

UNIVERSIDAD DE
ZARAGOZA

CENTRO
POLITÉCNICO
SUPERIOR

TAMPEREEN
TEKNILLINEN
YLIOPISTO



PROYECTO FIN DE CARRERA

MEASURING ACTUAL OPERATING CONDITIONS OF A PHOTOVOLTAIC GENERATOR

Autor: **TORRES LOBERA, Diego**

Director: **Prof. VALKEALAHTI, Seppo**

Ponente: **DOMÍNGUEZ NAVARRO, José Antonio**

Department of Electrical Energy Engineering

Tampere University of Technology

Ingeniería Industrial

Especialidad de Sistemas Eléctricos

Curso Académico 2010–2011

DICIEMBRE 2010

A mis padres y mi hermano,

MEASURING ACTUAL OPERATING CONDITIONS OF A PHOTOVOLTAIC GENERATOR

TORRES LOBERA, Diego

Proyecto Fin de Carrera

Curso 2010-2011

ABSTRACT

Los módulos fotovoltaicos (FV) están compuestos por células conectadas, normalmente, en serie que transforman la energía solar (directa y difusa) en energía eléctrica. Varios factores afectan a la potencia generada por estos dispositivos, como la temperatura de operación, la radiación solar incidente y la distribución espectral de la misma. Si bien, el resto de variables atmosféricas que influyen sobre la temperatura de los módulos, como la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad y dirección del viento, deben ser asimismo estudiadas.

En este Proyecto Fin de Carrera se ha diseñado un sistema state-of-the-art de medición de las condiciones atmosféricas y de operación de la planta de generación solar fotovoltaica de la TUT. El sistema está compuesto por una estación meteorológica automática de precisión, en paralelo con una extensa malla de sensores, de radiación solar y de temperatura de los módulos, localizados a lo largo de toda la instalación fotovoltaica. En primer lugar, se han estudiado los instrumentos de medición necesarios, junto con diferentes arquitecturas de sistema para realizar la adquisición de datos con el fin de comprender las técnicas de medición y las posibles soluciones para el problema. Por otro lado, ha sido necesario realizar un estudio de mercado para seleccionar los sensores y dispositivos que más se ajustasen al sistema deseado.

Por otra parte, en este PFC se ha implementado un modelo térmico de los módulos fotovoltaicos en MatlabTM Simulink para analizar la influencia de las variables meteorológicas sobre las condiciones de operación y el rendimiento de los módulos y strings FV. Las simulaciones muestran una clara dependencia de la temperatura de operación sobre la temperatura ambiente, velocidad del viento y condiciones de irradiancia. Con respecto a la potencia generada y a la eficiencia de los strings, incrementos en la temperatura ambiente y velocidad del viento provocan un efecto negativo y positivo respectivamente.

Las medidas de temperatura de los módulos e irradiancia recibida por éstos muestran la aparición de un retraso entre ambas curvas debido a la inercia térmica de los módulos. Este fenómeno no se ha considerado en el modelo térmico, el cual aproxima la temperatura de operación en estado estacionario, por lo que se producen errores entre las medidas y las simulaciones de temperatura de los módulos, al igual que en el caso

del rendimiento de los strings fotovoltaicos. Si bien, los resultados obtenidos confirman el correcto comportamiento del modelo térmico y los sistemas de medida utilizados.

Este Proyecto Fin de Carrera se ha realizado en el Department of Electrical Energy Engineering de la Tampere University of Technology y su supervisor principal ha sido el Prof. Seppo Valkealahti.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero mostrar mi agradecimiento al Prof. Seppo Valkealahti, el supervisor principal de este proyecto en la Tampere University of Technology, por su continua colaboración e interés mostrado. También quiero agradecer al Dr. Tommi Keikko y a Ansi Mäki su ayuda, ya que sin ella este proyecto no se habría logrado. Asimismo, quiero destacar a mis colegas del Department of Electrical Energy Engineering, quienes me han hecho sentir como en casa pese a las dificultades derivadas del idioma y las culturales. Indudablemente, quiero dar las gracias a José Antonio Domínguez Navarro por haber aceptado ser mi ponente y por su ayuda a pesar del corto tiempo ante la fecha límite de entrega.

Querría poder agradecer a todos los compañeros y amigos que me han acompañado durante esta etapa, ya fuera a 500 ó 3000 Km de distancia, sobre todo a los Pep y compañía, a mis compañeros de piso de Zaragoza, Albert, Nuria y Jose, junto con Marta y Sara (que es como si lo fueran), a Rubén, por apoyarme cuando me hacía falta, a Tania, por tu soporte lingüístico, a Daniela, y a toda la buena gente que he conocido en Tampere empezando por Modesto, Imanol, Adèle, Javi, Jenni, Andreas, Quique, etc. Como digo, me gustaría nombraros a todos pero necesitaría varias páginas para hacerlo.

Por último, me gustaría agradecer a mi familia en general por preocuparse de mi estancia en Tampere. Y, especialmente, nombrar a mis padres y a mi hermano, a quienes estoy muy agradecido por el sacrificio que ha supuesto el permitirme estudiar en el extranjero, por animarme en momentos duros y apoyarme en cada decisión tomada durante estos últimos años.

Gracias a todos, thank you, kiitos!

Zaragoza, Diciembre 2010

Diego Torres Lobera
dtorreslobera@gmail.com

INDICE GENERAL

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 1 |
| 2. | Sensibilidad atmosférica en generadores fotovoltaicos | 4 |
| 2.1. | Introducción | 4 |
| 2.2. | Modelado de un generador fotovoltaico | 4 |
| 2.2.1. | Modelo de un generador fotovoltaico en MATLAB™ Simulink..... | 4 |
| 2.2.2. | Modelo MATLAB™ Simulink de la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos | 6 |
| 2.3. | Efecto de las variables atmosféricas sobre la temperatura de operación de módulos fotovoltaicos | 9 |
| 2.4. | Efecto de las variables atmosféricas sobre la eficiencia de módulos fotovoltaicos..... | 11 |
| 3. | Sistema de medición atmosférica de la TUT | 16 |
| 3.1. | Introducción | 16 |
| 3.2. | Planta de generación de energía solar fotovoltaica de la TUT..... | 17 |
| 3.3. | Diseño del sistema de medición atmosférica | 18 |
| 3.3.1. | Consideraciones del sistema | 18 |
| 3.3.2. | Estación meteorológica automática..... | 19 |
| 3.3.3. | Sistema de monitorización de condiciones de operación..... | 21 |
| 3.4. | Estación meteorológica automática..... | 22 |
| 3.5. | Sistema de monitorización de las condiciones de operación | 25 |
| 3.6. | Sistema de adquisición de datos..... | 27 |
| 3.7. | Presupuesto | 28 |
| 4. | Testeo de los sensores y módulos Fotovoltaicos | 30 |
| 4.1. | Introducción | 30 |
| 4.2. | Medición de las condiciones de operación..... | 32 |
| 4.3. | Medidas de potencia y rendimiento de los strings | 35 |
| 5. | Conclusiones | 38 |
| | Referencias..... | 41 |
| | Anexo A | 44 |

NOTACIÓN Y GLOSARIO DE SIGLAS

Notación

| | |
|---------------|---|
| A | Área |
| G | Irradiancia |
| G_T | Irradiancia recibida por los módulos |
| G_{NOCT} | Irradiancia en condiciones NOCT |
| I | Corriente |
| I_{SC} | Corriente de cortocircuito |
| P | Potencia |
| P_M | Potencia máxima |
| T | Temperatura |
| T_a | Temperatura ambiente |
| $T_{a, NOCT}$ | Temperatura ambiente en condiciones NOCT |
| T_{MOD} | Temperatura de los módulos |
| T_{NOCT} | Temperatura NOCT |
| T_{ref} | Temperatura de referencia |
| v_w | Velocidad del viento local |
| V | Voltaje |
| V_{OC} | Voltaje de circuito abierto |
| α | Absorción solar de la capa FV |
| β_{ref} | Coefficiente de corrección de eficiencia por temperatura en los módulos |
| τ | Transmitancia del cristal |
| ω | Coefficiente de montaje de los módulos |
| λ | Longitud de onda de un fotón |

Glosario de siglas

| | |
|-------|-----------------------------------|
| AEMET | Agencia Estatal de Meteorología |
| AC | Corriente alterna |
| CPU | Unidad de proceso central |
| DAQ | Adquisición de datos |
| DC | Corriente directa |
| EM | Estación meteorológica |
| EMA | Estación meteorológica automática |
| FV | Fotovoltaico |
| NI | National Instruments |
| NOC | Normal operating conditions |

| | |
|------|---|
| NOCT | Normal operating conditions temperature |
| PC | Personal computer |
| RTD | Electrical resistance thermometer |
| STC | Standard test conditions |
| TUT | Tampere University of Technology |
| WMO | World Meteorological Organization |

1. INTRODUCCIÓN

La humanidad ha tenido siempre la necesidad de proveerse de fuentes de energía y, en muchas ocasiones, ésta ha sido la energía proveniente del sol. El carbón, petróleo y gas, que suponen las fuentes de energía más utilizadas mundialmente, provienen de plantas de producción que necesitan el sol para realizar sus funciones vitales. Y es, especialmente en estos días en los que existe una preocupación a nivel mundial por el desaforado consumo de las reservas de combustibles fósiles, además de la contaminación producida por su uso, cuando la comunidad científica y tecnológica está centrada en el aprovechamiento de fuentes de energía renovables que reemplacen al petróleo en un futuro energético sostenible como son la energía eólica y la energía solar.

La utilización de sistemas que aprovechan la energía procedente del sol presenta numerosas ventajas frente a otras fuentes de energía. El sol es una fuente de luz y calor prácticamente inagotable cuya energía es relativamente fácil de aprovechar mediante tecnología solar. La cual, además, representa un amplio campo cuyo desarrollo se encuentra todavía en proceso de crecimiento. Es posible producir energía eléctrica a partir de energía solar y las propiedades de ciertos compuestos presentan las características adecuadas para proveer energía a pequeñas instalaciones con relativamente pequeños sistemas de generación solar. Asimismo, se pueden construir colectores solares para producir vapor, el cual hará funcionar generadores eléctricos.

El efecto fotovoltaico (FV) fue descubierto por Alexandre-Edmond Becquerel en el 1839, pero los sistemas basados en dicho fenómeno todavía producen una pequeña porción de la energía que reciben. [15] Las células fotovoltaicas transforman la energía de cualquier tipo de radiación solar global, directa o difusa, en energía eléctrica y, normalmente, se conectan en serie o en paralelo formando módulos fotovoltaicos. Sin embargo, los generadores FV todavía no son económicamente rentables para aplicaciones a gran escala, por lo que sólo se han construido durante estos últimos años gracias a la ayuda de subvenciones estatales. Por lo tanto, el desarrollo de sistemas fotovoltaicos más eficientes en cuanto a potencia generada resulta esencial. [13]

El Department of Electrical Energy Engineering de la Tampere University of Technology ha diseñado e instalado una planta de generación solar fotovoltaica compuesta por 69 módulos NP195Kg [18] sobre el tejado del edificio de dicho departamento. El objetivo de esta instalación, diseñada para fines de investigación, es operar conectada a red y permitir el desarrollo de diversas líneas de investigación como: el estudio del efecto de las variables atmosféricas sobre el rendimiento y la potencia de los sistemas FV o el testeo y evaluación de sistemas electrónicos de potencia relacionados con ellos.

La potencia generada por los módulos FV se ve afectada por varios factores como la temperatura de operación de éstos, la irradiancia recibida y la distribución espectral de la misma. [17] Particularmente, la temperatura de operación representa un papel esencial en el proceso fotovoltaico ya que, tanto la eficiencia eléctrica como la potencia generada dependen de ella, viéndose disminuidas ante un aumento de ésta. [21] En consecuencia, se deben estudiar también los parámetros atmosféricos que influyen sobre la temperatura de operación por lo que resulta necesario un sistema de medición de las condiciones atmosféricas y de operación bajo las que opera la instalación fotovoltaica.

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es diseñar un sistema de medición capaz de registrar los parámetros mencionados y, para ello, se ha desarrollado un sistema de medición atmosférica state-of-the-art en paralelo con una extensa malla de sensores de radiación solar y temperatura de operación de los módulos. La primera parte del sistema consiste en una estación meteorológica automática que incluye medidas de radiación solar global y difusa de precisión; mientras que, en la segunda las condiciones de operación de cada string fotovoltaico se obtienen mediante la mencionada malla de sensores.

El diseño de estos sistemas se fundamenta en un amplio y especializado material publicado como la Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [13] en la que se establece la precisión necesaria de los sensores a utilizar, así como los métodos de medición a seguir. Por otro lado, se han estudiado diversas instalaciones ya operativas y se ha realizado un amplio estudio de mercado coleccionando los sensores e instrumentos que se adecuan a los requisitos especificados. En lo que respecta al diseño del sistema de adquisición de datos, se han analizado diferentes posibles arquitecturas de éstos que se ajustan a las necesidades de los sistemas de medida.

Por otro lado, se ha desarrollado un modelo térmico de los módulos con el software MatlabTM Simulink y se han realizado diferentes simulaciones. Este modelo, que aproxima la temperatura de operación a partir de las condiciones atmosféricas, se ha empleado tanto para estudiar la influencia de éstas sobre la temperatura de operación, como para completar un modelo del generador fotovoltaico desarrollado previamente por el grupo de investigación. De esta forma se han podido realizar simulaciones y caracterizar teóricamente strings fotovoltaicos bajo diferentes condiciones atmosféricas.

Por último, se han realizado una serie de medidas de potencia sobre los strings con el fin de caracterizar los strings reales en diferentes días, con diferentes condiciones meteorológicas, y comparar con los resultados teóricos obtenidos a través de las simulaciones.

Esta memoria está dividida en varios capítulos centrados en los tres puntos descritos. El Capítulo 2 presenta el modelo desarrollado y estudia los efectos de las variables atmosféricas sobre la temperatura de operación de los módulos y las características de rendimiento de los strings fotovoltaicos. El Capítulo 3 describe el proceso de diseño de los sistemas de medición y presenta el diseño final junto con su presupuesto. En el Capítulo 4 se exponen las medidas y simulaciones realizadas. Y, por último, el Capítulo 5 recoge las conclusiones de este proyecto.

Es importante destacar que en el Anexo A se incluye la versión en inglés de la Master of Science Thesis realizada y aprobada en la Tampere University of Technology. En ella se desarrollan los aspectos teóricos que no se han incluido en esta memoria y se presentan con mayor detalle los capítulos que la componen. El Capítulo 2 describe las generalidades de los sistemas fotovoltaicos, principio de funcionamiento, diferentes topologías de conexión y caracterización de los mismos. En el Capítulo 3 se recopila la información sobre las características y requisitos que deben cumplir los sensores a utilizar, así como los métodos de medición de cada variable atmosférica y las diferentes posibles arquitecturas de los sistemas de adquisición de datos. Por otro lado, los demás capítulos se corresponden con los presentados en esta memoria.

Este Proyecto Fin de Carrera se ha realizado en el Department of Electric Energy Engineering de la Tampere University of Technology en Finlandia.

