar claramente tres zonas, en primer lugar se calculan las **pérdidas de captación**, representadas por el bloque naranja, en esta zona se analizan todos

los factores que influyen en la incidencia de la radiación en la célula. Por otro lado se tiene el bloque de **cálculo con datos reales**, en verde en este diagrama, que partiendo de datos reales de potencia, corriente y tensión obtenidos del inversor, se analizan las pérdidas de célula, que ocurren antes del inversor y las pérdidas de modulo y sistema, que ocurren después, por último la zona azul representa los **cálculos teóricos**, donde partiendo de la irradiancia que incide en los módulos, se realiza una modelización teórica del sistema, considerando las mismas pérdidas que en la zona anterior, en esta zona no se realiza el análisis de la tensión pues no tienen una dependencia directa con la irradiancia incidente. Adicionalmente se realiza una comparación entre el análisis realizado a partir de valores reales y valores teóricos, zona roja del diagrama, para observar la desviación del sistema.

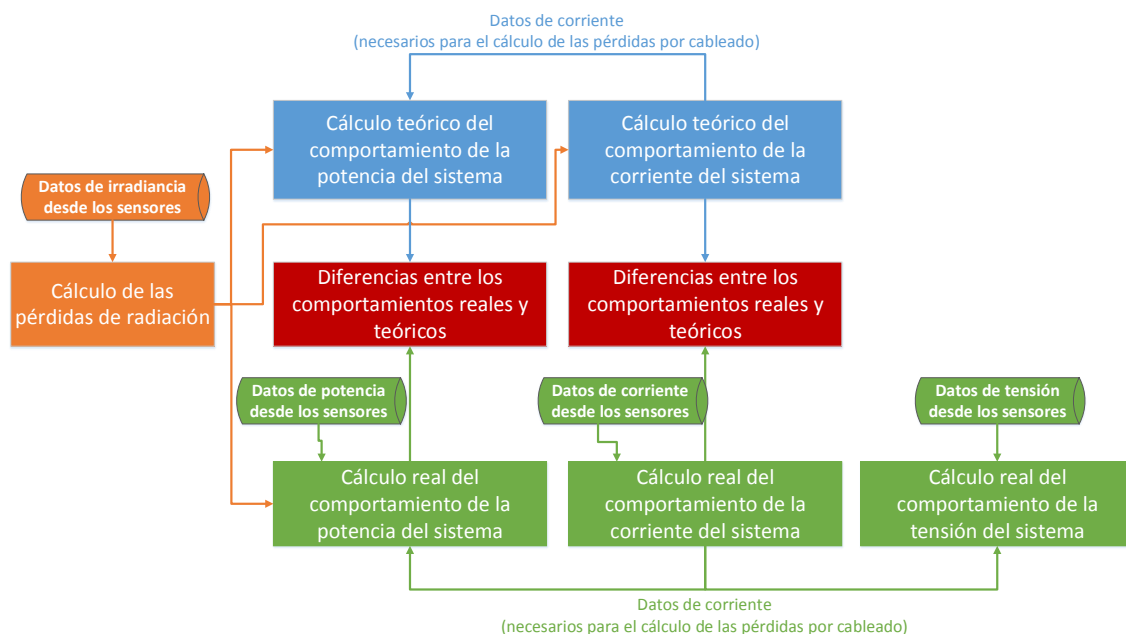


Ilustración 5 - Diagrama de bloques general de la estructura planteada.

#### 4.1.1.- Pérdidas de Irradiancia

En la Ilustración 6 se puede observar con más detalle la sección de pérdidas de irradiancia, donde se toma en consideración todos los factores que pueden afectar en esta etapa, considerando que cada pérdida está supeditada a las condiciones de la planta, por ejemplo, al tipo de sensor utilizado, se coloca un selector condicional en cada paso, esto permite desactivar o activar el cálculo en función de las necesidades del proceso.

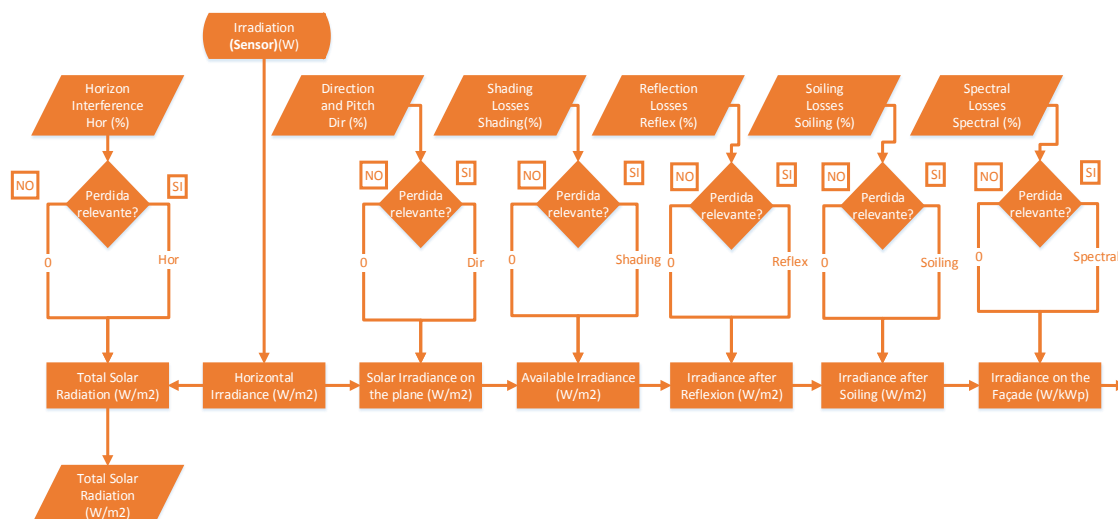


Ilustración 6 - Diagrama del cálculo de las pérdidas de irradiancia en el sistema.

