

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y
Aplicaciones Numéricas En Ingeniería



Trabajo Final de Máster

**Modelado de la producción de energía eléctrica de una
planta fotovoltaica basado en un sistema domótico**

Vicente Mena Santana.

Tutores: Dr. Domingo Juan Benítez Díaz
Dr. José Fernando Medina Padrón

Las Palmas de Gran Canaria, julio del 2013

Dedicado a mi familia

Agradecimientos

De bien nacidos es ser agradecidos (recita el refranero español). Por esta razón no quiero dejar de tener este gesto de cortesía con los demás. Deseo aprovechar esta magnífica ocasión para dar las gracias, ya que como dice Jaime Septién: *“el agradecimiento es uno de los dones de la verdadera nobleza de corazón y funda una estética: la belleza de una comunicación que antepone al otro al interés meramente personal”*.

Mi más profunda gratitud a todos mis profesores por su dedicación y a mis compañeros por su amabilidad y colaboración. Dedico una especial atención a mis tutores, por su orientación y sabias indicaciones y por su esfuerzo y empeño en que este trabajo viera la luz.

Con el máximo afecto quiero reconocer especialmente la inestimable ayuda recibida de mis colegas José Aurelio Santana y Carlos González Muñoz.

Por último sólo me queda que dar las gracias a todo aquel que lea esta obra.

Resumen

El concepto de estimación de la energía producida por un sistema fotovoltaico conectado a red está ampliamente estudiado en la literatura técnica sobre plataformas fotovoltaicas; podemos encontrar desde modelos para la simulación, hasta métodos simplificados de cálculo.

Existen predicciones simples que consisten en la mera multiplicación de un valor de irradiación por otro de potencia de pico que suelen conducir a estimaciones muy alejadas del comportamiento real del sistema. También hay intentos de aproximación a cálculos más exactos, analizando distintos factores que influyen en el proceso de generación de energía útil, tales como, emplazamiento del generador fotovoltaico, sombras, potencia máxima disponible, fenómenos de segundo orden, características del inversor y otras.

Aunque parece haber ciertas discrepancias entre las predicciones de los modelos y las medidas de la energía inyectada a la red eléctrica, es fundamental poder estimar la energía producida por un sistema fotovoltaico a lo largo del año, de la forma más exacta posible.

La evaluación de la energía que produce por un sistema fotovoltaico y se transforma en electricidad de CA es útil para estimar el análisis de la rentabilidad de cualquier proyecto, sin la necesidad de costosos prototipos fotovoltaicos. Los sistemas de predicción propuestos hoy día, se basan generalmente en la simulación del proceso físico de un módulo fotovoltaico, en condiciones meteorológicas locales estándar o promedio. Estos sistemas introducen algunos errores causados por el uso de un modelo teórico procedente del promedio de datos climatológicos.

En este trabajo se propone el estudio de un modelo, que permita caracterizar una planta fotovoltaica, de tal modo, que mediante la iluminancia medida en la zona, se pueda predecir la energía producida por la misma. El estudio se basará en las medidas obtenidas de plantas fotovoltaicas y de parámetros ambientales procedentes de una estación meteorológica instalada in situ. Ambas instalaciones estarán gobernadas por un sistema domótico integrado en el conjunto del campo de pruebas. Se espera que los resultados del sistema propuesto permitan una aproximación factible de la predicción de producción de energía eléctrica en tiempo real en instalaciones fotovoltaicas.

El objetivo de este trabajo es estudiar un sistema hardware/software portátil para la evaluación de la energía eléctrica de una planta fotovoltaica.

La energía producida por un sistema fotovoltaico parece ser proporcional a la medición de la iluminancia acumulada diaria, capturada por un sensor solar integrado en una estación meteorológica de bajo coste.

El hardware está compuesto por un sistema domótico instalado a propósito para el seguimiento tanto de la energía fotovoltaica y la energía eléctrica producidas como de los parámetros climáticos. El software consiste en un código que evalúa los datos obtenidos y mediante un procedimiento de calibración, devuelve un factor de proporcionalidad entre la iluminancia solar acumulada y la energía producida, por unidad superficie, de los módulos fotovoltaicos.

Una vez que el procedimiento de calibración se completa, la producción de energía fotovoltaica se estima mediante el producto de la iluminancia solar medida por la estación meteorológica y el factor proporcional calculado durante el proceso de calibración.

En nuestros experimentos, se han registrado valores de la energía producida por la instalación fotovoltaica y de energía estimada por el modelo propuesto. En este trabajo, utilizamos los datos medidos durante el mes de marzo de 2010. El error medio de la energía estimada en este intervalo de tiempo es del 0,61% sobre los registros de energía producida por la instalación de prueba.

Es posible el diseño de la construcción de una instalación de energía fotovoltaica integrada en un edificio, tomando en consideración los datos proporcionados, durante un periodo corto de tiempo, de una estación de meteorología estándar, compatible con los sistemas domóticos del hogar.

Este estudio muestra una correlación entre los niveles de iluminancia medidos por el sensor de luz solar de una estación meteorológica compacta conectada a un sistema domótico y de la energía eléctrica suministrada por la planta fotovoltaica. Hemos propuesto y realizado un método cálculo que hace una estimación precisa de la producción de energía suministrada por una planta fotovoltaica.

La exactitud de nuestro método es de aproximadamente 91,8%. Este sistema proporciona la estimación de producción de energía de una instalación fotovoltaica con la antelación de un día, con el fin de organizar el flujo de electricidad en la red.

Otra aplicación de este sistema podría ser la estimación del potencial solar en cualquier ubicación geográfica. Esta evaluación de la energía solar podría ser útil en la fase de diseño de una nueva planta fotovoltaica, ya que se puede abordar un estudio previo que puede resultar preciso y fiable y por tanto rentable.

Abstract

Antecedents: The valuation of the energy that may be produced by a photovoltaic system and transformed to AC electricity is useful for estimating the profitability analysis of a project, without the need of expensive photovoltaic prototypes.

Prediction systems for this proposal are usually based on simulating the physical process of a photovoltaic module, under standard or average local weather conditions. These systems introduce some errors caused by the use of a theoretical model or average climate data.

Objective: The aim of this paper is to study a portable hardware/software system for evaluating the electrical power by a photovoltaic plant.

Methods: The energy produced by a photovoltaic system seems to be proportional to the daily hour cumulative measurement of sun illuminance captured by the sunlight sensor of a low-cost weather station plugged in our building automation system.

The hardware is composed of a simple home automation bus installed for monitoring both electric power & energy production and climate parameters. The software consists of a calibration procedure, which provides a proportional factor between accumulated sun illuminance and the energy provided, per unit of surface area, of the photovoltaic modules.

Once the calibration procedure is completed, the photovoltaic power production is estimated by factoring the Sun illuminance provided by the weather station and the proportional factor calculated by the calibration process.