2. SENSIBILIDAD ATMOSFÉRICA EN GENERADORES FOTOVOLTAICOS

2.1. Introducción

Cambios producidos en las condiciones de operación afecta al funcionamiento de los generadores fotovoltaicos (FV) y, a su vez, estas condiciones de operación se ven afectadas por diferentes variables atmosféricas. Por ello, el objetivo de este capítulo es estudiar el efecto de dichas variables meteorológicas sobre la temperatura de operación de los módulos FV, así como sobre el rendimiento de los mencionados generadores. Un modelo de generador fotovoltaico y otro modelo térmico de los módulos, ambos desarrollados en Simulink, permiten llevar a cabo un set de simulaciones orientadas a analizar dichos efectos. Este capítulo está organizado como se detalla a continuación.

La Sección 2.2.1 presenta el modelo Simulink desarrollado por Mäki [13] y adaptado para estudiar el efecto de las condiciones atmosféricas sobre strings PV. La Sección 2.2.2 describe el modelo térmico desarrollado en Simulink para calcular la temperatura de operación de los módulos FV a partir de las condiciones atmosféricas de temperatura ambiental, velocidad de viento e irradiancia. En la Sección 2.3 se presenta el análisis del efecto de dichas condiciones sobre los strings FV. Y, finalmente, en la Sección 2.4 se estudia el efecto de las citadas condiciones atmosféricas en el rendimiento de los strings.

Este capítulo se corresponde con el Capítulo 4 del Anexo A. Sin embargo, para su mejor comprensión, se recomienda la lectura previa del Capítulo 2 del Anexo A. En éste se describen y estudian los sistemas fotovoltaicos y sus componentes, principios de funcionamiento, posibles configuraciones y los parámetros eléctricos de rendimiento.

2.2. Modelado de un generador fotovoltaico

2.2.1. Modelo de un generador fotovoltaico en MATLAB™ Simulink

El modelo de generador utilizado se basa en el desarrollado por Anssi Mäki en su Master of Science Thesis “Topology of a Silicon-Based Grid-Connected Photovoltaic Generator”. [13] En esta sección, dicho modelo se describe brevemente. Para una descripción más detallada, consultar la Sección 4.2 del Anexo A.

Dicho modelo está compuesto por módulos FV conectados en serie modelados de acuerdo a las ecuaciones presentadas por Villava et al. [25], quien utiliza el modelo de

1-diodo para las células fotovoltaicas con un diodo de bypass conectado en paralelo descrito en la Sección 2.2.1 del Anexo A. El modelo de módulo FV con diodo de bypass programado en Simulink se muestra en la Figura 4.1 del Anexo A.

El modelo utilizado para las simulaciones se ha diseñado de acuerdo con el sistema construido en el Department of Electrical Energy Engineering de la Tampere University of Technology. Éste, se encuentra ubicado sobre el tejado del departamento y está compuesto por varios strings de módulos. Para las simulaciones se ha considerado un string de 17 módulos conectados en serie, los cuales están formados, a su vez, por 54 células fotovoltaicas de silicio policristalino conectadas en serie. La potencia máxima generada por cada módulo es 190 W y la corriente de cortocircuito y voltaje en circuito abierto son 8.02 A y 33.1 V respectivamente. [18] La Figura 2.1 ilustra el modelo de generador FV utilizado para las simulaciones.

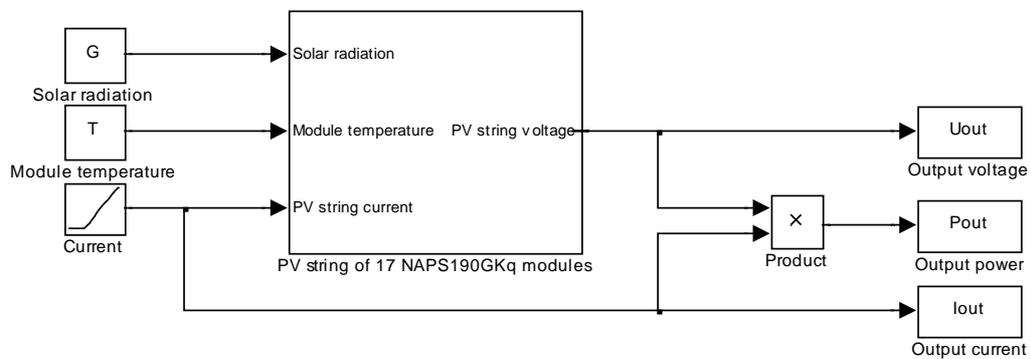


Figura 2.1. Modelo Simulink del string fotovoltaico compuesto por 17 módulos conectados en serie.

La Figura 2.2 muestra las características I-V y P-V simuladas de un string de 17 módulos en condiciones estándar de test (STC): 1000 W/m^2 y 25°C .

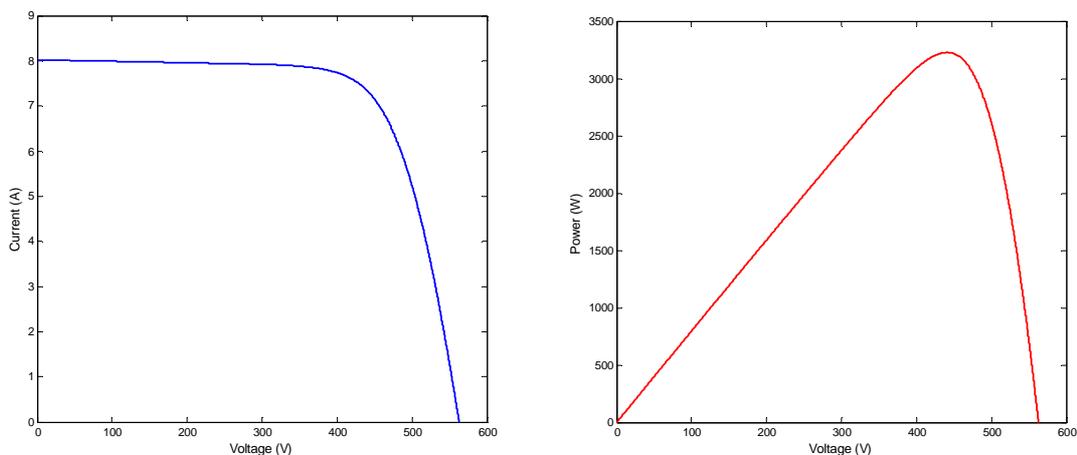


Figura 2.2. Curvas I-V y P-V simuladas bajo condiciones STC de un string compuesto por 17 módulos NP190Kg conectados en serie.

2.2.2. Modelo MATLAB™ Simulink de la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos

Como se explica en la Sección 2.4 del Anexo A, las condiciones de operación afectan al funcionamiento de los módulos solares, tanto al rendimiento, como la potencia generada por los mismos. [21] Por ello, ambos parámetros son variables de entrada en el modelo descrito en la sección anterior.

Precisamente, debido a la significativa influencia de la temperatura de los módulos sobre la potencia generada y la eficiencia de los módulos, el objeto de esta sección es proponer un modelo térmico del módulo. Éste, permitirá predecir, con la mayor precisión posible, la temperatura de operación a partir de unas determinadas variables atmosféricas. Así, basándose en las condiciones de irradiancia, velocidad del viento, temperatura ambiental, etc., será posible calcular las condiciones de operación del sistema FV.

Es posible encontrar una amplia literatura [2, 3 10, 16] acerca de los procesos de transferencia térmica en los módulos FV. Sin embargo, el diseño del presente modelo térmico se fundamenta en el desarrollado por Skoplaki et al. [21]. El cual está basado en un modelo de 3 variables y considera la radiación solar, temperatura ambiental y velocidad del viento como las variables meteorológicas más influyentes sobre el comportamiento de los módulos FV. Otros parámetros, como la dirección del viento y la humedad relativa, no presentan una gran influencia sobre las condiciones de operación de los paneles fotovoltaicos. [23] Skoplaki et al. [21] centran el desarrollo del modelo en el estudio de las transferencias de calor producidas mediante conducción y convección en las partes frontal y trasera de los módulos. Tras algunas aproximaciones metodológicas, los autores emplean la temperatura NOC (NOCT) para formular la dependencia de la temperatura de operación de los módulos FV, T_{MOD} , con la radiación solar, temperatura ambiental y velocidad del viento como

$$T_{MOD} = \frac{T_a + \left(\frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) \left(\frac{h_{w,NOCT}}{h_w} \right) (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[1 - \frac{\eta_{ref}}{(\tau\alpha)} (1 + \beta_{ref} T_{ref}) \right]}{1 - \left(\frac{\beta_{ref} \eta_{ref}}{(\tau\alpha)} \right) \left(\frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) \left(\frac{h_{w,NOCT}}{h_w} \right) (T_{NOCT} - T_{a,NOCT})}, \quad (2.1)$$

donde, T_a es la temperatura ambiental, T_{NOCT} es la temperatura del modulo bajo condiciones NOC, T_{ref} es la temperatura de referencia, $T_{a,NOCT}$ es la temperatura ambiental bajo condiciones NOC, G_{NOCT} es la irradiancia en condiciones NOC, G_T es la irradiancia recibida por el módulo, h_w es el coeficiente de transferencia de calor por convección, $h_{w,NOCT}$ es el coeficiente de convección bajo condiciones NOC, τ es la transmitancia del cristal, α es la absorción solar de la capa FV, η_{ref} es la eficiencia eléctrica a T_{ref} y β_{ref} es el coeficiente de corrección de eficiencia por temperatura.

La Ecuación 2.1 representa una expresión general para la temperatura de operación despreciando las perdidas por radiación. Tras tener en cuenta varios efectos de

conversión y montaje se puede reducir la Ecuación 2.1 a la siguiente ecuación semi empírica

$$T_c = T_a + \omega \left(\frac{0.32}{8.91 + 2.0 \frac{v_w}{0.67}} \right) G_T, \quad (2.2)$$

donde ω es el coeficiente de montaje y v_w es la velocidad de viento local en m/s. En el caso que nos ocupa, el sistema instalado en el tejado del departamento ha sido montado como “free standing” sobre un tejado plano, por lo que el coeficiente de montaje es 1. La Figura 2.3 muestra el diagrama de bloques de Simulink del modelo térmico basado en la Ecuación 2.2 con $\omega=1$. Para más detalle sobre el tratamiento matemático de la Ecuación 2.1 consultar la Sección 4.2.2 del Anexo A.

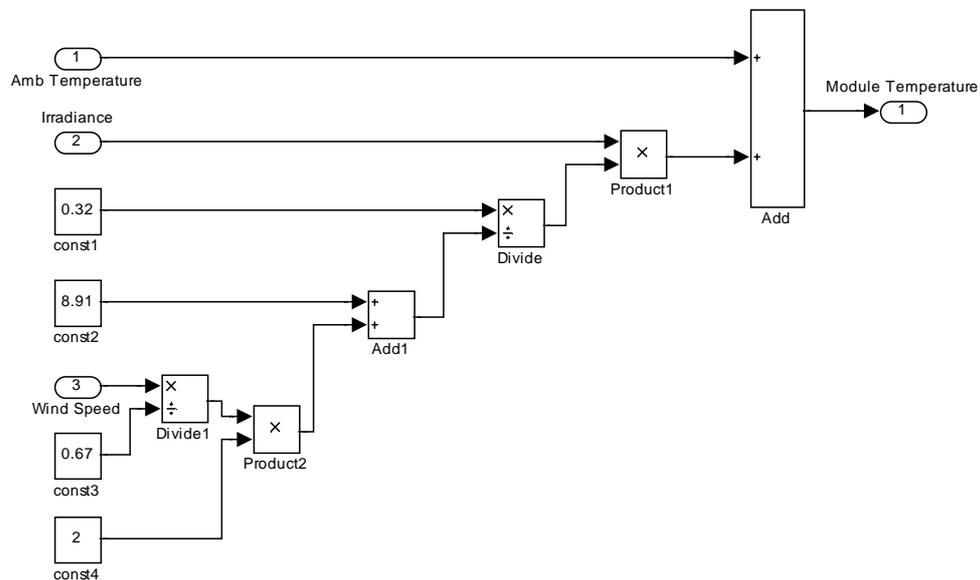


Figura 2.3. Diagrama de bloques Simulink del modelo térmico de los módulos FV.

Los efectos de las variables atmosféricas sobre la temperatura de operación se muestran en las Figuras 2.4 y 2.5. Los datos registrados se han obtenido de un sistema de medida del Department of Electronics, el cual se encuentra en el tejado del departamento y esta compuesto por un módulo FV de silicio policristalino de 125 W. Se ha monitorizado la temperatura del módulo, así como varias variables atmosféricas como temperatura ambiental, irradiancia y velocidad de viento. El set de datos utilizado para este análisis se adquirió el 1 de junio de 2008, registrando datos cada 20 segundos.

En la Figura 2.4 se muestran el nivel de irradiancia, la temperatura ambiental y la temperatura de operación del módulo calculada. Se puede apreciar como los picos de la temperatura del módulo coinciden con los valores máximos de irradiancia.

Las señales monitorizadas de velocidad de viento y temperatura de operación, junto con la temperatura calculada, se muestran en la Figura 2.5. En ella, se puede comprobar

el correcto funcionamiento de la aproximación utilizada para calcular la temperatura de operación del módulo ya que el error producido es de, aproximadamente, 3 °C. [21]

Es remarcable que el modelo térmico presenta un mejor comportamiento con valores de velocidad de viento superiores a 3 m/s. Para condiciones de viento inferiores, el error entre la temperatura calculada y medida se incrementa algunos grados. Esto se debe al hecho de que la aproximación propuesta en [21] ignora la convección libre, la cual baja es para altas velocidades de viento; así como la radiación del módulo, que es relevante para bajas velocidades de viento.

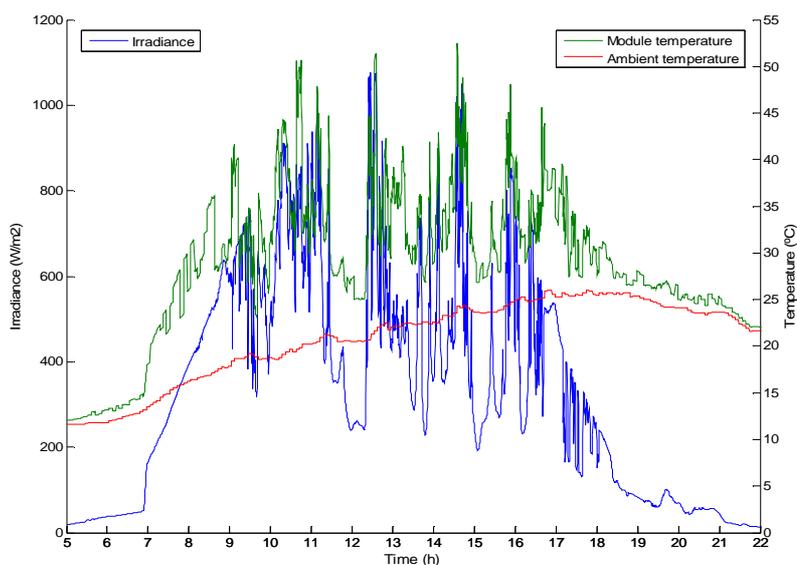


Figura 2.4. Efecto de la irradiancia y temperatura ambiental sobre la temperatura del módulo calculada.