#### 4.1.2.- Cálculos con Datos Reales

En la Ilustración 7 se presenta el diagrama de flujo simplificado del cálculo realizado con los datos reales, los datos utilizados son tensión, corriente y potencia a la entrada y a la salida del inversor, a partir del inversor el análisis se divide en dos secciones, en primer lugar, se calculan las pérdidas que corresponden a las etapas antes del inversor, adicionando cada pérdida con el fin de obtener la energía producida por la célula, después del inversor se calculan las pérdidas de transporte y transformación obteniéndose así todos los parámetros que existirán en el punto de inyección a red, este análisis en dos secciones permite obtener secuencialmente todas la perdidas a la que está sometida la instalación. El diagrama presentado en la Ilustración 7 presenta los cálculos realizados en potencia y adicionalmente el mismo procedimiento se aplica para los datos en corriente y en tensión.

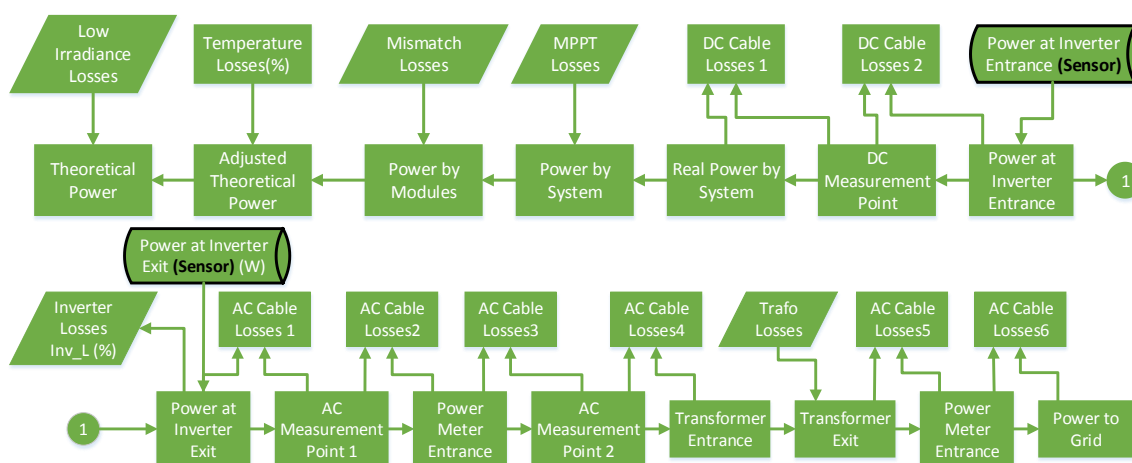


Ilustración 7 - Diagrama de flujo simplificado para los cálculos con datos reales en potencia.

#### 4.1.3.- Cálculos Teóricos

En la Ilustración 8 se puede apreciar el diagrama de flujo para el cálculo teórico de los parámetros estudiados, en este análisis se obtiene un valor teórico de producción de los módulos fotovoltaicos en base a la irradiancia disponible en los mismos, y con este valor se calcula todo el tránsito de energía descontando las pérdidas de cada etapa del proceso, esto permite obtener el comportamiento teórico de todo el sistema y es posible compararlo con datos obtenidos del análisis de datos reales para obtener la desviación de la idealidad del proceso.

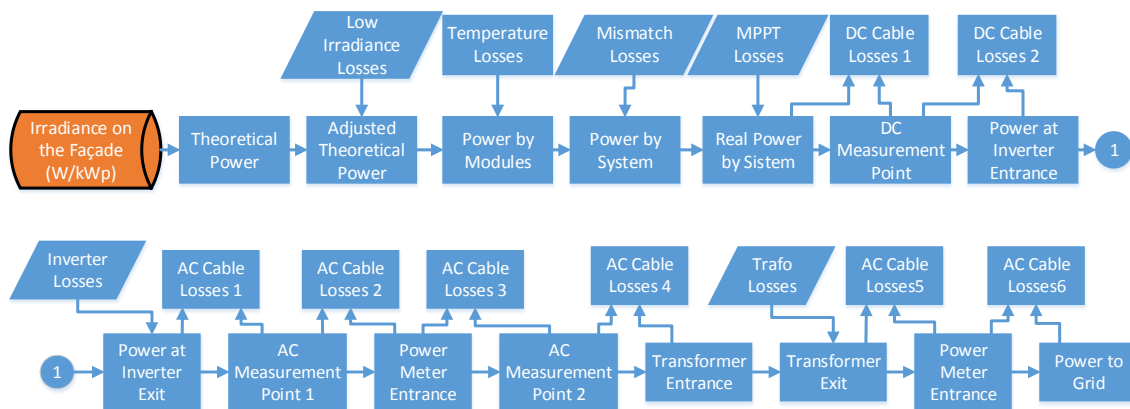


Ilustración 8 - Diagrama de flujo simplificado para los cálculos teóricos en potencia.

#### 4.1.3.- Bloques Básicos

Para que la estructura tuviera una alta versatilidad se planteó una construcción en bloques, que realiza en cada paso las mismas acciones, lo que facilita su reproducibilidad y su fácil codificación en caso de querer realizar este análisis por medio de un lenguaje de programación orientado a objetos, un ejemplo de estos bloques básicos se puede ver en las ilustraciones siguientes, específicamente se representa el efecto de las pérdidas por temperatura en la potencia generada por los módulos, en la Ilustración 10, se puede observar el bloque de la rama de los cálculos reales, por lo que se calcula la etapa anterior adicionando el efecto de la pérdida a la potencia, por el contrario en la Ilustración 10 se puede observar el mismo bloque de la rama de los cálculos teóricos, donde al dato anterior se le sustrae el valor de la pérdida para obtener el valor de potencia requerido. A pesar de que el sentido del cálculo es diferente, el resto del bloque no se modifica, lo que influye en la versatilidad del sistema.