Results: In our experiments, we recorded the power and energy produced by the PV plant. In this paper, we use the values measured during seven days in March 2010 (from 24th to 30th). The average error of the estimated energy providing is 3.7% in the time interval of seven days that was used in the experiments. The maximum error was 8.25% (fifth day), and the minimum error was 0.28% (third day).

Conclusions: It is possible to make a building integrated system for photovoltaic power plants short interval estimations using standard metering devices compatible with home automation systems.

This Study shows a correlation between the sunlight levels measured by the sunlight sensor of a compact weather station plugged into a home automation system and the electric power supplied by the photovoltaic plant. We have proposed and produced a computational method that makes an accurate estimation of the power production supplied by a photovoltaic plant.

The accuracy of our estimation method is about 96.3%. This system is to provide accurate power production estimation from a PV plant in short time advance of one

hour previous interval, depending on weather conditions in order to organize the electricity flux in the network.

Other application of this system could be the estimation of the solar potential at any geographic location. This evaluation of the solar energy could be useful in the design stage of a new photovoltaic plant, since an accurate and reliable previous and profitable study can be addressed.

Índice General

1. Introducción.....	5
1.1 Antecedentes y justificación.....	5
1.2 Hipótesis de trabajo.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
2. Fundamentación teórica.....	7
2.1. Energía.....	7
2.2. Energía eléctrica.....	7
2.3. Energía solar fotovoltaica.....	8
2.3. Radiación solar.....	8
3. Modelo de estimación de energía fotovoltaica.....	9
3.1. Aproximación al modelo de estimación de energía fotovoltaica.....	11
3.2. Formulación del modelo de estimación de energía fotovoltaica.....	13
3.3. Definición de experimentos. Características y soluciones.....	15
4. Modelado con factor de proporcionalidad constante.....	17
4.1. Cálculo de la iluminancia acumulada.....	17
4.2. Modelo 1.1 $E \approx E_e = \alpha \cdot I$, $\alpha = \text{Cte}$	19
4.2.1. Planteamiento del problema.....	19
4.2.2. Determinación del factor de proporcionalidad α	19
4.2.3. Evaluación del Modelo 1.1 con α constante.....	20
4.2.4. Estimación de Energía con α constante. Resultados experimentales.....	21
4.2.5. Eficiencia del modelo de estimación de energía con α constante.....	23
4.2.6. Resultados experimentales con α constante.....	24
4.3. Modelo 1.2 $E \approx E_e = \alpha_m \cdot I$, $\alpha_m = \text{Cte}$	26
4.3.1. Planteamiento del problema.....	26
4.3.2. Cálculo del factor de proporcionalidad α_m	26
4.3.3. Resultados experimentales con α_m constante.....	27

5. Modelado con matriz de coeficientes α' y α_M.	31
5.1. Modelo 2.1 $E \approx E_e = \alpha' \cdot I$	31
5.1.1. Planteamiento del problema.....	31
5.1.2. Cálculo de la matriz de coeficientes α'	31
5.1.3. Resultados experimentales con α'	35
5.2. Modelo 2.2 $E \approx E_e = \alpha_M \cdot I_M$	39
5.2.1. Concepto de iluminancia modulada.....	39
5.2.2. Cálculo de la iluminancia modulada acumulada.....	42
5.2.3. Cálculo de la matriz de coeficientes α_M	45
5.2.4. Resultados experimentales con α_M	46
6. Soft.MoPrEFv.01	51
6.1. Generalidades sobre el archivo de datos.....	51
6.1.1. El archivo de datos y su contenido.....	51
6.1.2. Estructura del archivo de datos.....	52
6.2. Estructura del programa MoPrEFv.....	55
6.2.1. Lectura de datos.....	56
6.2.2. Entorno temporal.....	58
6.2.3. Presentación de resultados.....	59
6.2.4. Relación de archivos .m.....	60
7. Conclusiones y nuevas líneas de trabajo.	61
7.1. Conclusiones.....	61
7.1.1. Caracterización de instalaciones fotovoltaicas.....	61
7.1.2. Convergencia del modelo de estimación.....	62
7.1.3. Conclusiones generales.....	62
7.2. Líneas futuras.....	64
7.2.1. Optimización del modelo propuesto.....	64
7.2.2. Extensión de la validación del modelo.....	64
7.2.3. Extensión del modelo para estimación de Potencia.....	65
8. Referencias	66

Índice de figuras

<i>Figura 1</i> Instalación de energía fotovoltaica y estación meteorológica asociada	9
<i>Figura 2:</i> Conjunto de paneles fotovoltaicos instalados sobre cubierta.	10
<i>Figura 3:</i> Paneles solares fotovoltaicos	11
<i>Figura 4:</i> Potencia generada por la planta PV.....	12
<i>Figura 5:</i> Iluminancia medida por el sensor domótico	12
<i>Figura 6:</i> Modelo de estimación fotovoltaico	13
<i>Figura 7:</i> Iluminancia (I) recibida por los módulos PV durante un día	18
<i>Figura 8:</i> Caracterización de la instalación fotovoltaica	22
<i>Figura 9:</i> Factor de proporcionalidad α_j	33
<i>Figura 10:</i> Matriz de coeficiente α'	34
<i>Figura 11:</i> Error entre energía estimada y medida para α'	36
<i>Figura 12:</i> Función elevación solar desde el 19 al 25 de marzo de 2010	40
<i>Figura 13:</i> Iluminancia modulada versus iluminancia medida	42
<i>Figura 14:</i> Iluminancia modulada para un día claro	43
<i>Figura 15:</i> Iluminancia modulada de cada uno de los días de entrenamiento.	44
<i>Figura 16:</i> Conjunto $\{\alpha_M j\}$.y matriz de coeficientes de α_M	46
<i>Figura 17:</i> Relación de archivos de datos del mes de febrero de 2010.	51
<i>Figura 18:</i> Cuadro de texto con dos líneas de datos de un archivo norcopia.log	52
<i>Figura 19:</i> Diagrama del programa de estimación MPEFV	55
<i>Figura 20:</i> Diagrama de la secuencia de iniciación del programa de estimación.....	56

1. Introducción

1.1. Antecedentes y justificación

La energía solar emblema de las energías renovables ha protagonizado en los últimos años una progresión debido a las mejoras de la tecnología, asociada a la reducción de costes, las subvenciones aportadas por las diferentes administraciones y la voluntad de contribuir en la medida de lo posible a la sostenibilidad energética, ha hecho posible el incremento exponencial de estos proyectos de energía solar fotovoltaica integrada en cubiertas de edificios y conectados a la red.

El incremento de energía procedente de fuentes renovables, la necesidad de los operadores del control y adaptación del sistema eléctrico, y el interés de los industriales por conocer anticipadamente la producción de sus instalaciones, hacen necesario disponer de un método adecuado de predicción que permita el ajuste de la oferta y la demanda.