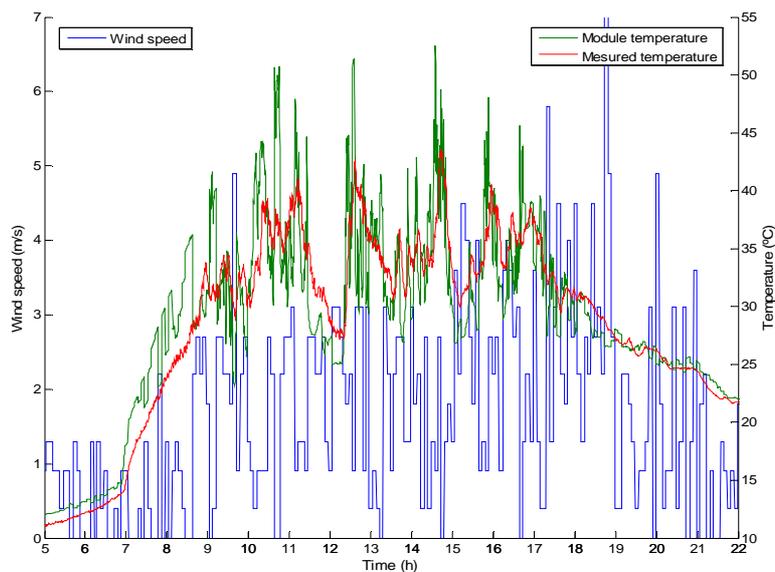


Figura 2.5. Comparación entre la temperatura del módulo calculada mediante el modelo térmico, la temperatura medida y la velocidad del viento.

Por último, la inserción del modelo térmico en el modelo del generador FV se muestra en la Figura 2.6

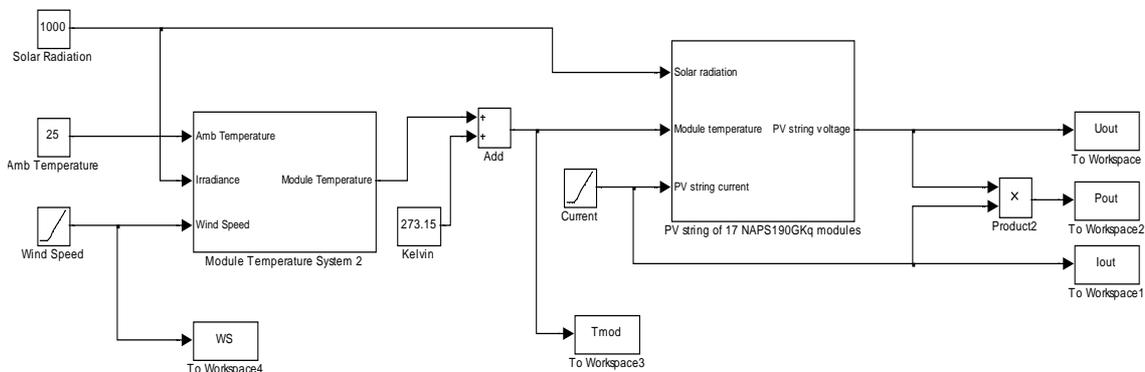


Figura 2.6. Modelo Simulink del generador FV incluyendo el modelo térmico de los módulos FV.

2.3. Efecto de las variables atmosféricas sobre la temperatura de operación de módulos fotovoltaicos

Cambios producidos en las condiciones de funcionamiento afectan significativamente a los generadores fotovoltaicos. [12] A continuación, dicho efecto se estudia mediante simulaciones realizadas utilizando el modelo térmico descrito en la sección anterior. El objeto de este set de simulaciones es conocer los límites que alcanza la temperatura de los módulos para valores típicos de temperatura ambiental, irradiancia y velocidad del viento en Finlandia. Por otro lado, se estudia el efecto de las variables atmosféricas sobre el comportamiento de los módulos fotovoltaicos analizando las características eléctricas del modelo de generador FV. Para ello se grafican las curvas I-V y P-V y se calculan la potencia generada y la eficiencia del sistema para tres casos diferentes.

Los resultados de las simulaciones orientadas a evaluar el efecto de las variables atmosféricas sobre la temperatura de operación de los módulos se muestran en forma de gráficas en las Figuras 2.7 a 2.9. El efecto producido por una variación de la temperatura ambiente (Figura 2.7) resulta directamente proporcional a dicha variación como podía extraerse de la Ecuación 2.6. Así, la diferencia entre las temperaturas de operación y ambiente es siempre positiva y depende de las condiciones de viento e irradiancia. La temperatura ambiente se ha variado desde $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores muy habituales en Finlandia durante la mayor parte del año.

Para estudiar el efecto de la variación de velocidad de viento sobre la temperatura de operación se proponen dos simulaciones diferentes. La primera consiste en fijar la temperatura ambiente en $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y simular con valores de irradiancia de 400 W/m^2 , 600 W/m^2 y 800 W/m^2 . A continuación, se fija el nivel de irradiancia a 600 W/m^2 y se varía la temperatura ambiente a valores de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, el rango de

variación de velocidad es de 1 m/s a 12 m/s para todos los casos. Los resultados se muestran en la Figura 2.8.

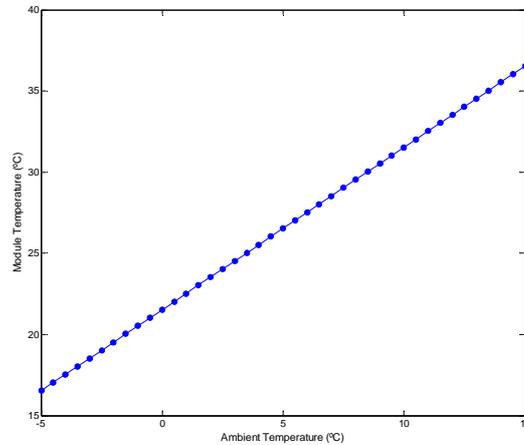


Figura 2.7. Simulación del efecto de la variación de temperatura ambiente sobre la temperatura de operación del módulo FV para valores fijos de velocidad de viento 1 m/s e irradiancia de 800 W/m^2 .

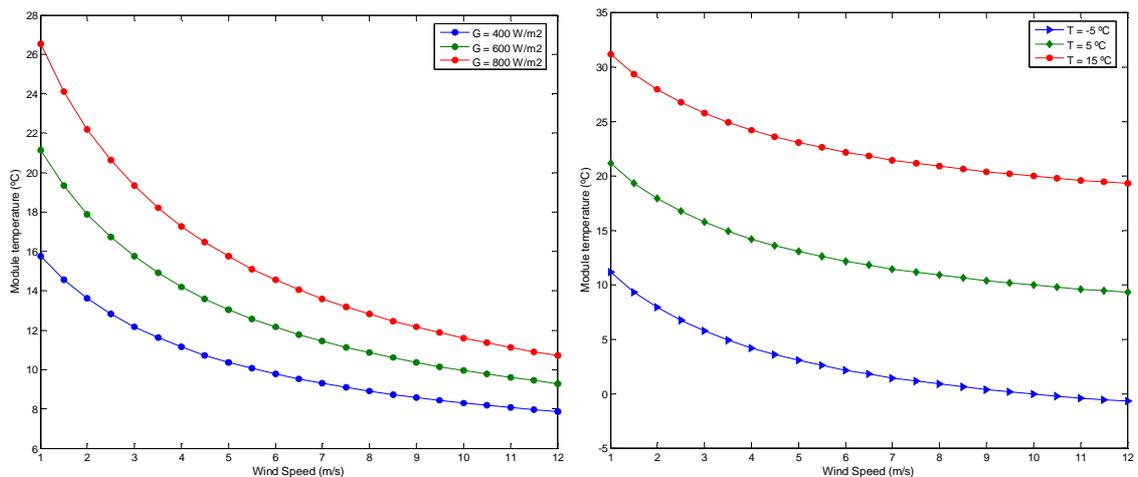


Figura 2.8. Simulación del efecto de la variación de velocidad de viento sobre la temperatura de operación para los valores de irradiancia y temperatura ambiente dados.

Como resulta predecible, variaciones de la velocidad de viento son inversamente proporcionales a la variación producida en la temperatura de operación. Esto se debe a que un aumento de la velocidad del viento incrementa los procesos de convección en los módulos. Al estudiar la influencia de la velocidad del viento y temperatura ambiente las curvas de T_{MOD} son paralelas y con la misma diferencia entre ellas que la dada entre los valores de temperatura ambiente. Sin embargo, respecto a la influencia de la velocidad del viento y radiación solar, ésta es mayor para elevados niveles de irradiancia. A 400 W/m^2 , la variación de temperatura de operación es aproximadamente 8 °C en el

rango de 1 a 11 m/s; mientras que para 800 W/m^2 , la variación de temperatura es de $16 \text{ }^\circ\text{C}$.

El efecto producido por la variación en la irradiancia recibida por el módulo fotovoltaico se muestra en la Figura 2.9. Al igual que en el caso anterior, se han realizado dos simulaciones: por un lado, la temperatura ambiente está fijada en $5 \text{ }^\circ\text{C}$ mientras que por otro lado, la velocidad de viento está fijada en 3 m/s . La primera simulación estudia la influencia de la irradiancia y velocidad de viento para valores de 3 m/s , 6 m/s y 9 m/s , mientras que la segunda estudia la influencia de la irradiancia combinada con la temperatura ambiente. Para ambos casos los valores de irradiancia se encuentran entre 200 W/m^2 y 1200 W/m^2 .

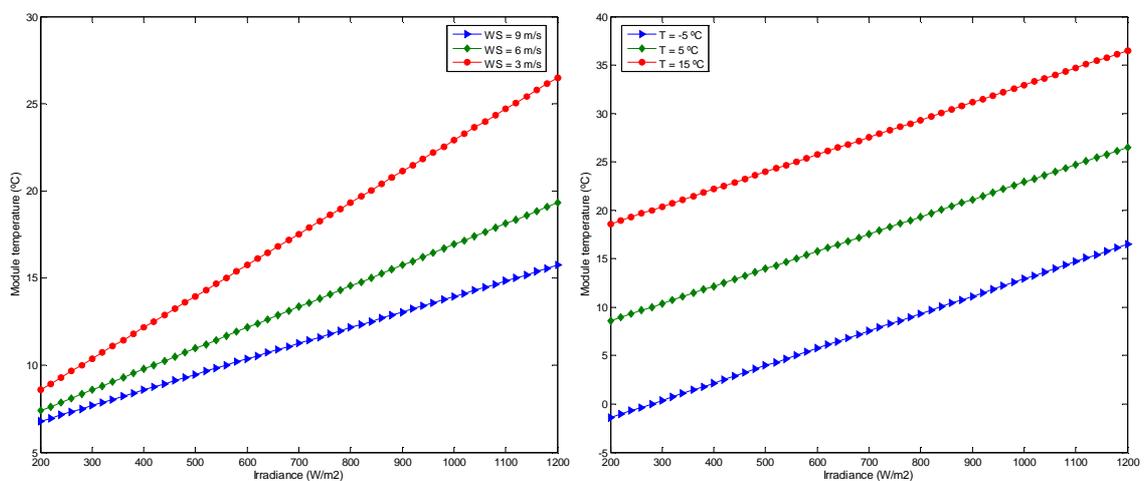


Figura 2.9. Simulación del efecto de variar la irradiancia sobre la temperatura de operación para los valores de velocidad de viento y temperatura ambiente dados.

La variación en la temperatura de operación es directamente proporcional a la variación de irradiancia debido al efecto de transferencia por radiación que se produce en el panel FV. Sin embargo, se puede apreciar como la temperatura de operación disminuye con el incremento de velocidad de viento. Las diferencias en la temperatura de operación alcanzan valores de $16 \text{ }^\circ\text{C}$ en una variación de 1000 W/m^2 ($200 - 1200 \text{ W/m}^2$) para velocidad de viento baja (3 m/s). Por otro lado, como en los casos anteriores, al fijar la velocidad de viento y la irradiancia variar igual en los tres casos, las diferencias entre las temperaturas de operación y ambiente permanecen constantes.

2.4. Efecto de las variables atmosféricas sobre la eficiencia de módulos fotovoltaicos

Para estudiar el efecto producido por las variables atmosféricas sobre el funcionamiento de un string compuesto por 17 módulos fotovoltaicos se han analizado tres casos diferentes. Estos casos “representativos” se han seleccionado para reproducir tres

posibles condiciones atmosféricas habituales en Finlandia. La Tabla 2.1 muestra los valores de las variables meteorológicas para cada caso de estudio. Sin embargo, se debe comentar que, dada la variabilidad del clima finlandés, resulta complicado determinar las condiciones atmosféricas más comunes de cada estación del año. De esta forma, se trata sólo de posibles condiciones que pueden darse durante dichas estaciones.

Tabla 2.1. Valores de las variables atmosféricas utilizadas para simular el funcionamiento de un string compuesto por 17 paneles fotovoltaicos.

| | | |
|--------------------------------------|--|----------------------|
| Condiciones de “Invierno” (Winter): | | |
| Temperatura ambiente | | -5 °C |
| Irradiancia | | 300 W/m ² |
| Velocidad de viento | | 9 m/s |
| Condiciones de “Primavera” (Spring): | | |
| Temperatura ambiente | | +5 °C |
| Irradiancia | | 600 W/m ² |
| Velocidad de viento | | 6 m/s |
| Condiciones de “Verano” (Summer): | | |
| Temperatura ambiente | | +15 °C |
| Irradiancia | | 900 W/m ² |
| Velocidad de viento | | 3 m/s |

Los resultados de funcionamiento obtenidos bajo las condiciones atmosféricas especificadas en la Tabla 2.1 se muestran en la Figura 2.10. Asimismo, la temperatura de operación de los módulos, la máxima potencia generada y la eficiencia del sistema se han calculado para cada caso y se muestran en la Tabla 2.2. La cual también incluye las características eléctricas de funcionamiento del string V_{OC} e I_{SC} . La eficiencia de los módulos se calcula como

$$\eta = \frac{P_M}{AG}, \quad (2.3)$$

donde P_M es la máxima potencia generada y A el área de los módulos. Y su valor es de 22.84 m² para strings de 17 módulos FV NP195GKg. [15]

La Figura 2.10 ilustra con claridad el efecto de las variables atmosféricas sobre los parámetros eléctricos de funcionamiento. Por un lado, la irradiancia es aproximadamente proporcional a la corriente de cortocircuito, por lo que I_{SC} incrementa de acuerdo con el incremento de irradiancia en los casos simulados. Por otro lado, la tensión en circuito abierto se ve afectado por la temperatura de operación, disminuyendo con el aumento de la última.