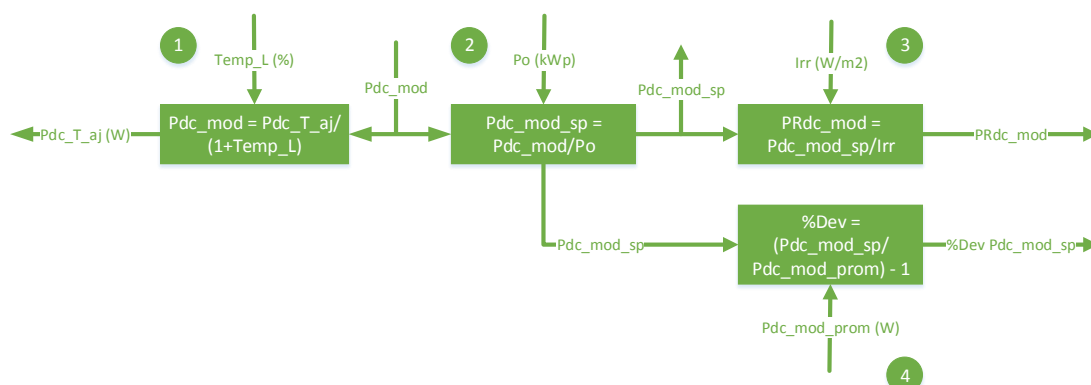


Ilustración 9 - Esquema del bloque básico de los cálculos utilizando los datos proporcionados por los sensores.

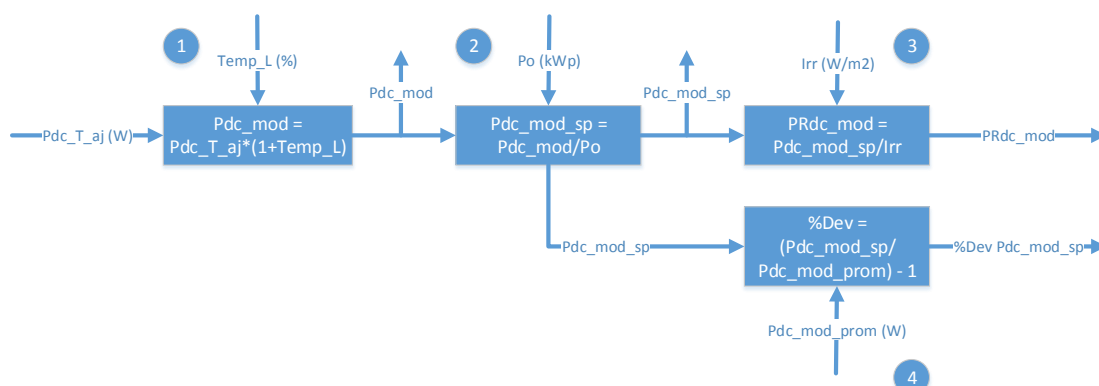


Ilustración 10 - Esquema del bloque base para la realización del análisis.

Los cálculos de análisis de cada bloque se describen a continuación:

1. Cálculo del efecto de la pérdida en el flujo: se sustrae o se adiciona la pérdida dependiendo de la rama por la que se esté realizando el cálculo.
2. Cálculo de la potencia específica: para poder comparar equipos de distintos tamaños, se calcula su potencia específica, dividiendo entre la potencia pico conectada al equipo.
3. Cálculo del Performance Ratio (PR) en el punto actual del análisis: se divide la potencia específica entre la irradiancia en el mismo periodo de tiempo para obtener el performance ratio de cada etapa del análisis.
4. Cálculo de la desviación específica: Se utiliza el promedio de los valores de todos los inversores de una zona como parámetro de control y se determina la desviación de cada inversor contra el promedio, graficando este parámetro se facilita la tarea de detectar variaciones anómalas en el comportamiento de los inversores.



## 4.2.- Relaciones Gráficas Entre los Parámetros Obtenidos

Una vez completada la estructura de cálculo, se alimentó con datos de la instalación para lograr una monitorización de la misma, en cada paso del esquema se realizó una representación gráfica de los datos para observar su comportamiento correctamente.

En la Ilustración 11 se observan las gráficas obtenidas con los datos a la salida del inversores de la Zona 2 – Fachada Sur, en la gráfica de potencia, Ilustración 11(a), se observa un comportamiento normal, un inversor presenta un comportamiento diferente al conjunto (línea verde, inversor SF-I07) debido a que tiene un tamaño menor, este inversor tiene una potencia nominal de 10kW mientras que los demás inversores reportan una potencia nominal de 15kW, por lo que para poder comparar el funcionamiento de los inversores se obtiene su magnitud específica, en la Ilustración 11(b) se observa esta grafica donde se aprecia que todos los inversores presentan el mismo comportamiento.