El concepto de estimación de la energía producida por un sistema fotovoltaico conectado a red está ampliamente estudiado en la literatura técnica sobre plataformas fotovoltaicas [4,5,6,7] ; podemos encontrar desde modelos para la simulación, hasta métodos simplificados de cálculo [8,9] .

Existen predicciones simples que consisten en la mera multiplicación de un valor de irradiación por otro de potencia de pico que suelen conducir a estimaciones muy alejadas del comportamiento real del sistema. También hay intentos de aproximación a cálculos más exactos, analizando distintos factores que influyen en el proceso de generación de energía útil, tales como, emplazamiento del generador fotovoltaico, sombras, potencia máxima disponible, fenómenos de segundo orden, características del inversor y otras [11,13] .

Aunque parece haber ciertas discrepancias entre las predicciones de los modelos y las medidas de la energía inyectada a la red eléctrica, es fundamental poder estimar la energía producida por un sistema fotovoltaico a lo largo del año, de la forma más exacta posible.

Se propone, por tanto, el estudio de un modelo, que permita caracterizar una planta fotovoltaica, de tal modo, que mediante la iluminancia medida en la zona, se pueda predecir la energía producida por la misma [1]. El estudio se basará en las medidas obtenidas de plantas fotovoltaicas y de parámetros ambientales procedentes de una estación meteorológica instalada in situ. Ambas instalaciones estarán gobernadas por un sistema domótico integrado en el conjunto del campo de pruebas. Se espera que los resultados del sistema propuesto permitan una aproximación factible de la predicción de producción de energía eléctrica en tiempo real en instalaciones fotovoltaicas.

1.2. Hipótesis de trabajo

Presentamos en este documento un modelo orientado al cálculo de la producción de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico conectado en red cuya finalidad es contribuir al estudio de la estimación de la producción de energía fotovoltaica. Para el desarrollo del presente estudio, se plantean varias hipótesis de trabajo, las cuales se concretan en evidencias que se expresan de la siguiente forma:

Se dispone de un medidor de iluminancia solar, asociado a un sistema domótico de bajo coste y de una instalación fotovoltaica conectada a la red, instalada en la cubierta de un edificio.

La iluminancia registrada por el sensor solar y la energía fotovoltaica generada en la instalación indicada, son parámetros que se relacionan, de tal modo, que la producción de energía eléctrica diaria es proporcional a la iluminancia acumulada cada día.

El estudio y evaluación de estas relaciones con los datos recabados puede resultar especialmente útil para diseño de un modelo de estimación de energía a escala industrial.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es construir un modelo de predicción de energía eléctrica, de origen fotovoltaico, mediante la iluminancia medida por un sensor domótico de luz solar, para ser aplicado; tanto, a plantas actualmente en producción, como para la estimación de rentabilidad de futuras instalaciones.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que permitirán ejecutar este encargo se concretan en:

- Definir la ecuación del modelo de estimación de energía fotovoltaica.
- Obtener un procedimiento de cálculo de la iluminancia solar.
- Caracterizar el factor de proporcionalidad entre iluminancia y energía.
- Generar un código para la resolución de la ecuación del modelo de estimación, utilizando el lenguaje de programación del paquete *Matlab*.
- Validar el modelo propuesto utilizando datos reales de producción de energía eléctrica, procedentes de una instalación fotovoltaica activa, gobernada por un sistema domótico KNX.

2. Fundamentación teórica

En este capítulo se exponen algunos conceptos y definiciones que puede resultar útil recordar en este momento de cara a un seguimiento más fluido del contenido principal de este trabajo.

A continuación se describe la parte teórica para situar el tema que se va a tratar ya que es la base de la que parte todo el trabajo tanto teórico, como experimental.

2.1. Energía.

La unidad de energía definida por el Sistema Internacional de Unidades es el julio, que se define como el trabajo realizado por una fuerza de un newton en un desplazamiento de un metro en la dirección de la fuerza, es decir, equivale a multiplicar un Newton por un metro.

El vatio-hora, simbolizado por Wh, es una unidad de energía expresada en forma de unidades de potencia \times tiempo, con lo que se da a entender que la cantidad de energía de la que se habla es capaz de producir y sustentar una cierta potencia durante un determinado tiempo. Así, un vatio-hora es la energía necesaria para mantener una potencia constante de un vatio (1 W) durante una hora, y equivale a 3600 julios. Más frecuentemente usados son sus múltiplos kilovatio-hora y megavatio-hora, de símbolos kWh y MWh respectivamente.

2.2. Energía eléctrica.

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz.

La energía eléctrica se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico como consecuencia de la diferencia de potencial que un generador esté aplicando en sus extremos.

2.3. Energía solar fotovoltaica.

La **energía solar** es la energía obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

La **energía solar fotovoltaica** es un tipo de electricidad renovable obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica,.

La energía eléctrica en los extremos de una célula fotovoltaica (energía solar fotovoltaica) es aquella que se obtiene directamente a partir de la conversión de la radiación solar incidente sobre dichas células fotovoltaicas (las placas solares que conforman un campo fotovoltaico)

2.3. Radiación solar .

Radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. El Sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 6000 K en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear, que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar.

El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a la temperatura ya citada. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado).

Illuminancia. Magnitud que expresa el flujo luminoso que incide sobre la unidad de superficie. Su unidad en el Sistema Internacional es el lux.

Insolación. Cantidad de energía solar recibida por una superficie.

3. Modelo de estimación de energía fotovoltaica

En la literatura consultada sobre el tema se pueden encontrar predicciones simples, como la multiplicación de un valor de irradiación por otro de potencia de pico, la cual, conducen a estimaciones muy alejadas del comportamiento real del sistema. [12].

También existen aproximación a cálculos más exactos (analizando distintos factores que influyen en el proceso de generación de energía útil, tales como, emplazamiento del generador fotovoltaico, sombras, potencia máxima disponible, fenómenos de segundo orden, características del inversor, etc), lo que, suponen una complicación del proceso de estimación [11,13].

El modelo que se propone en este trabajo es resultado de la observación de medidas procedentes de una estación meteorológica asociada a una instalación de energía fotovoltaica conectada a la red eléctrica, ambos sistemas se encuentran integrados en la misma infraestructura domótica, intentando conjugar sencillez con precisión.