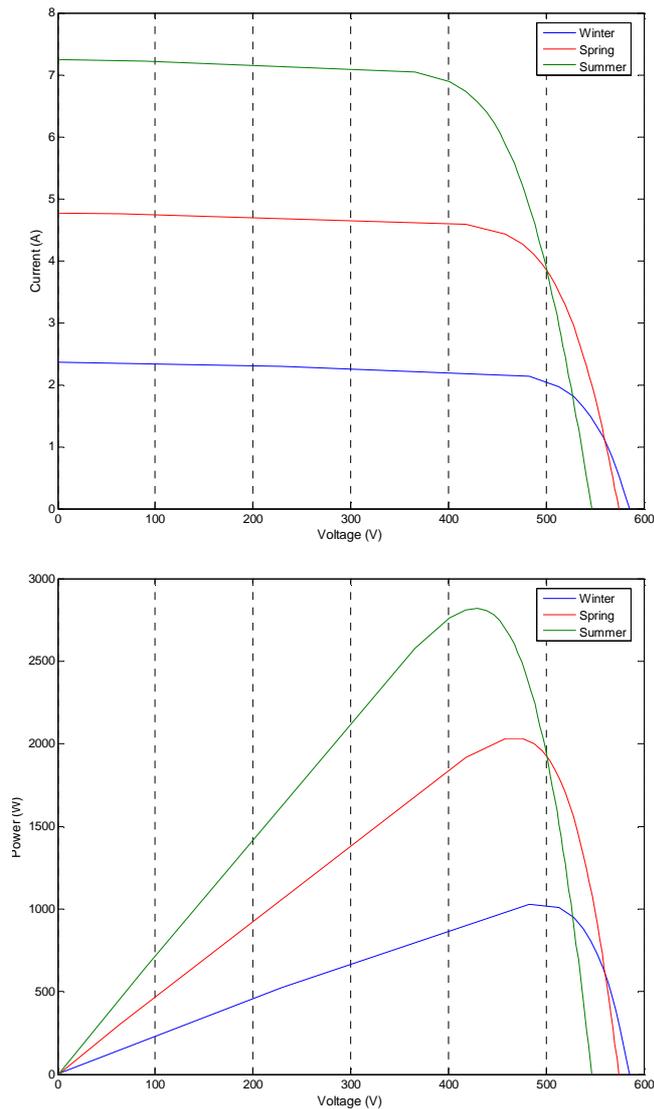


Figura 2.10. Curvas características de $I-V$ y $P-V$ del string de 17 paneles FT bajo condiciones de “invierno”, “primavera” y “verano”.

De acuerdo con la Tabla 2.2, la potencia generada parece incrementar proporcionalmente a la irradiancia recibida por el string fotovoltaico. Sin embargo, la temperatura de operación presenta un efecto negativo sobre la potencia generada. Por otro lado, la eficiencia del sistema FV se ve menos afectada por la irradiancia. Por ello, esta eficiencia permite una mejor comparación del efecto global de las variables atmosféricas sobre el sistema. Puede decirse que, aproximadamente, los sistemas fotovoltaicos presentan una mayor eficiencia en condiciones de no máxima irradiancia. Esto se debe a la gran influencia de la irradiancia sobre la temperatura de operación y, el consecuente efecto negativo, de ésta última sobre la eficiencia del sistema.

Tabla 2.2. Valores de I_{SC} , V_{OC} , temperatura de operación de los módulos, potencia máxima generada y eficiencia del sistema FV obtenidos en la simulación de funcionamiento del string.

| Condiciones de “Invierno” (Winter): | | Condiciones de “Verano” (Summer): | |
|--------------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| I_{SC} | 2.37 A | I_{SC} | 7.24 A |
| V_{OC} | 585.20 V | V_{OC} | 546.4 V |
| T_{MOD} | -2.32 °C | T_{MOD} | 31.12 °C |
| P_M | 1010 W | P_M | 2820 W |
| η | 14.73 % | η | 13.72 % |
| Condiciones de “Primavera” (Spring): | | | |
| I_{SC} | 4.78 A | | |
| V_{OC} | 574.30 V | | |
| T_{MOD} | 12.16 °C | | |
| P_M | 2030 W | | |
| η | 14.81 % | | |

A raíz de los resultados obtenidos, resulta interesante realizar una nueva simulación para estudiar con mayor detalle los efectos de las variables atmosféricas sobre la potencia generada y la eficiencia del sistema. Para ello, el efecto de cada variable meteorológica se estudia de forma independiente y la potencia generada y la eficiencia del sistema se muestran en gráficos en la Figura 2.11. Los valores de referencia para la temperatura ambiente, velocidad de viento e irradiancia son 5 °C, 6 m/s y 600 W/m² respectivamente. En cada caso de estudio se han utilizado los siguientes rangos para las variables atmosféricas: temperatura de -5 a +15 °C, velocidad de viento de 1 a 12 m/s e irradiancia de 200 a 1200 W/m².

El incremento de temperatura ambiente predeciblemente influencia de forma negativa la potencia generada y la eficiencia del sistema siendo inversamente proporcional ambos. Por otro lado, ambos parámetros se incrementan de acuerdo con la velocidad del viento. Estos comportamientos eran bastante predecibles ya que la temperatura de operación depende de dichas variables atmosféricas y, en consecuencia, afectan a la eficiencia del sistema y la potencia generada.

El efecto de la irradiancia sobre la eficiencia del sistema y la potencia generada es algo más complejo de analizar. La potencia es directamente proporcional a la irradiancia recibida por los módulos fotovoltaicos. La eficiencia del sistema, sin embargo, presenta valores máximos para niveles medios de irradiancia debido al efecto de ésta sobre la temperatura de operación y la potencia generada. Por un lado, al incrementar la irradiancia, la temperatura de operación de los módulos se incrementa también, lo cual provoca un efecto negativo en la eficiencia. Pero, por otro lado, al ser la potencia generada proporcional a la irradiancia, esto lleva a un incremento de la eficiencia del sistema. En conclusión, un acuerdo entre la potencia generada y temperatura de

operación se produce para valores de irradiancia alrededor de 600 – 800 W/m², obteniéndose en este rango los mayores valores de eficiencia del sistema.

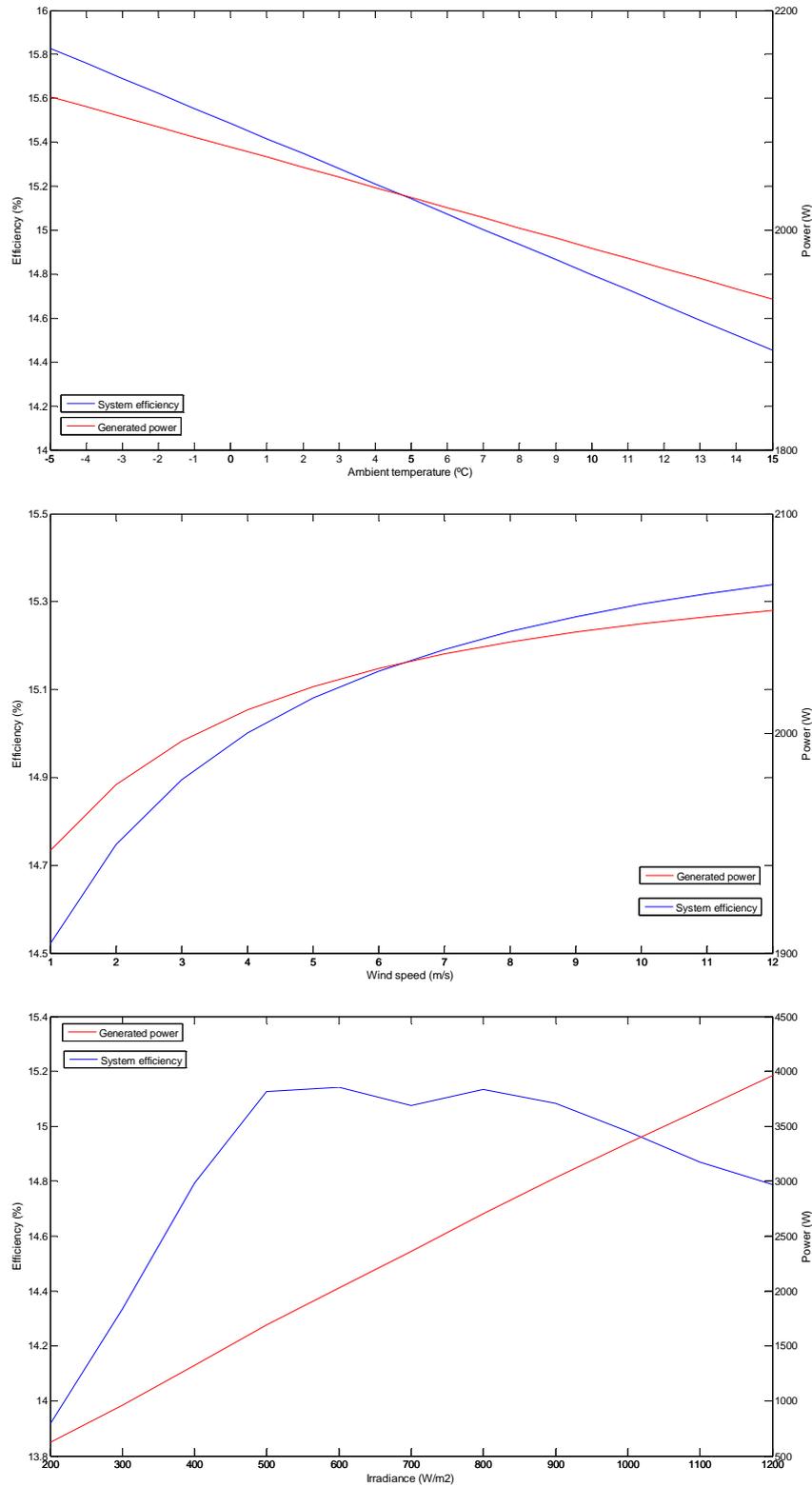


Figura 2.11. Potencia máxima generada y eficiencia del sistema en función de las variables atmosféricas influyentes en el funcionamiento del string de 17 paneles FV.

3. SISTEMA DE MEDICIÓN ATMOSFÉRICA DE LA TUT

3.1. Introducción

El objeto de este capítulo es describir el proceso de diseño del sistema de medición atmosférica de la TUT y presentar su diseño definitivo. Este sistema está ideado para satisfacer varios propósitos. Por un lado, se requiere un preciso registro de las condiciones atmosféricas que afectan a los módulos fotovoltaicos, especialmente, atendiendo a las condiciones de radiación solar global, directa y difusa. Por otro lado, resulta esencial ser capaces de medir las condiciones de operación de los módulos y strings FV.

El primer requisito se ha establecido con varios objetivos, como obtener las condiciones atmosféricas de la planta, generar bases de datos anuales con información meteorológica, publicar las condiciones actuales en la página Web del departamento o conocer los valores medios de radiación recibida por los sistemas para estudios de rendimiento de generación. El segundo, se ha previsto con el fin de caracterizar, calibrar y testear los sistemas fotovoltaicos bajo condiciones reales de operación, así como equipos electrónicos relacionados con ellos, como inversores e interfaces. Este capítulo está organizado como se describe a continuación.

La Sección 3.2 describe las principales características de la instalación fotovoltaica de la TUT. En la Sección 3.3 se exponen las consideraciones previas del sistema y se detalla el proceso de diseño, recopilando las referencias bibliográficas utilizadas para cada sistema y describiendo el estudio de mercado realizado. A continuación, se detallan los componentes y accesorios seleccionados para el sistema a lo largo de las Secciones 3.4, 3.5 y 3.6. Finalmente, la Sección 7, presenta el presupuesto del sistema de medición atmosférica de la TUT.

Este capítulo se corresponde con el Capítulo 5 del Anexo A. Sin embargo, se recomienda leer previamente el Capítulo 3 de dicho anexo. Éste, recopila la información sobre las características y requisitos que deben cumplir los sensores a utilizar, así como los métodos de medición de cada variable atmosférica y las diferentes posibles arquitecturas del sistema de adquisición de datos.

3.2. Planta de generación de energía solar fotovoltaica de la TUT

El Departement of Electrical Energy Engineering ha diseñado e instalado una instalación fotovoltaica compuesta por 69 módulos solares sobre el tejado de dicho departamento. Esta planta de generación se ha diseñado para operar como un sistema conectado a red con fines de investigación. Algunos de los principales estudios a realizar son, por ejemplo, el efecto de diferentes configuraciones de conexión de los strings fotovoltaicos, el testeo y evaluación de diferentes componentes o sistemas, como inversores, y el estudio de los efectos de las variables atmosféricas sobre la eficiencia del generador FV. La instalación está compuesta 3 strings de 17 paneles y otros 3 strings de 6 paneles. La Figura 3.1 muestra una fotografía tomada de la instalación. Para más detalle acerca de la instalación consultar la Sección 5.2 del Anexo A.



Figura 3.1. Parte de la instalación fotovoltaica de la TUT.

Para prever las condiciones de operación ambientales bajo las que los módulos y sistemas de medida tendrán que operar, las características del clima finlandés deben tomarse en cuenta. Finlandia se encuentra entre las latitudes 60N y 70N en el norte de Europa. Sin embargo, pese a su localización, el clima es muy favorable para las condiciones de vida gracias al efecto termorregulador producido por la Corriente del Golfo. Así, la temperatura media de julio en Helsinki es 17 °C y en enero -6 °C, las cuales son anormalmente elevadas para las latitudes comentadas. En conclusión, los módulos FV y sistemas de medida deben estar preparados para operar bajo condiciones extremas. Desde temperaturas menores a -25 °C, sin apenas radiación solar, durante el invierno, hasta temperaturas superiores a +25 °C y niveles de irradiancia de 1000 W/m².

3.3. Diseño del sistema de medición atmosférica

3.3.1. Consideraciones del sistema

Como se presenta en el Capítulo 3 del Anexo A, la Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation define las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) como estaciones meteorológicas (EM) en las que las medidas se realizan y transmiten automáticamente. [26] Esta guía también define los requisitos a satisfacer por las EMAs, así como las técnicas y métodos de medición que se deben seguir, y los estándares de referencia.

Tras estudiar varias EM diseñadas por el Finnish Meteorological Institute (FMI), como el observatorio Joikonen, las ubicadas en Taivalkoski Kk Kauppatie y en Espoo Sepänkylä, [4] o la EM situada en el aeropuerto de Zaragoza del AEMET [1]; se puede determinar que las variables atmosféricas más comúnmente medidas son la temperatura ambiente, humedad, visibilidad, velocidad y dirección de viento, precipitación, etc. Respecto a la medición de las horas de luz y radiación solar, estaciones como la de Helsinki Kumpula comúnmente miden la radiación ultravioleta, global y difusa. [7] Sin embargo, de acuerdo con los objetivos descritos en la anterior sección, el sistema a diseñar debe centrarse en medir las variables atmosféricas que afectan a la eficiencia de los módulos fotovoltaicos como temperatura ambiente, humedad, velocidad y dirección de viento y radiación solar (global, directa y difusa). [23] Estas variables se describen con mayor detalle en el Capítulo 3. Sistemas de medición atmosférica, del Anexo A.

Por otro lado, un amplio material bibliográfico consultado [11, 8, 14, etc.] basa la caracterización de módulos y strings FV en el conocimiento, fundamentalmente, de la irradiancia recibida, la temperatura de operación de los módulos y los parámetros eléctricos de funcionamiento. Sin embargo, otros parámetros que afectan al rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, como la velocidad del viento y temperatura ambiente, se miden con frecuencia también. [6, 12]

La mayor diferencia entre los sensores descritos para ambos propósitos reside en que la calidad y precisión requeridas para la estación meteorológica, está claramente establecida y es mayor que la necesaria para los sensores orientados a la caracterización de los módulos. Por otro lado, para llevar a cabo dicha caracterización, es necesaria información precisa sobre las condiciones de iluminación de los strings FV, así como la temperatura de operación de los módulos. Por ello, en el supuesto de utilizar sensores de precisión, y, por lo tanto, más caros, implicaría un sistema inaccesible por su elevado coste.