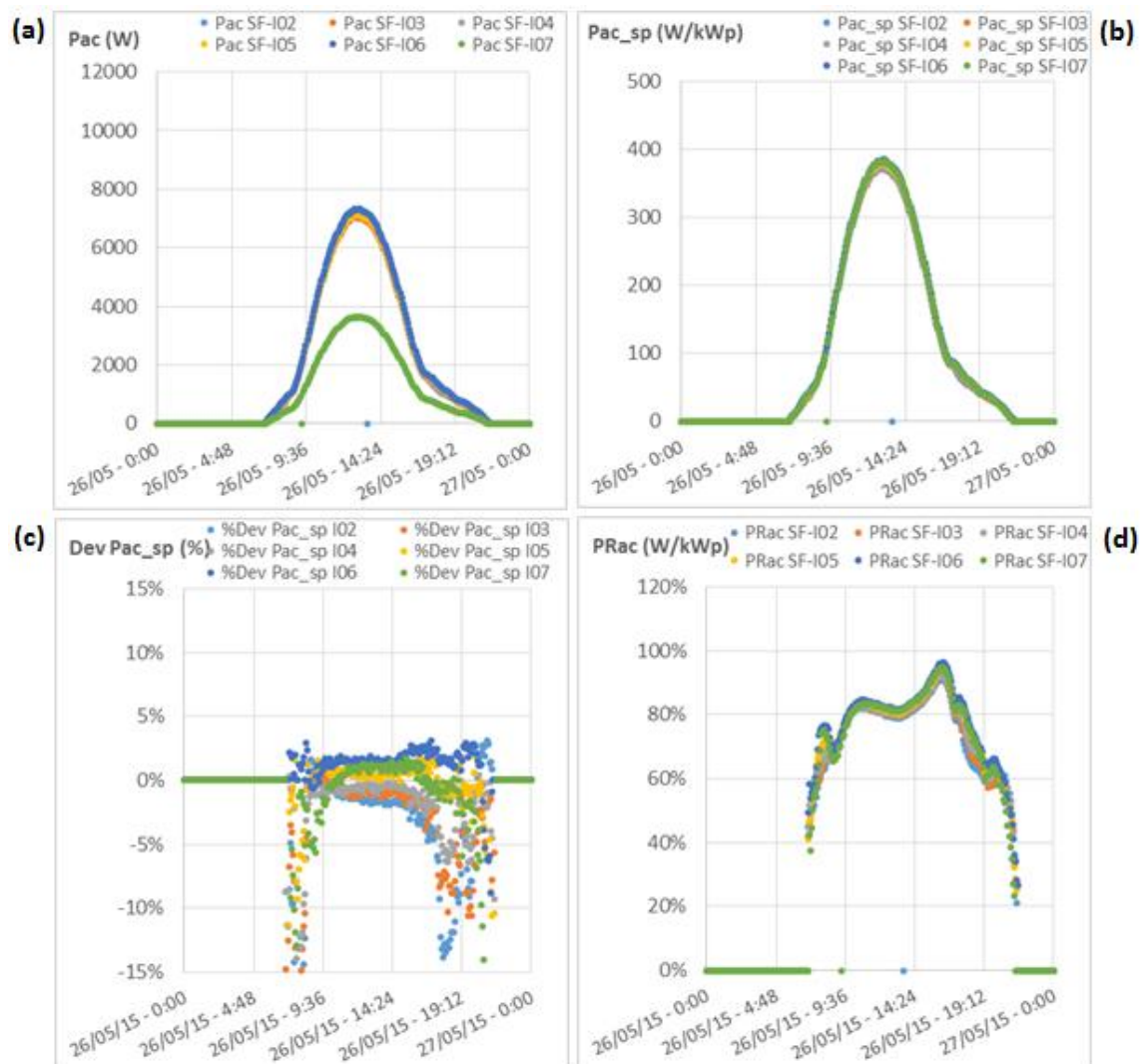


Ilustración 11 -Conjunto de graficas que representan los cálculos reales a la salida de los intercambiadores.



En la Ilustración 11(c) se presenta la gráfica de la desviación de la potencia específica de cada inversor respecto al comportamiento promedio del grupo de inversores, esta grafica permite detectar comportamientos anómalos en los inversores con mayor detalle, en esta se aprecia una disminución en la producción al final del día de un grupo de inversores principalmente el SF-I02, esto se debe a que los módulos que alimentan a este inversor, se encuentran más cerca del suelo y son afectados parcialmente por una sombra proyectada por elementos cercanos (Anexo B) y al variar la posición del sol, esta sombra afecta a los módulos contiguos. Esta circunstancia detectada en el transcurso de este trabajo refleja la utilidad de una correcta monitorización en una instalación fotovoltaica. En la Ilustración 11(d) se presenta la gráfica del performance ratio (PR) que tiene el comportamiento esperado con una depresión en horas del mediodía por efecto de la temperatura principalmente.