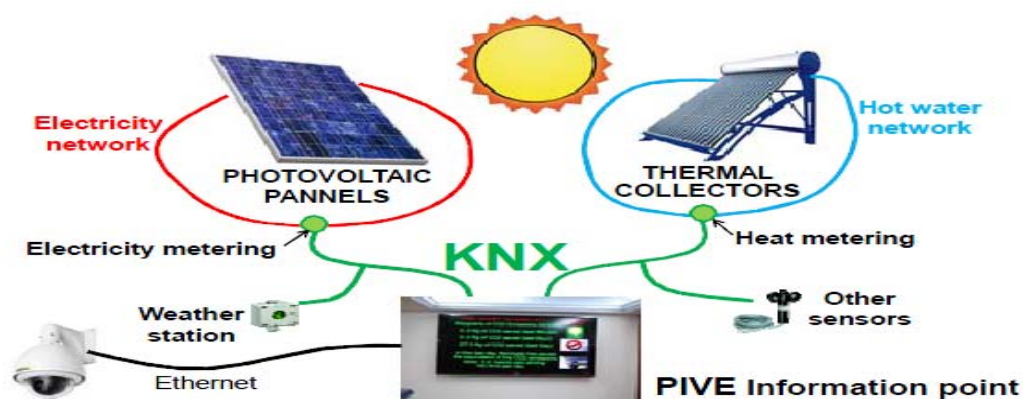


Figura 1 Instalación de energía fotovoltaica y estación meteorológica asociada

La figura 1, muestra un esquema funcional de la instalación que sirve de soporte, para la investigación que estamos desarrollando. El sistema está compuesto por: los módulos fotovoltaicos, los paneles termosolares, una cámara de video, una estación meteorológica, sensores medioambientales y un panel de información. El conjunto está interconectado a una red domótica con tecnología KNX. Esta infraestructura forma parte del proyecto denominado “**Punto de Información Turística de la Producción de Energías Verdes (PIVE)**”. Este proyecto ha sido desarrollado por el grupo de investigación de domótica del SIANI, bajo el auspicio de la Cátedra Telefónica de la ULPGC. El proyecto PIVE se ha propuesto para resolver un problema de accesibilidad

a la información relacionada con la cantidad de energía renovable que un edificio hotelero es capaz de producir. Como extensión de la innovación tecnología aportada por el proyecto PIVE se pone marcha este estudio sobre estimación de energía fotovoltaica.



Figura 2: Conjunto de paneles fotovoltaicos instalados sobre cubierta.

Los valores de iluminancia, potencia y de otros parámetros medioambientales utilizados en este ejercicio fueron medidos en las instalaciones del hotel Norcopia en el sur de Gran Canaria, durante el período comprendido entre enero y diciembre de 2010. La figura 2 es una perspectiva del conjunto de los paneles fotovoltaicos tomada desde la cubierta del hotel.

3.1. Aproximación al modelo de estimación de energía fotovoltaica.

Partimos de la idea de un fotodetector como transductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación óptica que incide sobre la superficie sensora. La instalación fotovoltaica está formada por paneles (figura 3) y cada uno de ellos está constituido por un conjunto de células.

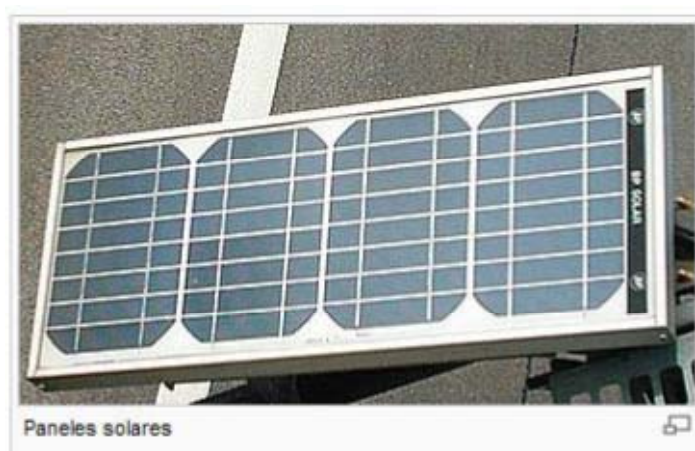


Figura 3: Paneles solares fotovoltaicos

Un punto clave en el planteamiento del problema que se pretende resolver es la caracterización de la instalación fotovoltaica que sirve de soporte en la investigación que se lleva a cabo. El elemento nuclear es la conversión de luz solar en energía eléctrica, es decir, la conversión de una partícula luminosa con energía en una energía electromotriz.

En un instante determinado, la potencia eléctrica (figura 4) proporcionada por los paneles fotovoltaicos está dada por el producto de los valores instantáneos del voltaje y la corriente de salida. Este valor es afectado por el conjunto de los elementos que constituyen la instalación y por el nivel de irradiación luminosa. La intensidad luminosa depende, entre otros, de factores meteorológicos, localización y las variaciones estacionales en el lugar de utilización.

Para abordar la solución al problema que se plantea se han realizado medidas en la instalación fotovoltaica que se ha tomado como referencia para realizar el presente estudio. Entre otras medidas, la figura 4 muestra la potencia generada por la instalación fotovoltaica y la figura 5 representa la iluminancia de irradiación solar, medida por el sensor solar domótico empleado en los experimentos realizados para la redacción de este trabajo.

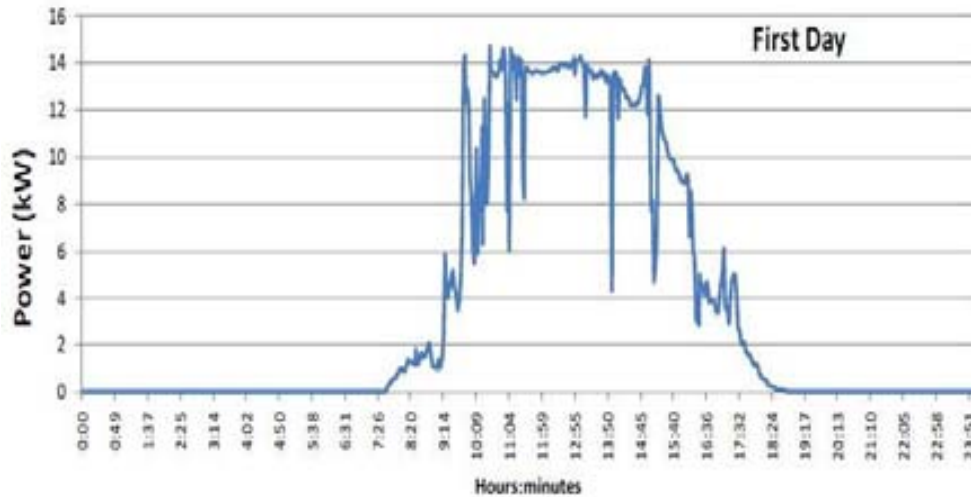


Figura 4: Potencia generada por la planta PV

Los datos de sendas figuras reflejan la observación de un día de estudio en la que se puede constatar la similitud de las gráficas de iluminancia y de potencia. La observación de las figuras 4 y 5, induce a proponer una relación entre ambos parámetros que sirva de apoyo a una aproximación de solución al problema que se pretende resolver, como es de estimar de forma eficiente la producción de energía eléctrica procedente de instalaciones fotovoltaicas.