En consecuencia, la mejor solución pasa por realizar un diseño diferente para cada sistema, que permita centrarse en las necesidades de cada uno y, así, alcanzar un diseño óptimo en cada caso. El resultado es una estación meteorológica de precisión para medir las condiciones atmosféricas generales de la planta, incluyendo la temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección de viento y radiación solar global y difusa; y un

sistema de monitorización atmosférica orientado a medir los parámetros involucrados en la caracterización el rendimiento del generador fotovoltaico. Sin embargo, no es necesario medir parámetros como la temperatura ambiente, velocidad y dirección de viento o humedad con este segundo sistema ya que no varían en la pequeña área en la que se encuentra la instalación fotovoltaica (en un radio de 50 m).

Referente a la adquisición de datos, como se explica en la Sección 3.6 del Anexo A, la opción que mejor se ajusta a las necesidades de los sistemas de medida es un sistema de adquisición basado en la utilización tarjetas de adquisición que transmitan la información a un ordenador (PC). [12] Varias referencias bibliográficas [8, 4 y 20] presentan diferentes tipos de sistemas de adquisición basados en la utilización de microcontroladores, pero, para un sistema dedicado a adquirir tantas señales como el diseñado, puede que ésta no sea la mejor solución. Por otro lado, serán necesarios procesos de sincronización para realizar la correspondencia entre las medidas atmosféricas y de potencia con el fin de analizar el rendimiento de los sistemas FV, por lo que el sistema de adquisición debe estar preparado para ello también.

3.3.2. Estación meteorológica automática

Para afrontar el diseño de una estación meteorológica state-of-the-art, ideada para realizar medidas de elevada precisión y, al mismo tiempo, para satisfacer ciertas necesidades en cuanto a medidas a realizar, el primer paso consiste en estudiar la bibliografía disponible, así como proyectos similares ya desarrollados, para definir los criterios de diseño a satisfacer. Así, tras consultar varias referencias como Garrison [9], van der Bos [24], World Meteorological Organization [26], etc.; el Capítulo 3 del Anexo A recopila las cuestiones a tener en cuenta para diseñar una estación meteorológica automática adecuada a las necesidades de este proyecto. Asimismo, la Tabla 5.3 del Anexo A resume los tipos de sensores descritos en el mencionado capítulo para las medir diferentes variables atmosféricas que la EMA debe controlar.

El segundo paso del proceso de diseño consiste en realizar un extenso estudio de mercado de acuerdo con los criterios establecidos en el Capítulo 3 del Anexo A. Los sensores e interfaces que mejor se ajustan a las necesidades han sido seleccionados, también se ha contemplado la disponibilidad y condiciones de transporte por parte los proveedores. Este estudio de mercado se incluye en el Apéndice A del Anexo A. En éste, varios sensores de cada variable atmosférica se presentan junto con el presupuesto de los mismos, incluido en la Sección A.4 del Anexo A.

Es importante comentar que no sólo los sensores descritos han sido estudiados, ya que, también, se ha establecido contacto otras con compañías que disponen de sensores. Sin embargo, la respuesta recibida ha resultado desfavorable, ya fuera por motivos de coste de distribución o disponibilidad de sensores. Por otro lado, las relaciones y acuerdos entre la TUT y compañías nacionales e internacionales, como Vaisala o National Instruments han resultado un factor a tener en cuenta en la toma de decisiones.

Tras recopilar toda la información y conocer las posibles soluciones, llega el punto de realizar una valoración y seleccionar los sensores que compondrán la estación meteorológica.

Para medir la temperatura ambiente se ha optado por una RTD de platino, por la precisión que aporta incluso en las condiciones más extremas. Este aspecto es especialmente importante para el sensor de humedad relativa ya que, bajo éstas, resulta necesaria la utilización de acondicionamiento térmico para su correcto funcionamiento. Los sensores que más se aproximan a estos requerimientos son los Climatronics P/N 101812 G2 y el Vaisala HMP155. Sin embargo, debido a la relación existente entre la TUT y Vaisala y a que ha sido imposible contactar con un proveedor de Climatronics en Finlandia, el seleccionado ha sido el sensor HMP155 de Vaisala. Sus especificaciones se muestran en la Tabla A.2, en la Sección A.1 del Anexo A.

Como primera aproximación a una solución para las medidas de viento+ se ha considerado adquirir un anemómetro-veleta de alta precisión adaptado para condiciones extremas con sistemas de calentamiento, ya que, aporta mediciones muy precisas y parece un sistema muy fiable, al ser utilizado en numerosas estaciones meteorológicas. Sin embargo, tras tratar el tema con varios managers de ventas, se llegó a la conclusión de que este tipo de sensores no son los más adecuados bajo estas condiciones ambientales, ya que requieren un mantenimiento anual costoso. Por consiguiente, la utilización de un sensor de viento ultrasónico, que no requiere apenas mantenimiento, es la solución más apropiada para la EM. Vaisala provee un sensor que se ajusta a las necesidades, el WS425 ultrasonic wind sensor, y, al haberse decidido ya la compra de los sensores de temperatura ambiente y humedad a esta compañía, es la opción elegida. Las características del WS425 de Vaisala se muestran en la Tabla A.8 (Sección A.2 del Anexo A).

La calidad y precisión requerida para las medidas de radiación supone la utilización de instrumentos clase “secondary standard” o “first class”, en caso de utilizarse un pirheliómetro. Esta condición excluye a la mayoría de los instrumentos del mercado, ya que los piranómetros comerciales no están diseñados para fines de investigación sino para aplicaciones funcionales. Por ello, sólo los instrumentos de Kipp&Zonen se ajustan a las necesidades requeridas (para información más detallada, consultar la Sección A.3 del Anexo A).

De acuerdo a lo explicado en el Capítulo 3 del Anexo A, existen dos métodos para obtener las radiaciones global, directa y difusa: utilizando un pirheliómetro montado sobre un seguidor solar y un piranómetro, o utilizando dos piranómetros, uno de ellos montado con un “shadowing ring”. Tras estudiar ambas opciones, se comprueba fácilmente que la primera resulta mucho más cara debido al coste del seguidor solar (para más información, ver la Tabla A18 del Anexo A). Por lo que se ha optado por adquirir un par de piranómetros CMP22 y CMP21 para medir la radiación solar global y difusa respectivamente.

3.3.3. Sistema de monitorización de condiciones de operación

Como se ha comentado en secciones anteriores, la caracterización de módulos fotovoltaicos requiere la monitorización de las condiciones de operación actuales. Las cuales están, generalmente, divididas en dos grupos: parámetros de potencia y condiciones atmosféricas. Las últimas, son un grupo de variables que afectan al rendimiento de los módulos y abarcan la radiación solar recibida por los módulos, la temperatura ambiente, la velocidad de viento y la temperatura de operación, entre otras. King [11] propone varios métodos de testeo y procedimientos analíticos para caracterizar el rendimiento eléctrico de los módulos y strings FV.

Sólo pueden encontrarse algunas referencias bibliográficas que establezcan los criterios para diseñar este tipo de sistemas, pero hay una mayor cantidad que propone numerosas soluciones. Por ello, el primer paso para diseñar este sistema de monitorización consiste en estudiar diferentes soluciones propuestas por los autores para sus propios sistemas. Las siguientes líneas describen el propósito de dichos estudios y los instrumentos utilizados.

Forero et al. [8] desarrollan un nuevo sistema de adquisición (DAQ) diseñado e implementado para monitorizar instalaciones fotovoltaicas no conectadas a red y para medir, adquirir y evaluar estadísticamente las variables atmosféricas. Su sistema provee información mediante sensores atmosféricos y de potencia. Las medidas de radiación solar se llevan a cabo con piranómetros SP Lite de la firma Kipp&Zonen y las medidas de temperatura ambiente con termistores NTC.

Durisch et al. [5] desarrolla, testea y pone en funcionamiento una instalación de monitorización flexible para células y módulos fotovoltaicos en el Paus Scherrer Institute (PSI). Un seguidor solar permite una alineación precisa para los sensores. 6 piranómetros CM21 de Kipp&Zonen y 2 células FV de referencia de Siemens se montan sobre el sistema seguidor. La radiación solar directa se mide mediante pirheliómetros Eppley montados sobre otro seguidor solar desarrollado por el PSI. La temperatura ambiente se mide mediante un sensor Pt-100 montado con un protector solar y ventilado. Por último, sensores de temperatura de superficie Pt-100 se adhieren a la parte trasera de los módulos para medir su temperatura.

Martínez Bohórques et al. [16] diseñan, construyen y testean un completo sistema de medición de temperatura compuesto por sensores analógicos de precisión Pt-100. Los sensores se adhieren a la parte trasera de los módulos fotovoltaicos para obtener la temperatura de operación.

Koutroulis et al. [12] proponen un sistema de adquisición basado en ordenador para monitorizar tanto información meteorológica, como parámetros de operación de un sistema de generación de energía renovable. La temperatura ambiente y humedad relativa se miden utilizando el higrómetro Rotronic MP100A, y la irradiancia global mediante el piranómetro Delta-T GS1. La velocidad y dirección de viento se miden con el anemómetro A100R y veleta W200P de Vector Instruments.

Benghanem [4] desarrolla un sistema de adquisición de variables atmosféricas de bajo coste, mediante instrumentos meteorológicos, y transmite la información a un PC equipado con conexión a Internet. Las medidas de radiación se llevan a cabo con una fotocélula calibrada con un piranómetro de Kipp&Zonen. Para las medidas de humedad relativa y temperatura opta por un sensor capacitivo Humirel HS1101 y un termistor. La Tabla 5.4, en el Capítulo 5 del Anexo A recoge los sensores utilizados en los sistemas de los casos descritos.

En lo referente al diseño del sistema, la EMA descrita en la sección anterior, ya provee las mediciones de temperatura ambiente, humedad, velocidad y dirección de viento y radiación solar. De esta forma, sólo las medidas de la temperatura de operación son necesarias. Sin embargo, se requiere un preciso conocimiento de las condiciones de iluminación en las que se encuentra cada string de la instalación, por lo que una exhaustiva malla de sensores de radiación solar y temperatura de operación es el objetivo del sistema a diseñar.

Para realizar las medidas de temperatura de operación de los módulos, al igual en que Durisch et al. [5] y en Martínez et al. [16], la solución más apropiada consiste en utilizar sensores Pt-100 adheridos a la parte trasera de los módulos fotovoltaicos. Por otro lado, para medir la irradiancia recibida por los strings, igual que en Forero et al. [8] y en Durisch et al. [5], un piranómetro de Kipp&Zonen es la opción elegida. Sin embargo, ante la necesidad de utilizar un gran número de sensores, se ha optado por un piranómetro de tecnología basada en fotodiodo, de menor coste, como el Sp Lite 2 (para información más detallada, ver la Sección A.3 del Anexo A).

3.4. Estación meteorológica automática

Esta sección esta dedicada a presentar los sensores seleccionados para conformar la estación meteorológica, así como los accesorios necesarios para su correcto funcionamiento, como unidades de ventilación, sistemas de montaje, fuentes de alimentación, etc. Sin embargo, se recomienda leer la Sección 5.4 del Anexo A para ver en detalle las particularidades de cada sensor. La Figura 3.2 muestra un esquema global de la estación diseñada.

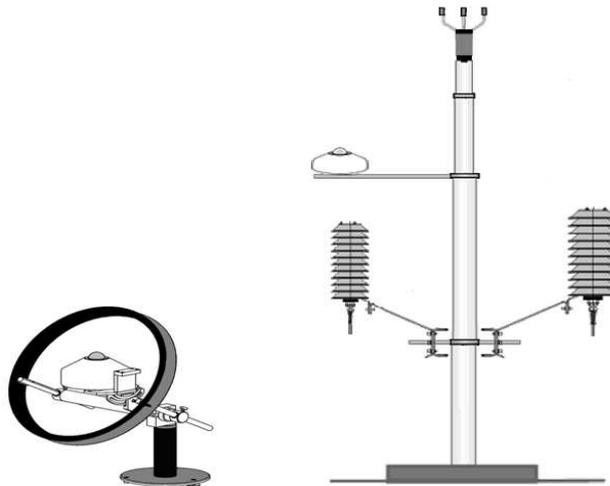


Figura 3.2. Esquema de la estación meteorológica diseñada que incluye sensores de temperatura ambiente, humedad, velocidad y dirección de viento y radiación solar global y difusa.

El sensor utilizado para medir la temperatura ambiente y humedad relativa es el HMP155 calibrado. Compuesto por un sensor de humedad que requiere calentamiento, se va a utilizar una sonda extra de temperatura. Para proteger ambas sondas se utilizan los protectores de radiación DTR503 y DTR502, los cuales se muestran en la Figura 3.3. Por último, una fuente de alimentación es necesaria para el sistema de calentamiento.



Figura 3.3. Sensor HMP155 con la sonda extra de temperatura y protectores DTR503 y DTR502 unidos al poste durante el proceso de montaje.

El sensor ultrasónico WS425 es la opción elegida para medir la velocidad y dirección del viento. Este sensor digital requiere un interfaz extra para generar una señal analógica y dos fuentes de alimentación diferentes: una para su funcionamiento y otra para el sistema de calentamiento para prever la acumulación de nieve cerca de los

emisores y receptores. La Figura 3.4 muestra el sensor WS425 durante el proceso de montaje.



Figura 3.4. Sensor ultrasónico WS425 durante el proceso de montaje.

Respecto a los sensores de radiación, como se ha explicado en la Sección 3.3.2, se utilizan piranómetros CMP22 y CMP21. Estos sensores necesitan unidades de ventilación CV3 para operar correctamente bajo las condiciones ambientales dadas. La Figura 3.5 muestra el piranómetro CMP22 y una unidad CV3 durante el proceso de montaje. Los piranómetros son instrumentos pasivos, pero las unidades sí requieren fuentes de alimentación. Respecto al montaje de los sensores, el CMP22 necesita un soporte mientras el CMP21 irá montado sobre el “shadowing ring” CM121C como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.5. Piranómetro Kipp&Zonen's CMP22 montado bajo la cubierta de la unidad CV3. Base de la unidad de ventilación CV3 durante el proceso de montaje.

El “shadowing ring” mantiene al piranómetro bajo su sombra durante todo el día, evitando que la radiación solar directa alcance el sensor, con lo que se consigue que éste sólo mida la radiación solar difusa. Resulta necesario un ajuste manual periódico de las

barras que fijan la posición del anillo. Por otro lado, el anillo intercepta también una pequeña porción de radiación difusa, por lo que los datos requieren una corrección proporcionada por una tabla.



Figura 3.6. Piranómetro CMP21 montado sobre el CM121C con la unidad CV3 durante el proceso de montaje.