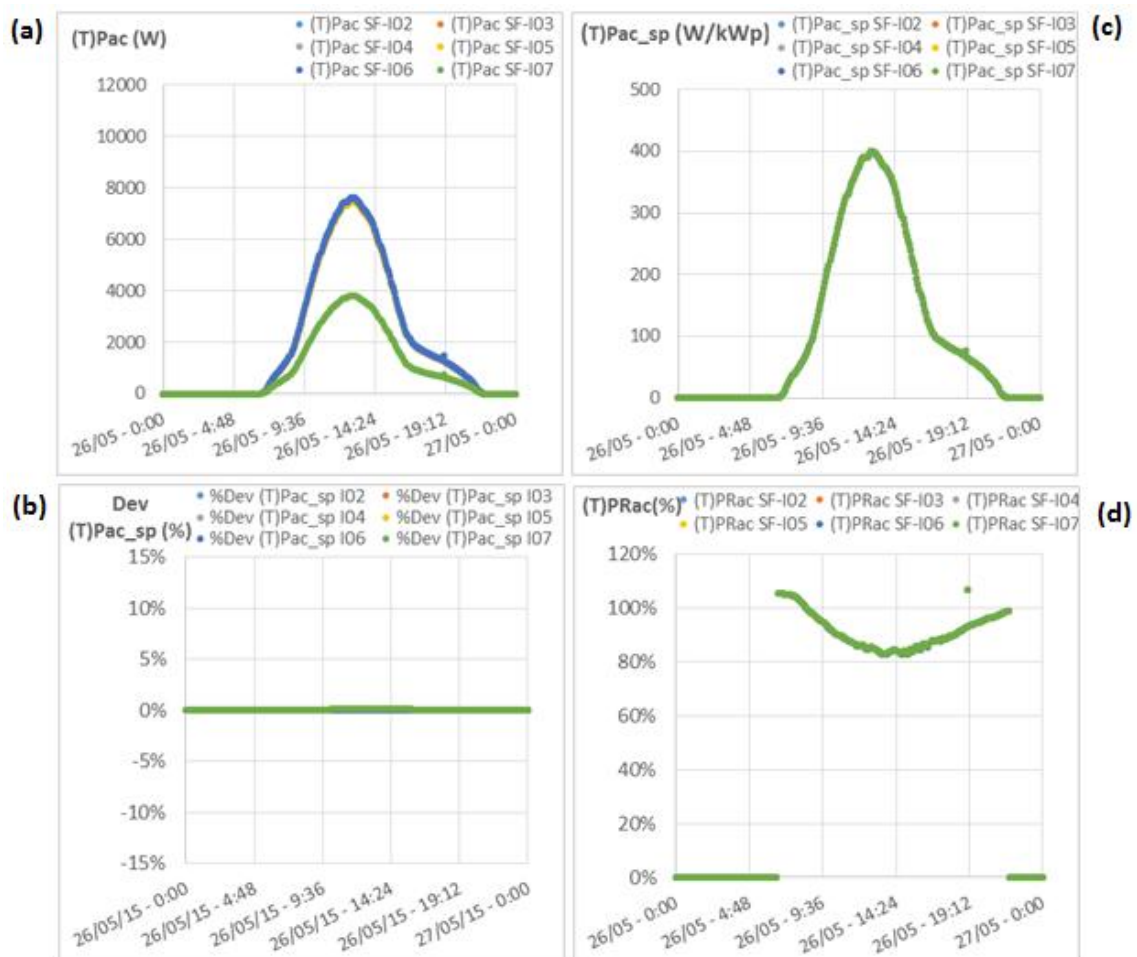


Ilustración 12 -Conjunto de graficas que representan los cálculos teóricos a la salida del inversor.

En el conjunto de graficas que se presentan en la Ilustración 12 se puede observar el análisis correspondiente a la misma etapa que el conjunto de graficas anterior, pero calculado teóricamente, la Ilustración 12(a) y la Ilustración 12(b) tienen un comportamiento similar a sus

contrapartes calculadas con datos reales, aunque se aprecia un pequeño incremento en el punto máximo de ambas, por otro lado en la Ilustración 12(c) la gráfica de la desviación de la potencia específica si tiene un comportamiento totalmente diferente, al calcularse los parámetros a partir de uno solo (irradiancia) no sufren una desviación apreciable durante el transcurso de la estructura de cálculo, en la Ilustración 12(d) el PR teórico también presenta una gran diferencia, porque a pesar que para su cálculo se considera la pérdida de temperatura, hay pérdidas para las que no se poseen datos y no son consideradas, generando la diferencia observada.

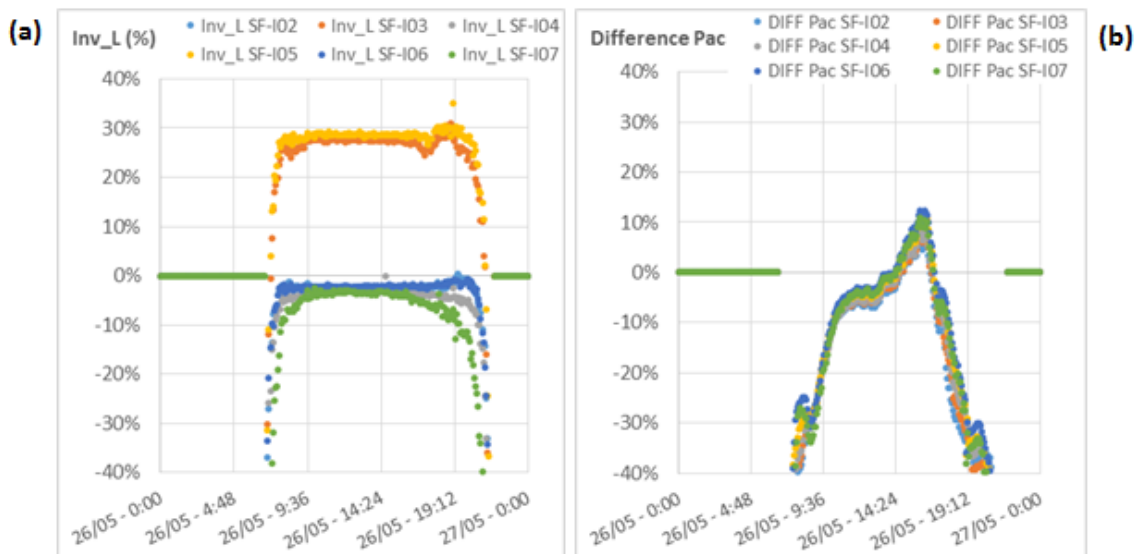


Ilustración 13–Representación gráfica de las pérdidas en el inversor y la diferencia entre los valores reales y teóricos.

En la Ilustración 13(a) se puede observar la representación gráfica de las pérdidas del inversor durante el mismo periodo de tiempo que en las gráficas anteriores, la mayoría de los inversores muestran las pérdidas esperadas, entre -2% y -3%, con pérdidas mayores al inicio y al final del día, en momentos de baja irradiancia y por lo tanto baja potencia, dos inversores se alejan en gran medida de la media, esto se debe a que los inversores SF-I03 y SF-I05 tienen una segunda entrada de corriente DC de la cual el sistema de monitorización no proporciona datos, por lo que el sistema considera que el inversor genera una ganancia del 30%. Para corregir esta falta de datos está en proceso una actualización del firmware de los inversores que permite recoger los datos de la entrada secundaria.

En la Ilustración 14 se presenta un resumen de las representaciones gráficas más importantes obtenidas en la monitorización, con una matriz de graficas es posible obtener un completo análisis del sistema. En caso de haber un fallo en estas gráficas, es posible ver la evolución temporal de todos los parámetros para hallar el error de rápidamente.