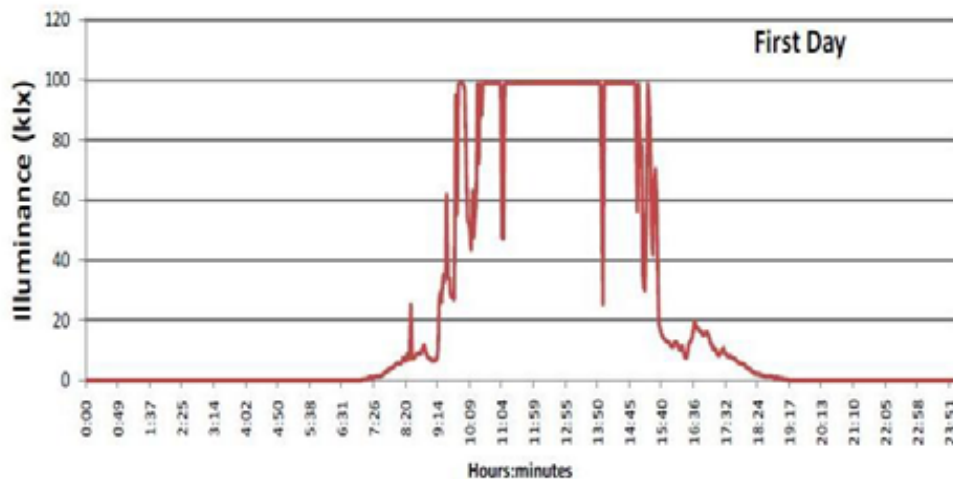


Figura 5: Iluminancia medida por el sensor doméstico

La eficiencia de conversión es la relación entre la energía eléctrica generada y la energía luminosa utilizada para obtenerla. Esta relación es dada en forma porcentual, tal y como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\eta \% = \frac{\text{Energía Generada}}{\text{Energía Incidente}} \times 100$$

La eficiencia se define como una relación energética teniendo en cuenta que el proceso de transformación depende de la duración del día solar donde

$$\text{Energía} = \text{Potencia} \times \text{Tiempo}$$

3.2. Formulación del modelo de estimación de energía fotovoltaica.

En la resolución del problema que nos ocupa, las instalaciones fotovoltaicas se tratarán como una caja negra. El objetivo, que se persigue, es caracterizar una instalación fotovoltaica de tal modo, que mediante la iluminancia medida en la zona se pueda estimar la energía eléctrica producida por el sistema.



Figura 6: Modelo de estimación fotovoltaico

De acuerdo a lo expuesto hasta el momento, el modelo que se propone queda enunciado de la siguiente forma: la energía eléctrica (E) producida por una instalación solar fotovoltaica es proporcional a la iluminancia acumulada (I) medida en el lugar de la instalación.

$$E \cong \alpha \cdot I \quad (1)$$

Dicho de otro modo, conocer el factor de proporcionalidad α , permite estimar la energía eléctrica (E) que puede generar una instalación fotovoltaica (PV), midiendo la iluminancia acumulada (I) recibida en la zona de interés.

La resolución de la ecuación (1) consiste en encontrar una función E_e (energía eléctrica estima) tal que

$$\alpha \cdot I = E_e \rightarrow E_e \approx E$$

Para encontrar la función $E_e = \alpha \cdot I$ que satisfaga el modelo, se propone una solución polinómica en x de tal forma que

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot x^i = (a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_n) \cdot \begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ \vdots \\ x^n \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \quad (2)$$

Siendo \mathbf{A} la matriz de coeficiente del polinomio y \mathbf{X} la matriz de potencias de x ordenadas de menor a mayor.

Para simplificar el problema se ensaya una aproximación lineal donde la función $P(x)$ es la ecuación de una recta, por lo que

$$P(x) = a_0 + a_1 \cdot x = (a_0 \quad a_1) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ x \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \quad (3)$$

Haciendo el siguiente cambio de variable, donde:

$$P(x) = E_e \quad \text{y} \quad x = I$$

Se tiene que:

$$E_e = P(I) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I} \quad (4)$$

Suponiendo la matriz

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 \\ I \end{pmatrix}$$

Si se denomina a la variable I como iluminancia acumulada cada día. \mathbf{I} será entonces la matriz de exponentes de iluminancia acumulada cada día.

La ecuación (4) se define como un polinomio en I que satisface el modelo propuesto en (1) siempre y cuando se conozca la matriz de coeficientes de $P(I)$.

Es decir, siempre que se sepa el valor de los elementos de \mathbf{A} , siendo:

$$\mathbf{A} = (a_0 \quad a_1)$$

Al observar la ecuación (1), si la iluminancia es cero, la energía producida por la instalación es nula. La ecuación (4) debe anularse igualmente en el caso en que el nivel de iluminancia sea igual a cero.

Si se multiplica el polinomio $P(I)$ por una función condicional $Q(I)$ se tiene que

$$E_e = (P(I)) \cdot Q(I) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{I}) \cdot Q(I)$$

Siendo $Q(I)$ una función de solución binaria de tal modo que

$$Q(I) = \begin{cases} 0, \forall I = 0 \text{ entonces } E_e = 0 \\ 1, \forall I > 0 \text{ entonces } E_e = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I} > 0 \end{cases}$$

Aplicando esta solución general, el Modelo propuesto no tiene limitación de uso de carácter físico, por lo que será válido para los casos en que la variable I sea igual a cero.

Esta circunstancia permite desarrollar distintos experimentos que se discutirán en los siguientes apartados. Con el objeto de simplificar la explicación, en el momento de abordar cada ejercicio se tomará la solución $Q(I) = 1$.

3.3. Definición de experimentos. Características y soluciones.

Para validar el modelo propuesto utilizando la solución aportada en la ecuación (4) se ha desarrollado una serie de experimentos. Se espera que las distintas tentativas resuelvan el problema de manera diferente y de forma satisfactoria.

Los ensayos se han agrupado en dos subconjuntos, tales que, se identifican por la solución que toma la matriz de coeficientes $[\mathbf{A} = (a_0 \ a_I)]$, los cuales se clasifican como sigue:

Modelo 1: Corresponde con los casos 1 y 2 y su principal característica es considerar nulo el termino independiente del polinomio $P(I)$, es decir $a_0 = 0$.

Modelo 2: Se relaciona con los casos 3 y 4. Ambos tienen en común que el a_0 es distinto de cero. En el experimento 4 aparece como novedad un nuevo concepto de iluminancia que se denomina iluminancia modulada.

En la tabla 1 se presenta las distintas soluciones que pueden satisfacer el modelo de estimación de energía fotovoltaica propuesto. Cada columna de la tabla 1 representa un experimento y en ella se identifica, la solución de la matriz de coeficientes y los cambios de variable, que operan en el polinomio $P(x)$, para convertirse en la expresión que reproduce nuestro modelo.

	Modelo 1.1	Modelo 1.2	Modelo 2.1	Modelo 2.2
P(x)	A X	A X	A X	A X
a_0	0	0	α'_0	α_{M0}
a_1	α	α_m	α'_1	α_{M1}
1	1	1	1	1
x	I	I	I	I_M
E_e	αI	$\alpha_m I$	$\alpha' I$	$\alpha_M I_M$

Tabla I: Propuestas de solución.