La idea inicial fue montar todos los sensores, exceptuando el piranómetro montado sobre el “shadow ring”, en un poste vertical como se muestra en el esquema de la Figura 3.1. Sin embargo, tras debatir el tema con los técnicos de laboratorio, se ha decidido utilizar dos postes de menor altura. Un poste soportará los sensores de temperatura y humedad junto con sus respectivos protectores y el otro, el piranómetro CMP22 y el sensor ultrasónico (éste se montará en el punto superior del mástil).

3.5. Sistema de monitorización de las condiciones de operación

Para la malla de medidas de radiación solar y temperatura de operación ubicadas a lo largo de toda la instalación fotovoltaica, se han optado por utilizar piranómetros SP Lite 2 de la firma Kipp&Zonen y sensores de temperatura tipo RTD Pt-100.

Los piranómetros SP Lite 2 son sensores pasivos que no requieren alimentación o cualquier otra instrumentación adicional. Proporcionan una señal analógica que puede conectarse directamente al sistema de adquisición de datos. Estos sensores se montarán con la misma inclinación que los módulos de forma que proporcionen el valor de irradiancia recibido por estos últimos. Un par de sensores se montarán al inicio y final de los strings de forma que sea posible extraer las condiciones de iluminación de los strings.

National Instruments es el proveedor seleccionado para los sensores de temperatura Pt-100 y se va a utilizar una conexión de 3 cables para incrementar la precisión de las

medidas y reducir el ruido. Los sensores se adherirán a la parte trasera de los módulos para obtener la temperatura más próxima posible a las células FV. Se instalará una Pt-100 en los módulos próximos a un fotodiodo para obtener pares de medidas de irradiancia y temperatura de operación.

El espacio disponible en el tejado del departamento es limitado, además de contener varios obstáculos para la radiación solar, por lo que los strings se encuentran divididos como puede comprobarse en la Figura 3.1. Por ello, son necesarios más de dos pares de sensores de irradiancia y temperatura (I-T) por string. Para conseguir conocer las condiciones de operación de todos los módulos es necesario ubicar un par I-T en cada inicio y fin de los grupos de paneles. En total, son necesarios 17 pares I-T y forman el Sistema de Irradiancia-Temperatura.

Sin embargo, quedan 4 módulos que han sido diseñados para operar aislados (los módulos “Extra”) y su propósito es el de servir como prototipos y testear a baja tensión, seguros para el personal. Se ha decidido instalar un par I-T por cada módulo: el Sistema de Módulos Extra. En total se han encargado 21 sensores SP Lite 2 y Pt-100 a los proveedores comentados. La Figura 3.7 muestra un esquema con la disposición de los 21 pares I-T a lo largo de la instalación fotovoltaica de la TUT.

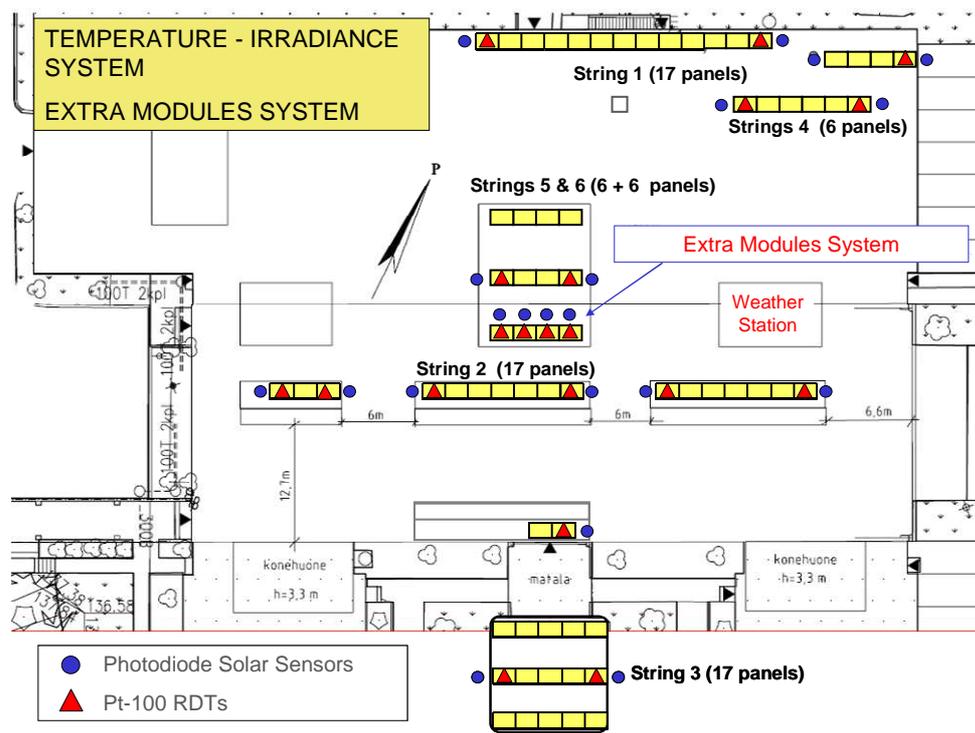


Figura 3.7. Esquema de la disposición de los sensores SP Lite 2 y Pt-100 en la instalación fotovoltaica de la TUT.

3.6. Sistema de adquisición de datos

Tras estudiar diferentes posibles arquitecturas para el sistema de adquisición de datos, como se detalla en la Sección 3.7 del Anexo A, se ha optado por un sistema que adquiera y digitalice los datos provenientes de los sensores y los transmita a un PC, de acuerdo con esquema de la Figura 3.8. Debido al acuerdo ya comentado entre la TUT y National Instruments y al hecho de que la Universidad ya dispone de la licencia del software Labview, se ha decidido utilizar sistemas de adquisición de datos de esta firma.

NI ofrece una gran variedad de buses de conexión entre las tarjetas DAQ y el PC como USB, PCI, PCI Express, PXI, wireless o Ethernet. [19] De acuerdo con las necesidades de nuestro para variables atmosféricas, se propuso una primera aproximación utilizando CompactDAQs y varios módulos E/S intercambiables conectados al PC por USB. Esta solución se ajusta bastante a las necesidades, permitiendo seleccionar los módulos E/S idóneos para las señales de los sensores, resulta muy flexible y económica. Sin embargo, tras presentar el sistema de medición diseñado y tratar el tema con el manager de ventas de NI, se llegó a una mejor solución utilizando una conexión Ethernet entre las tarjetas DAQ y el PC. Para ello, se requieren los sistemas CompactRio que permiten seguir utilizando las mismas tarjetas DAQ, pero se conectan mediante Ethernet en lugar de USB.

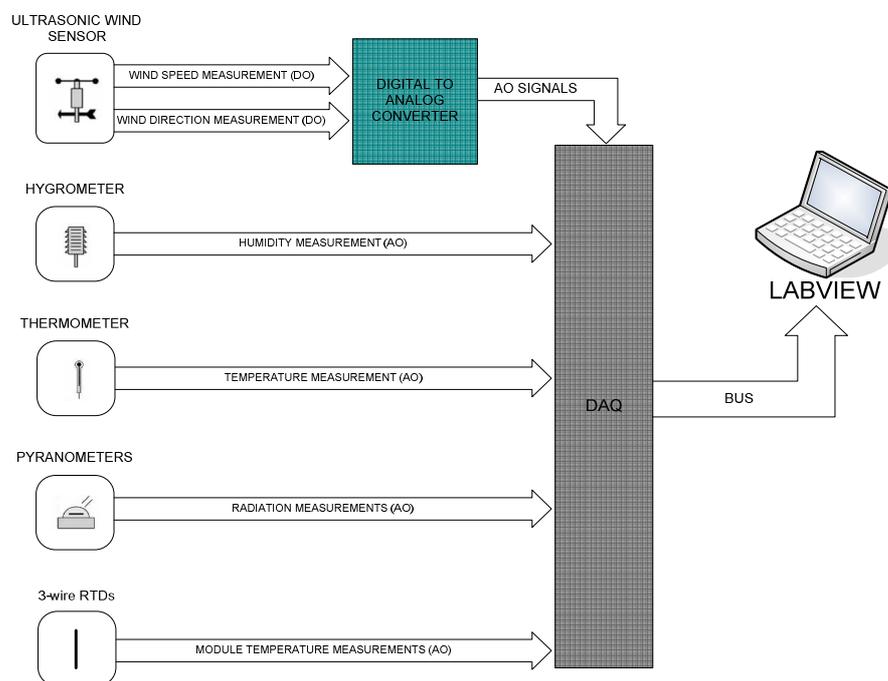


Figura 3.8. Esquema del sistema de medición de la TUT.

Por lo tanto, se va a utilizar un sistema maestro-esclavo para adquirir y transmitir las señales proporcionadas por los sensores. Ambas unidades RIO adquieren y la unidad esclava transmite los datos ya digitalizados al maestro, que los recibe y envía toda la información vía Ethernet sin problemas de interferencias o ruidos. Este tipo de sistemas

permite ubicar las unidades lo más próximas posible a los sensores, reduciendo así las longitudes de cable de éstos. Otro beneficio propiciado por utilizar dos unidades es la posibilidad de expansión del sistema en caso necesario cambiando los módulos E/S o, simplemente, añadiendo más. La Figura 3.9 muestra las unidades CompactRIO.



Figura 3.9. Componentes del sistema de adquisición de datos durante el proceso de montaje.

Respecto a la selección de los módulos E/S necesarios, se van a utilizar 2 módulos NI9205 con 32 entradas, una conectada a cada unidad CompaqRio, para adquirir las 28 señales de voltaje analógicas del sistema, y 6 módulos NI9217 de 4 entradas específicos para sensores tipo Pt-100 con conexión de tres cables, para adquirir las 21 señales de estos sensores. Para mayor detalle acerca las señales a adquirir o sobre los módulos E/S, consultar la Sección 5.6 del Anexo A.

3.7. Presupuesto

Finalmente, la Tabla 3.1 muestra el coste económico de los diferentes componentes del sistema separados de acuerdo a la compañía proveedora a la que pertenecen. Resulta destacable que NI ha ofrecido descuentos importantes en todos los dispositivos adquiridos, además del hecho que supone el tener adquirida la licencia de Labview de antemano. Se puede comprobar como la facturación de Vaisala asciende a 5.658 €, la de Perel Oy (proveedor en Finlandia de Kipp&Zonen) a 23.694 € y la de NI a 6.262 €. El presupuesto total del sistema de medición atmosférica de la TUT asciende a 35.614 €. Para información más detallada, consultar los recibos de encargo de los sensores en el Apéndice C del Anexo A.

Tabla 3.1. Resumen de presupuesto del sistema de medición atmosférica.

| Compañía | Dispositivo | Unids. | Precio | | Total |
|----------------------|-------------|--------|------------|--------------------|--------------------|
| Vaisala | HMP115A | 1 | 1,137.00 € | | 1,137.00 € |
| | DTR503A | 1 | 312.00 € | | 312.00 € |
| | DTR502B | 1 | 300.00 € | | 300.00 € |
| | WS425 | 1 | 2,889.00 € | | 2,889.00 € |
| | IVA | | | 22% | 1,020.36 € |
| | | | | Subtotal 1: | 5,658.36 € |
| Kipp&Zonen | SP Lite 2 | 21 | 316.00 € | | 6,636.00 € |
| | CMF2 | 1 | 294.00 € | | 294.00 € |
| | CVF3 | 2 | 941.00 € | | 1,882.00 € |
| | CM121C | 1 | 2,436.00 € | | 2,436.00 € |
| | CMP21 | 1 | 2,638.00 € | | 2,638.00 € |
| | CMP22 | 1 | 5,535.00 € | | 5,535.00 € |
| | IVA | | | 22% | 4,272.62 € |
| | | | | Subtotal 2: | 23,693.62 € |
| National Instruments | CRIO-9074 | 1 | 2,399.00 € | -70% | 719.70 € |
| | NI 91444 | 1 | 879.00 € | -10% | 791.10 € |
| | NI 9205 | 2 | 699.00 € | -10% | 1,258.20 € |
| | NI 9217 | 6 | 419.00 € | -25% | 1,885.50 € |
| | Pt-100 | 21 | 29.00 € | -25% | 456.75 € |
| | IVA | | | 22% | 1,129.21 € |
| | | | | Subtotal 3: | 6,261.96 € |
| | | | | Total: | 35,613.94 € |

4. TESTEO DE LOS SENSORES Y MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es describir el montaje del sistema de sensores diseñado, así como presentar los resultados obtenidos al testear varios strings fotovoltaicos. Se va a comenzar describiendo el montaje del sistema de medidas I-T, seguido de una descripción del sistema de medición de potencia. Cabe destacar que este capítulo se corresponde con el Capítulo 6 del Anexo A.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, el sistema diseñado está compuesto por pares de sensores de radiación y temperatura de operación ubicados al inicio y final de cada grupo de módulos FV. En la Figura 4.1 se muestra un piranómetro montado próximo a un grupo de módulos. Estos sensores de radiación se colocan con la misma inclinación que los strings FV de forma que reciben la misma cantidad de radiación. La Figura 4.2 muestra la parte trasera del módulo, donde se ha colocado un sensor de temperatura fijado mediante un adhesivo y presionado con el protector de los cables.



Figura 4.1. Piranómetro SP Lite 2 montado próximo a un string fotovoltaico.

En lo referente a la estación meteorológica automática y los sensores de radiación, se montarán de acuerdo a lo establecido en el Capítulo anterior.

Las medidas se han realizado en estrecha colaboración con la parte de electrónica de potencia del grupo de investigación, quienes están diseñando un sistema para medir las

características eléctricas de los módulos fotovoltaicos. Llegados a este punto, han desarrollado un sistema para medir las curvas I-V y P-V en el laboratorio mediante IGBTs de forma rápida y precisa. La Figura 4.3 muestra un esquema del sistema.



Figura 4.2. Platinum RTD attached to the back-side part of a PV module.

El dispositivo de medida está compuesto por un osciloscopio digital de 1 GHz, una fuente de alimentación y sondas de corriente y voltaje para el osciloscopio, como muestra la Figura 4.3. Este último registra las corrientes y voltajes de los módulos y representa las curvas I-V, además de permitir almacenar los datos en memoria para posteriores análisis.

La idea inicial planteada fue testear los módulos fotovoltaicos y sistemas de medida diseñados mediante la caracterización de los módulos una vez finalizado el montaje del sistema diseñado, siempre considerando este objetivo como secundario para el proyecto debido a las fases de distribución y montaje de los sensores. Finalmente, ha resultado imposible realizar el montaje del sistema a tiempo para realizar un testeo adecuado para el proyecto. Esto se ha producido por demoras en la recepción e instalación de los instrumentos, tarea la cual no forma parte de este proyecto. Sin embargo, pese a que finalmente no ha sido posible ni realizar un testeo parcial del sistema, se ha medido el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos utilizando datos atmosféricos adquiridos mediante la instalación del Department of Electronics.

De esta forma, se han medido parámetros eléctricos de diferentes strings y se han analizado sus características I-V, mientras que el sistema de medida del Department of Electronics ha proporcionado información sobre la temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad de viento, irradiancia y temperatura medida en su módulo fotovoltaico (de silicio policristalino y similar tamaño a los instalados en la instalación medida); de los días al completo en los que se realizaron las medidas. Posteriormente, los datos medidos por ambos sistemas se han relacionado para su análisis.