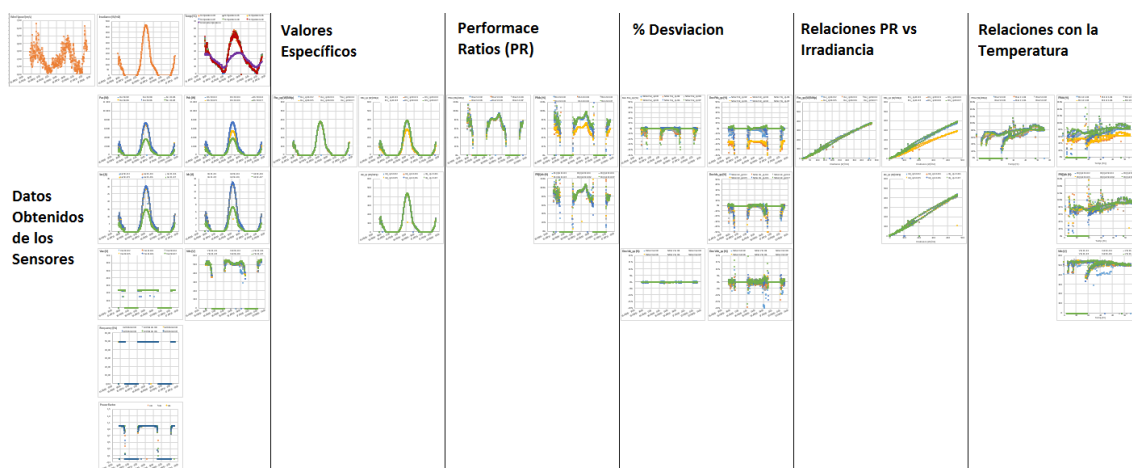


Ilustración 14 - Resumen de las gráficas más importantes.

### 4.3.- Identificación de Fallos en el Sistema

Durante la realización de este trabajo se pudo observar un ejemplo de los beneficios que proporciona una correcta monitorización en tiempo real del sistema fotovoltaico. En la Ilustración 15 se observa la medida de un PR durante un día, específicamente el 26 de mayo de 2015, donde se detectaron valores de PR anómalos, alcanzando un 200%. Una vez detectado el problema, se encontró una diferencia entre el ángulo de inclinación de los módulos y el ángulo de inclinación de la célula de referencia utilizada para medir la irradiancia en este plano, una diferencia muy pequeña en este ángulo puede introducir un gran error al análisis. Al ser detectada y corregida esta falla, se obtuvieron medidas de PR dentro del rango esperado como se pueden apreciar en la Ilustración 16.

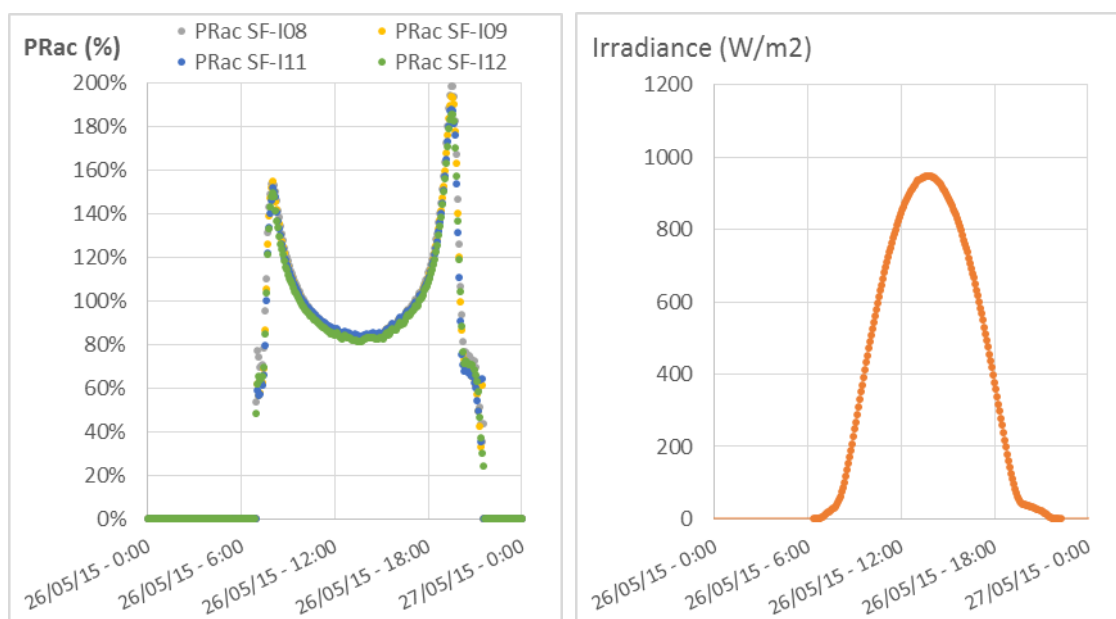


Ilustración 15 - Representación gráfica del PR y la irradiancia del día 26 de mayo 2015.