En los siguientes párrafos se tratará cada uno de los ensayos y se verificará, con datos experimentales, los resultados obtenidos.

4. Modelado con factor de proporcionalidad constante.

En la formulación del modelo de estimación fotovoltaica expuesto en el capítulo anterior, se pone de manifiesto, de acuerdo con la ecuación (4), que cualquiera de las posibles soluciones pasa por conocer los valores de \mathbf{A} (matriz de coeficientes del polinomio $P(I)$). Otro problema que tenemos que resolver es identificar la variable I y su relación con la iluminancia.

En este capítulo, se definirán iluminancia e iluminancia acumulada, conceptos que se utilizarán posteriormente y que son comunes en los experimentos uno, dos y tres. Seguidamente se abordará la resolución de la matriz de coeficientes, según el planteamiento descrito en el capítulo 3. Para finalizar se dará cuenta de los resultados experimentales obtenidos con datos extraídos de de la instalación fotovoltaica de referencia.

4.1. Cálculo de la iluminancia acumulada.

Iluminancia medida

La iluminancia (l) es la cantidad de flujo luminoso (θ) que incide sobre una superficie (S). Su unidad de medida en el sistema internacional es el lux (lx) que viene dado en lumen (lm) partido por unidad de superficie (m^2). La iluminancia (l) se puede medir mediante un sensor de luz

$$l (lx) = \frac{d\theta}{dS} \left(\frac{lm}{m^2} \right)$$

En este trabajo se dispone de un sensor de luz solar conectado a un bus domótico KNX. Los datos captados por el sensor domótico se registran en un fichero para ser tratado de forma adecuada posteriormente.

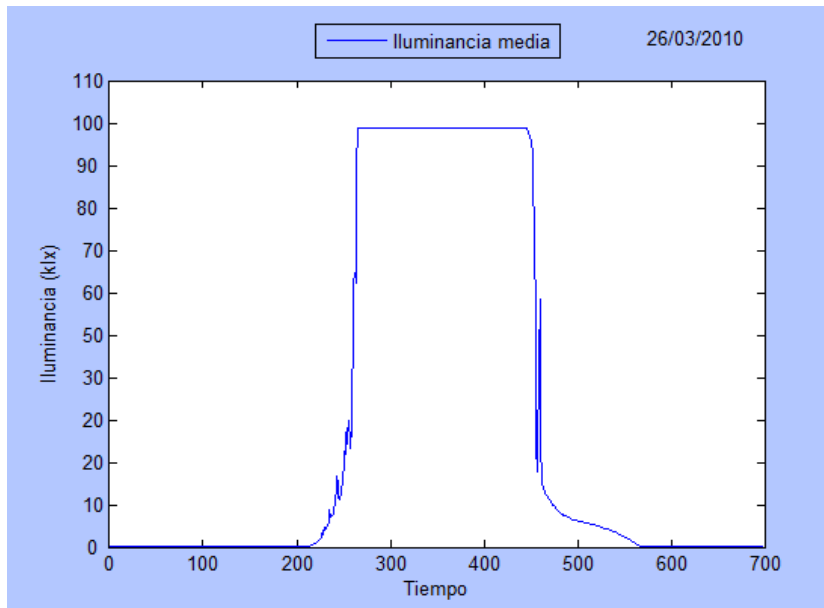


Figura 7: *Iluminancia (I) recibida por los módulos PV durante un día*

En la figura 7 se muestra la representación de la iluminancia recibida en un día despejado. La gráfica toma forma de pulso en escalón debido a la característica de saturación del sensor. Como se puede observar el eje de ordenadas está calibrado en klx y será la unidad de medida que se utilizará al tratar la iluminancia.

Iluminancia acumulada

Para nuestro propósito es necesario determinar los valores de iluminancia acumulada (I) y esta se define como el área obtenida al integrar la iluminancia medida en klx por unidad de tiempo en horas, de modo que:

$$I(klxh) = \int_t l \cdot dt \quad (5)$$

Sabiendo que se dispone de datos discretos, la iluminancia acumulada se puede expresar como una sumatoria de n elementos donde l_i representa el valor de iluminancia medida en cada muestra a la largo de un día. de tal manera que (I) se puede escribir de la siguiente forma:

$$I(klxh) = \sum_{i=1}^n l_i \cdot \Delta t \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que los datos de iluminancia se agrupan por días, resulta de interés para el estudio que se está realizando considerar la iluminancia acumulada cada día de tal forma que

$$I_j(klxh) = \sum_{i=1}^n l_{ij} \cdot \Delta t \quad (7)$$

l_{ij} = Iluminancia medida en cada incremento de tiempo y día

$j = 1 \dots N$. Siendo N= Número de días utilizados en el estudio

4.2. Modelo 1.1: $E \approx E_e = \alpha \cdot I$, $\alpha = Cte$.

4.2.1. Planteamiento del problema.

De acuerdo con la ecuación (3) y (4) de la formulación matemática del modelo de estimación de energía fotovoltaica se tiene que:

$$E_e = a_0 + a_1 \cdot I = (a_0 \quad a_1) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ I \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}$$

Teniendo en cuenta que: I= iluminancia acumulada

Si se supone $a_0 = 0$ y $a_1 = \alpha = Cte$.

La energía fotovoltaica estimada a partir de la iluminancia medida en la instalación será

$$E_e = \alpha \cdot I \quad (8)$$

Para determinar el valor de la constante α proponemos un procedimiento de cálculo que se explica en los siguientes apartados.

4.2.2. Determinación del factor de proporcionalidad α .

De acuerdo con el modelo de estimación que se quiere estudiar, se tiene que

$$E \approx E_e = \alpha \cdot I$$

Si α es constante y se supone que para un día concreto, existe un valor de energía estima igual a la energía producida por la instalación fotovoltaica ($E = E_e$)

Entonces

$$\alpha = \frac{E}{I}$$

Siendo α el factor de proporcionalidad entre la energía (E) y la iluminancia (I) para ese día.

Para calibrar el modelo se tomará N días de estudio dando como resultado un conjunto de valores de α , tal que cada elemento de dicho conjunto viene definido de la siguiente forma:

$$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}, \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

Donde I_j y E_j toman el valor la iluminancia acumulada en lxh y la energía medida en Wh por cada día de calibración.

Llegado a este punto, solamente no falta calcular el factor de proporcionalidad α , tal que, aplicado a la iluminancia I (lxh) de un día cualquiera, permita estimar la energía E (Wh) que se producirá en la instalación fotovoltaica calibrada, según el procedimiento anteriormente propuesto. Para ello tenemos que calcular la media de (8).

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^N \alpha_j}{N} \quad (10)$$

Como se puede comprobar en (9) el factor de proporcionalidad estudiado en este modelo de estimación es una constante y su valor depende del número de días de calibración.