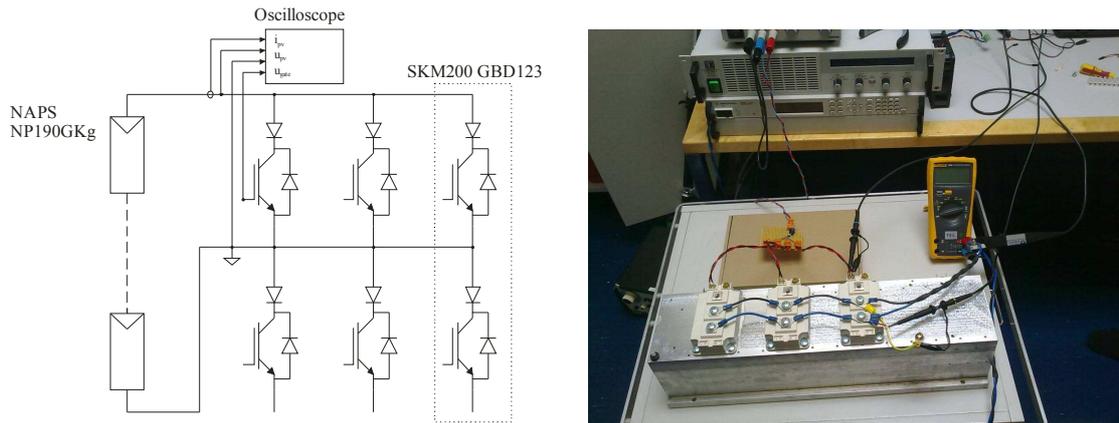


Figura 4.3. Esquema del sistema de medida de las características I - V para los sistemas FV . Imagen de los módulos IGBT, disipador y conexiones para las medidas de potencia.

4.2. Medición de las condiciones de operación

Se han realizado varias medidas de potencia durante dos días de condiciones atmosféricas muy diferentes. Las primeras medidas se realizaron en agosto, en un día todavía caluroso y con una gran cantidad de radiación, mientras que las siguientes se tomaron ya en septiembre, en un día parcialmente nuboso y con temperaturas inferiores. Durante el primer día se realizaron mediciones en dos strings diferentes formados por 17 y 6 paneles respectivamente, mientras que en el segundo sólo sobre este último. La Tabla 4.1 muestra las horas concretas en las que las medidas de potencia fueron realizadas.

Tabla 4.1. Momentos en los que se realizaron las medidas de potencia.

| Medida | Fecha | Hora |
|-----------------|------------|-------|
| M1 (6 paneles) | 26/08/2010 | 09:48 |
| M2 (17 paneles) | 26/08/2010 | 11:20 |
| M3 (6 paneles) | 06/09/2010 | 08:58 |
| M4 (6 paneles) | 06/09/2010 | 12:48 |
| M5 (6 paneles) | 06/09/2010 | 12:53 |

La información meteorológica proporcionada por el Department of Electronics sólo está completamente disponible para el primer día de medidas, ya que los datos del segundo día están parcialmente corruptos. En concreto, no se disponen de datos desde las 6 h hasta las 13 h, por lo que las condiciones de radiación y la temperatura de operación del segundo día no están disponibles. Por todo ello, la radiación recibida por el string se ha obtenido aproximándola mediante simulaciones bajo diferentes niveles radiación y comparando los resultados con las medidas de potencia realizadas en el string. Se han comparado la corriente de cortocircuito y la potencia generada ya que son los parámetros de potencia más directamente afectados por la radiación recibida. El

resto de variables atmosféricas han consultado en el FMI para la región de Tampere el día indicado.

Por otro lado, la Figuras 4.4 y 4.5 muestran la radiación (línea roja) y temperatura del módulo (línea azul) registradas durante los días de medición. El momento exacto en el que se realizaron las medidas de potencia se ilustra con un círculo de color cian.

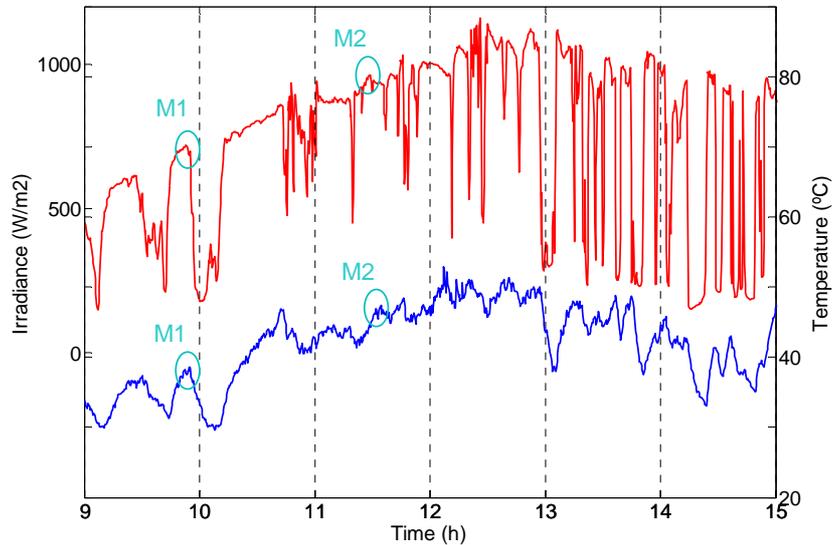


Figura 4.4. Irradiancia y temperatura de operación medidas el 26 de agosto de 2010.

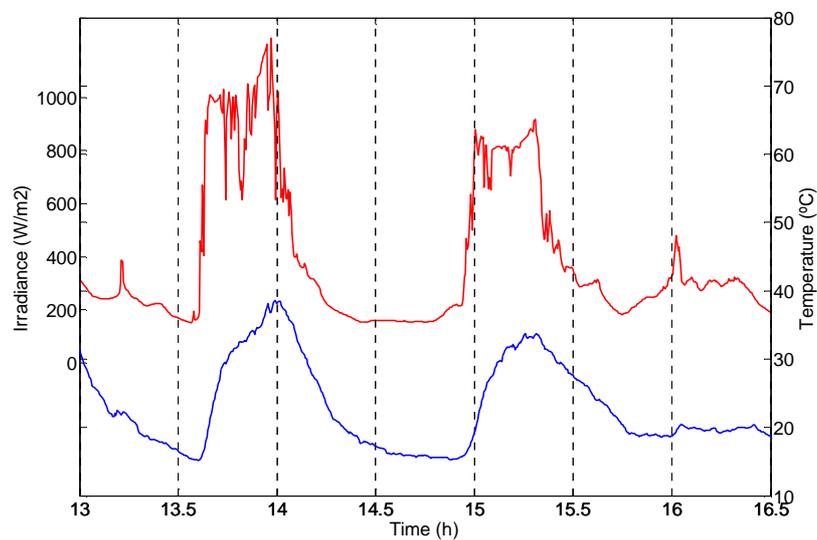


Figura 4.5. Irradiancia y temperatura de operación medidas el 6 de septiembre de 2010.

A continuación, la Tabla 4.2 muestra las condiciones climáticas registradas en los instantes especificados. Como se puede comprobar en la Figura 4.5 y la Tabla 4.2, los niveles de radiación solar calculados para las medidas 4 y 5 se aproximan a los niveles registrados 10 minutos más tarde, cuando se dispone de los datos. Las temperaturas de

operación medidas y calculadas se muestran en la Tabla 4.3. Estas temperaturas se han calculado mediante el modelo térmico descrito en el Capítulo 2 bajo las condiciones atmosféricas dadas.

Tabla 4.2. Condiciones atmosféricas en los instantes en que se realizan las medidas de potencia.

| Medida | Irradiancia | Temperatura | Vel. viento | Humedad |
|-----------------|--------------------------------|-------------|-------------|---------|
| M1 (6 paneles) | 712.30 W/m ² | 25.6 °C | 2.90 m/s | 64 % |
| M2 (17 paneles) | 932.10 W/m ² | 25.6 °C | 2.90 m/s | 64 % |
| M3 (6 paneles) | 669.00 W/m ² (app.) | 15.0 °C | 5.00 m/s | 62 % |
| M4 (6 paneles) | 161.70 W/m ² (app.) | 15.0 °C | 5.00 m/s | 62 % |
| M5 (6 paneles) | 289.30 W/m ² (app.) | 15.0 °C | 5.00 m/s | 62 % |

Tabla 4.3. Temperaturas de operación registradas y calculadas.

| Temperatura de operación | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------|
| | T _{MOD} Medida | T _{MOD} Simulada | Error |
| M1 (6 paneles) | 35.61 °C | 38.09 °C | 1.45 °C |
| M2 (17 paneles) | 44.21 °C | 42.76 °C | 2.48 °C |
| M3 (6 paneles) | - | 23.90 °C | - |
| M4 (6 paneles) | - | 17.17 °C | - |
| M5 (6 paneles) | - | 18.88 °C | - |

De estos resultados se extrae la presencia de una importante inercia térmica en los módulos que produce que cambios repentinos en la radiación solar recibida no se vean reflejados en un cambio en la temperatura de operación, por lo que las curvas de temperatura están más suavizadas que las de irradiancia. Otro aspecto derivado de esta inercia térmica es el retraso que se produce entre un aumento o disminución de la irradiancia y la temperatura. Este fenómeno puede observarse, por ejemplo, en la Figura 4.6 alrededor de las 14 h y genera las diferencias existentes entre las temperaturas medidas y simuladas mostradas en la Tabla 4.3.

Esta inercia producirá además errores en las simulaciones de funcionamiento del generador fotovoltaico. El problema se deriva de que el modelo térmico está desarrollado para predecir la temperatura de operación en estado estacionario sin considerar la temperatura del instante anterior. De ahí que una posible mejora a implementar en el modelo térmico consista en considerar la temperatura de operación del momento anterior.

4.3. Medidas de potencia y rendimiento de los strings

Para cada instante especificado en la Tabla 4.1 se han registrado y almacenado los voltajes e intensidades de los strings para su posterior análisis. El primer día de medidas, el 26 de agosto de 2010, se testearon dos strings de 17 y 6 paneles. Sin embargo, se produjeron problemas por sobrecalentamiento de los IGBTs al intentar medir de forma continuada sobre el string de 17 paneles, así, en el segundo día de medidas, éstas se realizaron únicamente sobre el string de 6 paneles FV. Una vez se dispone de los datos de potencia y de condiciones de operación se procede a correlacionarlos para analizar las medidas comparándolas con los resultados teóricos simulados. Las características I-V y P-V muestran el comportamiento de los strings y la simulaciones en las Figuras 4.6 y 4.7.

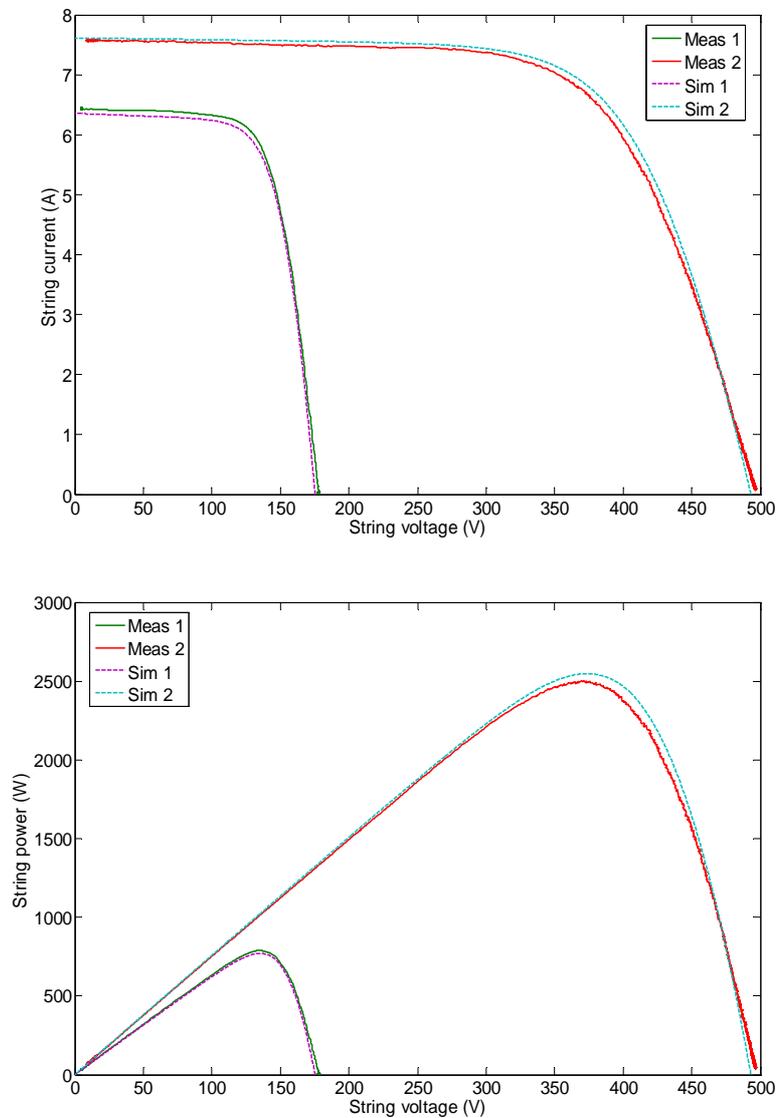


Figura 4.6. Curvas I-V y P-V medidas y simuladas de los strings de 6 y 17 módulos el 26 de agosto de 2010.

Las Tabla 4.4 y 4.5 recogen los parámetros eléctricos registrados en las 5 medidas y los resultados de las simulaciones para las respectivas condiciones atmosféricas.

Las características I-V y P-V de las medidas M1 y M2 muestran claramente la diferente respuesta bajo diferentes condiciones atmosféricas. Por un lado, la corriente de cortocircuito se ve muy afectada por la radiación: para M1 es 6.5 A con una irradiancia de 712.3 W/m^2 , mientras que para M2 es 7.8 A bajo 932.1 W/m^2 . Por otro lado, la diferencia en la tensión en circuito abierto se debe al número de módulos que forman el string y son 178 V y 499 V. Por último, la máxima potencia generada se ve afectada también por este hecho y los valores medidos son 779.4 W y 2527.2 W para cada caso.