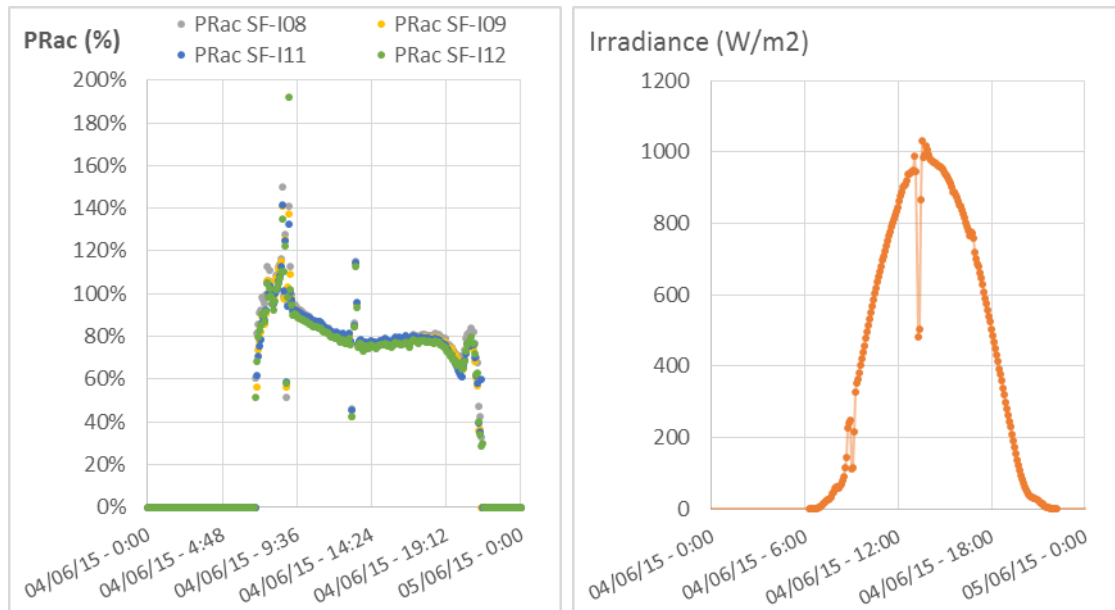


Ilustración 16 - Representación gráfica del PR y la irradiancia del día 04 de junio 2015.

Otro claro ejemplo de la importancia de una constante monitorización de las instalaciones fotovoltaicas se aprecia en la Ilustración 17 donde se observa el comportamiento de la temperatura en función del tiempo de la Zona 3 – Tejado, donde se aprecia que dos sensores tienen un comportamiento sustancialmente diferente a los demás, esto es indicativo de un problema con estos sensores, que pudiera ser desde una mala calibración, hasta una mala identificación de los mismos, perteneciendo los sensores anómalos a otra sección de la planta. Este error no se pudiera haber identificado sin ayuda de una monitorización constante.

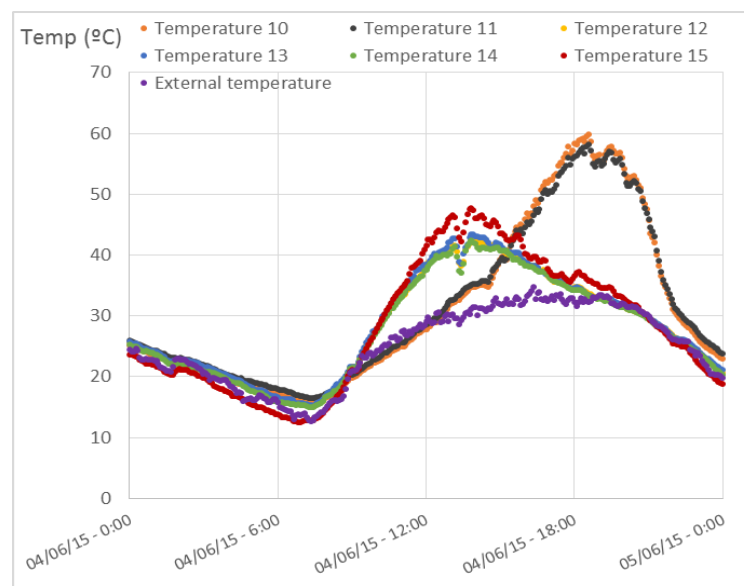


Ilustración 17 – Representación gráfica del comportamiento de los sensores de temperatura de la Zona 3 – Cubierta, durante el día 04 de junio de 2015.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta sección se dedica a enumerar las conclusiones y logros asociados al cumplimiento de los objetivos específicos del estudio:

- 1.- El esquema de monitorización propuesto cumple con los requisitos para la detección oportuna de comportamientos anómalos en el sistema, que ayudan a un mantenimiento eficiente y a maximizar la producción de energía siempre que su aplicación sea continua y correcta.
- 2.- La herramienta ofimática EXCEL se considera versátil, fiable y permite un desarrollo del esquema de cálculo que puede ser utilizado por un operador sin necesidad de conocimientos informáticos específicos.
- 3.- La estructura de cálculo en que se basa la propuesta permite el análisis de la evolución de la generación de energía de manera completa, detallada y gráfica, y cuenta con la flexibilidad suficiente para ser utilizado en cualquier análisis necesario por la empresa. Además de ser una estructura base probada capaz de adaptarse a un lenguaje de programación orientado a objetos.
- 4.- Mediante la aplicación del esquema de monitorización realizado se detectó una anomalía en los sensores de temperatura de la Zona 3 – Cubierta.
- 5.- Se detectó una desviación en la orientación del sensor de irradiancia, mediante el análisis de la evolución temporal del Performance Ratio (PR) de la Zona 3 – Cubierta, falla que fue corregida oportunamente.

A continuación se enumeran recomendaciones relativas al objetivo general del trabajo:

- 1.- Utilizar la base de datos SQL disponible en la empresa junto con un programa informático como LabView o Python que faciliten el análisis de datos, y permita trasladar la tabla de datos generada en EXCEL a la base de datos. Esto con el objetivo de controlar más eficientemente las grandes cantidades de datos producidos.
- 2.- Realizar una calibración de los sensores de temperatura de la cubierta para detectar posibles fallos en los mismos y verificar la identificación de los mismos para descartar errores de ubicación.
- 3.- Monitorizar periódicamente el sistema y realizar las calibraciones o ajustes necesarios en base a los comportamientos observados.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. **Papadopoulou, Elena V. M.** *Photovoltaic Industrial Systems. An Environmental Approach.* Berlin : Springer, 2011. ISBN 978-3-642-16300-5.
2. **Häberlin, Heinrich.** *Photovoltaics. System Design and Practice.* West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons Ltd, 2012. ISBN 978-1-119-99285-1.
3. **International Energy Agency.** *Trends 2014 in Photovoltaic Applications.* s.l. : International Energy Agency, 2014. ISBN 978-3-906042-25-1.
4. **Luque, Antonio y Hegedus, Steven.** *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.* West Sussex, UK : John Wiley & Sons, Ltd, 2011. ISBN: 978-0-470-72169-8.
5. **Tiwari, G.N. y Dubey, Swapnil.** *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications.* Cambridge, UK : The Royal Society of Chemistry, 2010. ISBN: 978 1 84973 020 4.
6. **Mertens, Konrad.** *Photovoltaics - Fundamentals, Technology and Practice.* West Sussex, United Kindom : John Wiley & Sons Ltd., 2014. ISBN 9781118634165.
7. **Woyte, Achim, y otros.** *Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems. Good Practices for Monitoring and Performance Analysis.* s.l. : International Energy Agency, 2014. Report IEA-PVPS T13-03:2014. ISBN 978-3-906042-18-3.
8. **SMA Solar Technology AG.** *Performance ratio - Quality factor for the PV plant.* Perfratio-UEN100810.
9. **Román, José María.** *Rendimiento de instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica y su aplicación a BIPV.* País Vasco : cicNetwork Ciencia y Tecnología, nº 11, Mayo 2012. págs. 36-42. (<http://www.cicnetwork.es/revista/>).
10. **IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.** *Pliego de Condiciones Técnicas del IDAE para Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica.* Madrid : PROGENSA (Promotora General de Estudios, S.A.), 2011. ISBN: 978-84-95693-62-4.
11. **Arias, Fidias G.** *EL PROYECTO DE INVESTIGACION: Guía para su elaboración.* Caracas : Episteme, 1999. ISBN 980-07-3868-1.



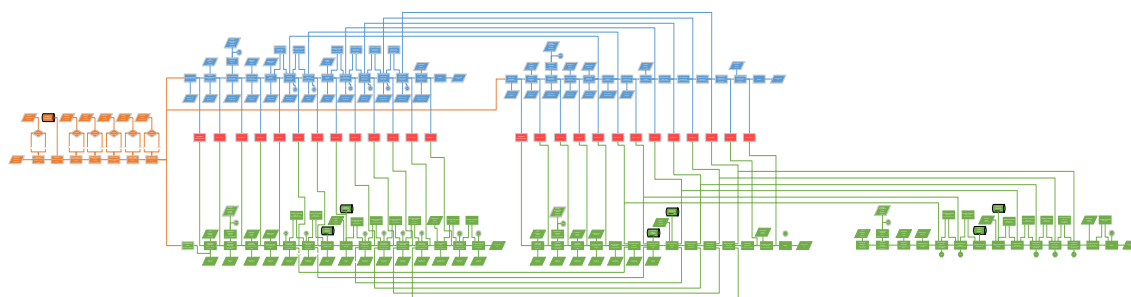
12. **Escalada, Mercedes, Fernández Soto, Silvia y Fuentes, María Pilar.** *El diagnóstico Social. Proceso de conocimiento e intervención profesional.* . Buenos Aires : Espacio Editorial, 2004.
13. **Salinas, Pedro José.** *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA.* Mérida, Venezuela : Saber ULA.
14. **Europe Sun Fields.** [En línea] [Citado el: 25 de 05 de 2015.] <http://www.sfe-solar.com/inversores-solares-fotovoltaicos/sma/sunny-tripower-10000tl-12000tl-15000tl-17000tl/>.
15. **Co, Theodor Friedrichs &.** Pyranometer CMP6, WMO class 1. [En línea] [Citado el: 01 de 06 de 2015.] <http://www.th-friedrichs.de/en/products/radiation/global-radiation/pyranometer-cmp6-wmo-class-1/>.
16. **Krauter, Stefan C.W.** *Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems. Modeling of Optical and Thermal Performance, Electrical Yield, Energy Balance, Effect on Reduction of Greenhouse Gas Emissions.* Amsterdam : Springer, 2006. ISBN 978-3-540-31345-8
17. **Irizarry-Rivera, Agustín, Colucci-Ríos, José y O'Neill-Carillo, Efraín.** *Achievable Renewable Energy Targets For Puersto Rico's Renewable Energy Portafolio Standar - Final Report.* Puerto Rico : Universidad de Puerto Rico, 2009.





## ANEXOS

### Anexo A



*Ilustración – Diagrama completo de la monitorización.*

### Anexo B



*Ilustración – Sombreado parcial en la fachada sur de la instalación fotovoltaica de Yingli Green Energy Spain.*

### ANEXO C



*Ilustración - Fachada oeste de la instalación fotovoltaica de Yingli en San Agustín de Guadalix.*





## ANEXO D

*Tabla - Otros sensores ambientales*

Tipo Sensor	Fabricante	Modelo	Características
Temperatura (Módulos)		Termopares PT-100	Recomendado a bajas temperaturas: -100°C a 200°C
Barómetro	Theodor Friedrichs & Co.	Baro Transmitter 5010.00	Rango: 300 - 1100 hPa Resolución: 0,01 hPa Precisión (-20 - 65 °C): $\pm 1$ hPa
Dirección Viento	Theodor Friedrichs & Co.	Wind direction sensor 4123.00	Rango: 360° Carga Máxima: 100 m/s
Velocidad Viento	Theodor Friedrichs & Co.	Wind speed sensor 4035.00	Rango: 0 - 70 m/s Carga Máxima: 100 m/s Precisión: $\pm 0,2$ m/s; a $v > 15$ m/s
Pluviómetro	Theodor Friedrichs & Co.	Precipitation pulse transmitter 7051.00	Área: 200 cm <sup>3</sup> Rango: 0 - 15 mm/min Precisión: $\pm 3\%$ hasta 4 mm/min
Sensor Humedad y Temperatura Ambiente	Theodor Friedrichs & Co.	Combined Temperature/ Humidity Sensor in shelter 3031.00	Sensor Humedad: Capacitive element Rango: 0 - 100 % rH Sensor Temperatura: Pt100