4.2.3. Evaluación del Modelo 1.1 con α constante.

Concluido el proceso de cálculo que permite aplicar el modelo de estimación de energía fotovoltaica de acuerdo con el procedimiento aportado por el experimento 1.

Es decir, considerar como solución válida, un factor de proporcionalidad constante α , calculado como la media aritmética de los valores de α_j de un número N días de estudio, tal que, multiplicado por la iluminancia acumulada (I) de un día cualquiera, se tenga como resultado, la energía estimada (E_e) de ese día, de tal suerte, que ésta sea aproximadamente igual a la energía (E) producida por la instalación fotovoltaica de referencia para el día estimado.

Es imprescindible establecer criterios de evaluación, que ratifiquen las soluciones obtenidas.

El procedimiento que se ha adoptado para validar los resultados es calcular el error absoluto (\mathcal{E}), el error relativo (\mathcal{E}_r), el error relativo porcentual y porcentaje de precisión ($p\%$).

Las expresiones utilizadas para el cálculo de estos parámetros son las siguientes:

- 1.- El error absoluto de un día j (\mathcal{E}_j) es igual al valor absoluto de la diferencia entre la medida de la energía producida (E_j) y la energía estimada (E_{ej}).

$$\mathcal{E}_j = | E_j - E_{ej} | \text{ (kWh)}$$

- 2.- El error relativo de un día j (\mathcal{E}_{rj}) es igual al cociente entre el error absoluto (\mathcal{E}_j) y la medida de la energía producida (E_j).

$$\mathcal{E}_{rj} = \left| \frac{\mathcal{E}_j}{E_j} \right| = \left| 1 - \frac{E_{ej}}{E_j} \right|$$

- 3.- El error relativo porcentual de un día j ($\mathcal{E}_{rj}\%$) es igual al error relativo (\mathcal{E}_{rj}) multiplicado por 100

$$\mathcal{E}_{rj}\% = \mathcal{E}_{rj} \times 100$$

- 4.- El porcentaje de precisión de un día j ($p_j\%$) es igual a uno menos el error relativo (\mathcal{E}_{rj}) multiplicado por 100

$$p_j\% = (1 - \mathcal{E}_{rj}) \times 100$$

4.2.4. Estimación de Energía con α constante. Resultados experimentales.

Para evaluar el modelo descrito se eligió del 20 al 26 de marzo de 2010 y el 27 como día de predicción. Las mediciones fueron realizadas en la cubierta del edificio Norcopia de Gran Canaria, a una altura de 20 m sobre el nivel del suelo con una tasa de muestra de 1 registro cada dos minutos durante las 24 horas. Los datos fueron procesados, vía integración, para obtener las medias de energía e iluminancia. Las placas fotovoltaicas y el sensor solar están conectados al bus KNX.

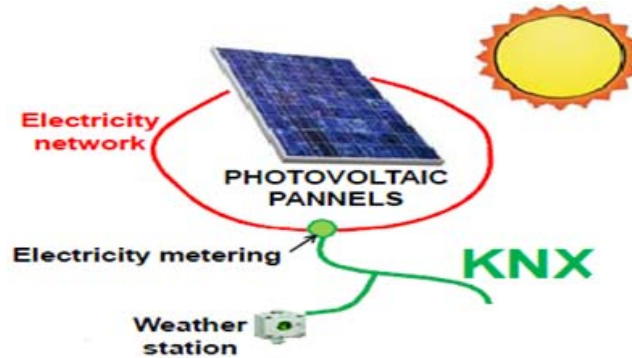


Figura 8: *Caracterización de la instalación fotovoltaica*

Se Considera el modelo propuesto $E=\alpha \cdot I$ y se calcula el factor de proporcionalidad de acuerdo con la ecuación (10) dando $\alpha=0,1379$. Aplicando éste a los valores de iluminancia obtenidos de acuerdo al procedimiento (8) se obtienen unos resultados de energía estimada (E_e) en Wh, los cuales quedan recogidos en la tabla IV y se comparan con datos de energía media.

Como datos significativos de la resolución del problema planteado se presentan las medias aritméticas de las energías estimadas y medidas dentro del intervalo de trabajo, lo que pone de manifiesto la posible utilidad de este método como estimador.

$$\overline{E_e} = 95,7373 \text{ kWh}$$

$$\overline{E} = 95,4600 \text{ kWh}$$

4.2.5. Eficiencia del modelo de estimación de energía con α constante.

Con el objetivo de evaluar la bondad de los resultados de este ejercicio práctico se han calculado los errores del modelo. Para tener una visión de conjunto en la columna 3 tabla III se ha representado la energía medida por día (E), y en la columna 5 se puede ver la energía estimada (Ee) por día.

Calculamos el error absoluto medio (\mathcal{E}) como el valor absoluto de la diferencia entre la media aritmética de la energía medida (E) y la media aritmética de la energía estimada (Ee).

$$\mathcal{E} = |\bar{E} - \bar{E}_e| = 0,277277 \text{ (kWh)}$$

El error relativo medio (\mathcal{E}_r) es igual al cociente entre el error absoluto (\mathcal{E}_j) y la medida de la energía producida (E_j).

$$\mathcal{E}_r = \left| \frac{\mathcal{E}}{\bar{E}} \right| = \left| 1 - \frac{\bar{E}_e}{\bar{E}} \right| = 0,002905$$

El error relativo medio porcentual ($\mathcal{E}_r\%$) es igual al error relativo medio (\mathcal{E}_r) multiplicado por 100

$$\mathcal{E}_r\% = \mathcal{E}_r \times 100 = 0,29 \%$$

El porcentaje de precisión medio porcentual ($p\%$) es igual a uno menos el error relativo medio (\mathcal{E}_r) multiplicado por 100. Esto significa que el modelo propuesto para la estimación de energía eléctrica de procedencia fotovoltaica, solamente midiendo la iluminancia que se recibe en la instalación de paneles solares se obtiene una precisión en % de

$$p\% = (1 - \mathcal{E}_r) \times 100 = 99,7 \%$$

4.2.6. Resultados experimentales con α constante.

En este punto se presenta un resumen de los resultados obtenidos del “Modelo 1.1” al considerar la solución con un factor de proporcionalidad α constante.

En la “Tabla II” se recogen las expresiones desarrolladas para la implementación del “Modelo 1.1” y que han sido utilizadas para calibrar y evaluar dicho modelo de estimación.

Día	Iluminancia acumulada	Energía medida PV	Factor de proporcionalidad	Energía estimada	Error Absoluto
J	I	E	α	E_e	ϵ
	Klx	kWh	W/lx	kWh	kWh
1 · · N	$I_j = \sum_{i=1}^n (l_{ij} \Delta t)$	$E_j = \sum_{i=1}^n (P_{ij} \Delta t)$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}$	$E_{ej} = \alpha \cdot I_j$	$\epsilon_j = E_j - E_{ej}$
Media	$\bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^N (I_j)}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N (E_j)}{N}$	$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^N (\alpha_j)}{N}$	$\bar{E}_e = \frac{\sum_{j=1}^N (E_{ej})}{N}$	$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{j=1}^N (\epsilon_j)}{N}$
N+1	$I_j = \sum_{i=1}^n (l_{ij} \Delta t)$	$E_j = \sum_{i=1}^n (P_{ij} \Delta t)$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}$	$E_{ej} = \alpha \cdot I_j$	$\epsilon_j = E_j - E_{ej}$

Tabla II: Resumen de expresiones empleadas en el modelo 1.1 para α constante.