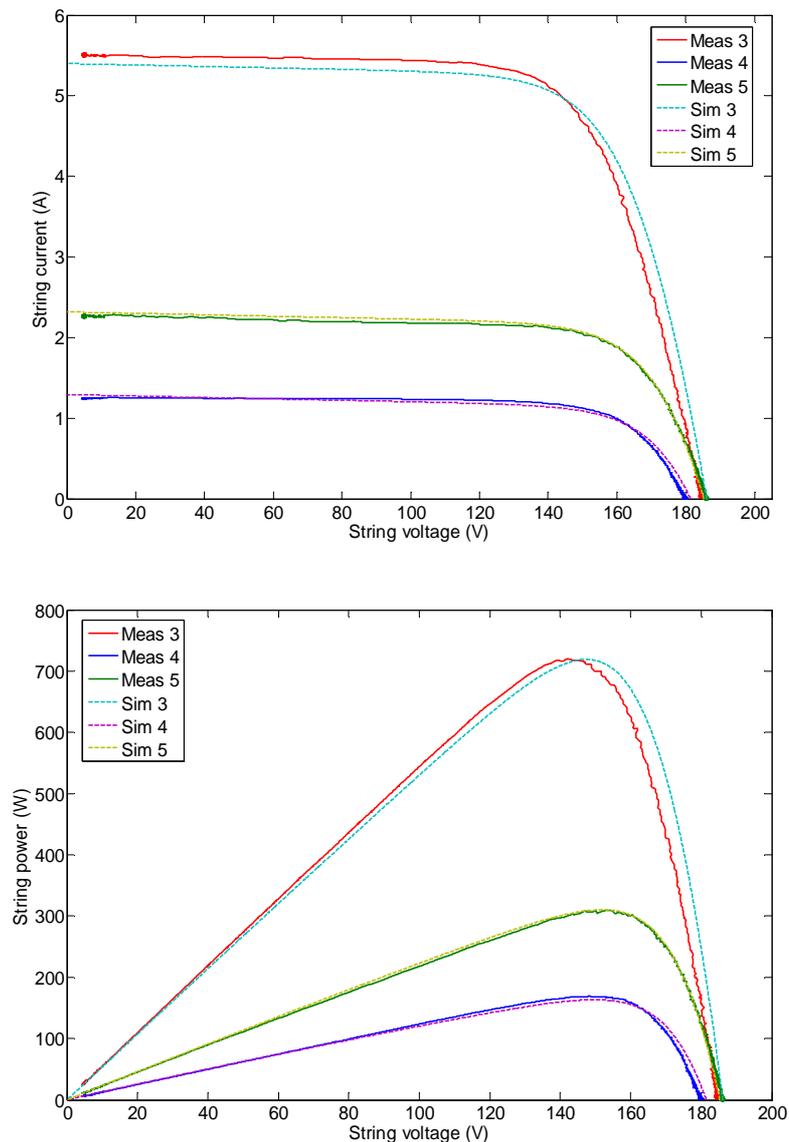


Figura 4.7. Curvas I-V y P-V medidas y simuladas del string de 6 módulos el 6 de septiembre de 2010.

Las curvas de las simulaciones correspondientes a M1 y M2 muestran un correcto funcionamiento del modelo térmico y del generador. Las diferencias producidas son relativamente pequeñas, siendo la mayor de ellas para la máxima potencia generada en M2. Sin embargo, dada la poca precisión en la correlación temporal de las medidas, evaluar dichas diferencias apropiadamente resulta complicado.

Las curvas características de M3, M4 y M5 muestran con mayor facilidad el comportamiento de los sistemas FV bajo varias condiciones de operación, al tratarse siempre del mismo string. Las medidas se tomaron durante un día parcialmente nublado, por lo que las condiciones de radiación varían constantemente. Ello produce unas diferencias de 4.4 A y 550.5 W entre las corrientes de cortocircuito y máxima potencia generada de M3 y M4. El nivel de irradiancia recibida influye sobre la eficiencia del string, aumentando con ella. Este comportamiento es el esperado para estos niveles de irradiancia de acuerdo con los resultados presentados en el Capítulo 2.

Las simulaciones correspondientes a M4, M5 y M6 no aportan nueva información ya que el nivel de irradiancia empleado para ellas se ha obtenido aproximando las simulaciones a los valores registrados.

Tabla 4.4. *Parámetros de rendimiento eléctrico medidos.*

| Measurement | P_M | I_{SC} | V_{OC} | Efficiency |
|----------------|----------|----------|----------|------------|
| M1 (6 panels) | 779.4 W | 6.50 A | 178.00 V | 13.58 % |
| M2 (17 panels) | 2527.2 W | 7.80 A | 499.00 V | 11.87 % |
| M3 (6 panels) | 719.4 W | 5.60 A | 185.00 V | 13.34 % |
| M4 (6 panels) | 168.9 W | 1.20 A | 180.00 V | 12.96 % |
| M5 (6 panels) | 309.3 W | 2.30 A | 187.00 V | 13.27 % |

Tabla 4.5. *Parámetros de rendimiento eléctrico simulados.*

| Simulation | P_M | I_{SC} | V_{OC} | Efficiency | Error |
|----------------|----------|----------|----------|------------|--------|
| M1 (6 panels) | 768.4 W | 6.20 A | 175.00 V | 13.38 % | 0.19 % |
| M2 (17 panels) | 2540.2 W | 7.60 A | 491.80 V | 11.93 % | 0.06 % |
| M3 (6 panels) | 718.9 W | 5.40 A | 186.10 V | 13.33 % | 0.01 % |
| M4 (6 panels) | 167.2 W | 1.24 A | 181.46 V | 12.53 % | 0.13 % |
| M5 (6 panels) | 310.2 W | 2.32 A | 185.25 V | 13.30 % | 0.04 % |

Como puede observarse en las Figuras 4.6 y 4.7 y, especialmente, en las Tablas 4.4 y 4.5, los resultados ofrecen pequeñas diferencias. Éstas se producen por la baja precisión de las medidas realizadas ya que no se han podido llevar a cabo con el mismo sistema de medida y en los mismos precisos instantes. Por otro lado, se ha detectado el ya comentado problema derivado de la inercia térmica de los módulos FV, pero éste pierde relevancia tras considerarse el problema anterior. Sin embargo, se puede afirmar que el sistema de medidas de potencia y los modelos desarrollados funcionan ya que los errores en la eficiencia se encuentran por debajo del 0.20 %.

5. CONCLUSIONES

La energía solar fotovoltaica es la técnica más elegante de convertir energía solar en electricidad y representará un papel clave en cualquier futuro sostenible de producción energética. Por ello, se están realizando numerosos estudios acerca del comportamiento de las diferentes tecnologías fotovoltaicas y sistemas relacionados con ellas. Para lo cual, la caracterización de módulos y strings fotovoltaicos bajo condiciones reales de operación resulta esencial. Y, por ello, el Department of Electrical Energy Engineering de la Tampere University of Technology ha diseñado e instalado una planta de generación solar fotovoltaica compuesta por 69 módulos sobre el tejado del edificio del departamento.

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera ha sido diseñar un sistema de medición atmosférica y de las condiciones de operación de la instalación fotovoltaica. Por un lado, se requería medir, de forma precisa, las condiciones atmosféricas dadas para registros anuales de información meteorológica, estudios del rendimiento medio de generación o para publicar las condiciones atmosféricas en la Web del departamento en tiempo real. Por otro lado, para continuar con las líneas de investigación del grupo, resulta necesaria la información de las condiciones de operación de los módulos y strings fotovoltaicos, especialmente las condiciones de radiación solar global, directa y difusa, así como de iluminación de los strings que conforman la instalación.

El sistema diseñado está compuesto por una estación meteorológica automática state-of-the-art en paralelo con una malla de pares de sensores de radiación y temperatura de operación de los módulos. La estación meteorológica se ha diseñado en base a los criterios establecidos tras estudiar diverso material especializado publicado como la Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation de la World Meteorological Organization, entre otros, varias instalaciones operativas y tras realizar un extenso estudio de mercado para recopilar los sensores, instrumentos y sistemas de adquisición disponibles. En relación con el sistema de monitorización de las condiciones de operación, se han analizado estudios previos y varias publicaciones sobre instalaciones ya existentes con el fin de diseñar un sistema que se ajuste a las necesidades establecidas. Por último, tras estudiar varias arquitecturas posibles para el sistema de adquisición de datos, éste estará formado por unidades CompactRio de National Instruments, que utiliza módulos E/S intercambiables donde conectar las salidas de los sensores. Las unidades reunirán toda la información y la transmitirán a un PC vía Ethernet, evitando así problemas de ruido e interferencias.

Se ha programado en MatlabTM Simulink un modelo térmico que aproxima la temperatura de operación a partir de las condiciones atmosféricas bajo las que operan los módulos fotovoltaicos. El objeto del mismo es analizar la influencia de dichas condiciones sobre los módulos y completar un modelo del generador fotovoltaico, previamente desarrollado por el grupo de investigación, para estudiar como se ve afectado el rendimiento y la potencia del generador por las variables atmosféricas. Las simulaciones muestran una gran influencia de la temperatura ambiente, velocidad del viento e irradiancia sobre la temperatura de los módulos; mientras que la humedad relativa y dirección del viento no afectan significativamente a los módulos. En lo referente a la potencia generada y a la eficiencia de los strings, el incremento de la temperatura ambiente y velocidad del viento provoca un efecto positivo y negativo respectivamente. Por otra parte, las combinaciones prácticas de radiación, temperatura y velocidad del viento en condiciones reales en el exterior, producen que el sistema presente un rendimiento máximo para valores medios de estos parámetros. Siempre teniendo en cuenta el principio de que cuanto mayor sea la radiación recibida, mayor será la potencia generada por los módulos.

Como última instancia, el modelo térmico se ha desarrollado con la intención de comparar las medidas de potencia, realizadas en strings, con los resultados simulados una vez finalizado el montaje de los mismos. Sin embargo, debido a demoras en la distribución e instalación, tarea la cual no forma parte de este proyecto, finalmente, ha sido imposible realizar un testeo, completo o parcial, de los sistemas de medición diseñados. Por ello, la caracterización de los módulos fotovoltaicos se ha llevado a cabo con medidas atmosféricas registradas con una instalación de menor precisión del Department of Electronics. Las medidas de la temperatura de operación e irradiancia muestran una inercia térmica en los módulos que no se ha considerado en el modelo térmico, el cual aproxima la temperatura de operación en estado estacionario sin contemplar la temperatura inmediatamente anterior, por lo que se producen pequeños errores entre las temperaturas de operación medidas y calculadas. Lo mismo ocurre con las medidas del rendimiento eléctrico de los strings. Si bien, los resultados corroboran el correcto funcionamiento tanto del modelo térmico como de los sistemas de medida empleados.

Este Proyecto Fin de Carrera se ha limitado a la investigación de la influencia de las condiciones atmosféricas y de operación sobre la temperatura y rendimiento eléctrico de los módulos fotovoltaicos. Para caracterizar con precisión dichos sistemas es necesario relacionar los datos provistos por los sensores de medición atmosférica y de potencia mediante el futuro desarrollo de un programa en el software Labview que adquiera las señales, las procese y presente de forma comprensible y analizable. Por otro lado, es necesario finalizar el desarrollo de un sistema de medición de potencia que opere de forma continua. Una vez se realicen ambas tareas, será posible realizar futuros estudios

sobre los sistemas fotovoltaicos y dispositivos relacionados bajo diferentes condiciones de iluminación de los módulos y strings fotovoltaicos, por ejemplo.

La realización de este Proyecto Fin de Carrera me ha aportado una gran experiencia, tanto a nivel personal como de cara al futuro mundo profesional. Por un lado, he tenido la necesidad de adaptarme al funcionamiento del Department of Electrical Energy Engineering, pese a las dificultades derivadas del idioma y de las diferencias culturales, por lo que he interiorizado la forma de trabajar general en Finlandia. Por otro lado, durante la realización del PFC he necesitado contactar con diferentes empresas, tanto finlandesas como de otros países, de forma eficiente, formal y con carácter técnico; además de mantener continuas reuniones con el grupo de trabajo presentando y debatiendo las diferentes propuestas derivadas de la búsqueda y análisis de una gran cantidad de material bibliográfico, en combinación con la información proporcionada por las empresas proveedoras.

Quiero destacar que realizar y redactar este PFC en inglés ha supuesto un importante reto que, indudablemente, me servirá de ejemplo y motivación para los desafíos futuros. Entre los cuales se encuentra la posibilidad, brindada a raíz de este proyecto, de continuar con los estudios de doctorado gracias a una beca de dicho departamento.

REFERENCIAS

- [1] Agencia Estatal de Meteorología. [WWW]. [2010]. Available at: <http://www.aemet.es/es/portada>
- [2] Alonso García, M. C. and Balenzategui, J. L. Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations. *Renewable Energy*, 29, 2004, pp. 1997-2010.
- [3] Amy de la Breteque, E. Thermal aspects of c-Si photovoltaic module energy rating. *Solar Energy*, 83, 2009, pp. 1425-1443.
- [4] Benghanem, M. Measurement of meteorological data based on wireless data acquisition system monitoring. *Applied Energy* 86, 2009. pp 2651-2660.
- [5] Durisch, W., Tille, D., Würz, A. and Plapp, W. Characterisation of photovoltaic generators. *Applied Energy*, 65, 2000, pp. 273-284.
- [6] Durish, W., Urban, J. and Smestad, G. Characterisation of solar cells and modules under actual operating conditions. WREC, 1996.
- [7] Finnish Meteorological Institute. Weather Stations in Finland. [WWW]. [2010]. Available at: <http://ilmatieteenlaitos.fi/weather/stations.html>
- [8] Forero, N., Hernández, J., Gordillo., G. Development of a monitoring system for a PV solar plant. *Energy Conversion and Management* 47, 2006. pp 2329-2336.
- [9] Garrison, J. D., et. al.. *Environmental Measurement*. CRC Press LLC, 2000.
- [10] Jones, A. D., and Underwood, C. P. A Thermal Model For Photovoltaic Systems. *Solar Energy*, 4, 2001, pp. 349-359.
- [11] King, D. L. *Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions*. Sandia National Laboratories, AIP Press, 1997.
- [12] Koutrouilis, E., Kalaitzakis., K. Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring. *Renewable Energy* 28, 2003. pp 139-152.

- [13] Mäki, A. Topology of a Silicon-Based Grid-Connected Photovoltaic Generator. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2010.
- [14] Malik, A. Q., Damit, S. J. B. H. Outdoor testing of simple crystal silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28, 2003, pp. 1413-1445.
- [15] Markvart, T. *Solar electricity* 2nd ed. UK 2000, John Wiley & Sons. p. 280.
- [16] Martínez Bohórquez, M. A., Enrique Gómez, J. M., and Andújar Márquez, J. M. A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities. *Solar Energy*, 83, 2009, pp. 883-890.
- [17] Nagae, S. et. al. Evaluation of the impact of solar spectrum and temperature variations on output power of silicon-based photovoltaic modules. Elsevier, 2006.
- [18] NAPS Systems. Technical Description of Photovoltaic module NP190GKg. [WWW]. [Cited 14/09/2009]. Available at:
<http://www.napssystems.com/stc/attachments/NP190GKg%20TD140909P.pdf>
- [19] National Instruments, 2010. [WWW]. At: <http://www.ni.com>.
- [20] Rosiek, S. and Batlles, F.J. A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring.
- [21] Skoplaki, E., Boudouvis, A.G. and Palyvos, J.A., A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar energy materials & solar cells*, 92, 2008, pp. 1393-1402.
- [22] Skoplaki, E., Palyvos., J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Elsevier, 2008.
- [23] Tamizhmani, G., Ji, L., Tang, Y., Petacci, L. and Osterwald, C. Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Development For Energy Rating. NCPV and Solar Program Review Meeting, 2003, pp. 936-939.
- [24] van den Bos, C. J., van den Bos, A. *Solar Radiation Sensors: Applications. New Detector Development, Characterization and Classification According to ISO 9060.* IEEE Xplore, 1995.
- [25] Villalva, M. G., Gazoli, J. R. & Filho, E. R. Comprehensive approach to modelling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE transactions on power electronics* vol. 24 no. 5, 2009, pp.1198-1208.

[26] World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8, 2008.

ANEXO A