Días	Illuminancia acumulada	Energía Medida PV	Factor de propor- cionalidad α	Energía estimada	Precisión	Error absoluto	Error relativo	Error relativo
	I	E		Ee		ϵ_a	ϵ_r	ϵ_r
	(klxh)	kWh		kWh	%	kWh		%
1	693,620000	86,780000	0,125112	95,672449	89,752882	8,892449	0,102471	10,247118
2	652,060000	92,460000	0,141797	89,939992	97,274489	2,520008	0,027255	2,725511
3	736,550000	91,660000	0,124445	101,593874	89,162259	9,933874	0,108377	10,837741
4	748,050000	101,050000	0,135085	103,180092	97,892041	2,130092	0,021080	2,107959
5	588,410000	88,820000	0,150949	81,160615	91,376509	7,659385	0,086235	8,623491
6	712,440000	102,650000	0,144082	98,268331	95,731448	4,381669	0,042686	4,268552
7	727,500000	104,800000	0,144055	100,345588	95,749607	4,454412	0,042504	4,250393
media	694,090000	95,460000	0,137932	95,737277	93,848462	5,710270	0,061515	6,151538
8	714,830000	97,321000	0,136146	98,597989	98,687859	1,276989	0,013121	1,312141
	694,090000	95,460000	0,137533	95,737277	99,709535	0,277277	0,002905	0,290465

Tabla III: Resumen de resultados experimentales en el modelo 1.1 para α constante.

4.3. Modelo 1.2: $E \approx E_e = \alpha_m \cdot I$, $\alpha_m = \text{Cte.}$

4.3.1. Planteamiento del problema.

De acuerdo con la ecuación (3) y (4) de la formulación matemática del modelo de estimación de energía fotovoltaica se tiene que:

$$E_e = a_0 + a_1 \cdot I = (a_0 \quad a_1) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ I \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}$$

Si se supone $a_0 = 0$ y $a_1 = \alpha_m = \text{Cte.}$

La energía fotovoltaica estimada a partir de la iluminancia medida en la instalación será

$$E_e = \alpha_m \cdot I \quad (11)$$

Al resolver la ecuación (11) disponemos de de los siguientes datos:

E (kWh) Energía eléctrica de origen fotovoltaico producida en la planta.

I (klx) Iluminancia medida por el sensor solar

Teniendo en cuenta que la iluminancia acumulada I (klxh) quedó perfectamente definida en el punto 4.1, solamente queda pendiente el factor de proporcionalidad α_m .

Para determinar el valor de la constante α_m proponemos un procedimiento de cálculo que se explica en los siguientes apartados.

4.3.2. Cálculo del factor de proporcionalidad α_m .

En el estudio que estamos realizando se ha definido el concepto de factor de proporcionalidad como la razón entre la energía producida E medida en kWh y la iluminancia acumulada I medida en klxh.

Dicho concepto se ha empleado en el cálculo del factor de proporcionalidad α_j de cada uno de los días utilizados como entrenamiento.

En el modelo 1.2 vamos a emplear el mismo concepto pero de forma diferente, en este caso se denominará α_m y se define como la razón entre las medias aritméticas de la energía producida por cada día de entrenamiento y la iluminancia acumulada por esos mismos días.

Si se tiene que

$$I_m = \bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^N I_j}{N}$$

y

$$E_m = \bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N E_j}{N}$$

Entonces se puede escribir que

$$\alpha_m = \frac{E_m}{I_m} \quad (12)$$

Con el valor obtenido de la expresión (12) se calculará la energía estimada de acuerdo con el modelo propuesto expresado para este caso en la ecuación (11).

La evaluación de resultados aplicando esta versión 2 del modelo 1 se realizará utilizando las expresiones de cálculo de error que se explicaron anteriormente.

En el siguiente punto se presentará la tabla de resultados correspondiente al experimento que hemos expuesto.

4.3.3. Resultados experimentales con α_m constante.

En este punto se presenta un resumen de los resultados obtenidos del “Modelo 1.2” al considerar la solución con un factor de proporcionalidad α_m constante.

En la “Tabla IV” se recogen las expresiones desarrolladas para la implementación del “Modelo 1.2” y que han sido utilizadas para calibrar y evaluar dicho modelo de estimación.

Día	Iluminancia acumulada	Energía medida PV	Factor de proporcionalidad	Energía estimada	Error Absoluto
J	I	E	α	E_e	\mathcal{E}
	klx	kWh	W/lx	kWh	kWh
1 · · N	$I_j = \sum_{i=1}^n (l_{ij} \Delta t)$	$E_j = \sum_{i=1}^n (P_{ij} \Delta t)$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}$	$E_{ej} = \alpha_m \cdot I_j$	$\mathcal{E}_j = E_j - E_{ej}$
M	$\bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^N (I_j)}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N (E_j)}{N}$	$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^N (\alpha_j)}{N}$	$\bar{E}_e = \frac{\sum_{j=1}^N (E_{ej})}{N} = E_{em}$	$\bar{\mathcal{E}} = \frac{\sum_{j=1}^N \mathcal{E}_j}{N}$
m	$\bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^N (I_j)}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N (E_j)}{N}$	$\alpha_m = \frac{E_m}{I_m} = \frac{\bar{E}}{\bar{I}}$	$E_{em} = \alpha_m \cdot I_m = E_m$	$\mathcal{E}_m = E_m - E_{em}$

Tabla IV: Resumen de expresiones empleadas en el modelo 1.2 para α constante.

Días	Huminancia acumulada	Energía Medida PV	Factor de propor- cionalidad α	Energía estimada	Precisión	Error absoluto	Error relativo	Error relativo
	I	E		Ee		ϵ_a	ϵ_r	ϵ_r
	(klxh)	kWh		kWh	%	kWh		%
1	693,620000	86,780000	0,125112	95,395360	90,072183	8,615360	0,099278	9,927817
2	652,060000	92,460000	0,141797	89,679505	96,992759	2,780495	0,030072	3,007241
3	736,550000	91,660000	0,124445	101,299634	89,483271	9,639634	0,105167	10,516729
4	748,050000	101,050000	0,135085	102,881259	98,187770	1,831259	0,018122	1,812230
5	588,410000	88,820000	0,150949	80,925555	91,111861	7,894445	0,088881	8,888139
6	712,440000	102,650000	0,144082	97,983723	95,454187	4,666277	0,045458	4,545813
7	727,500000	104,800000	0,144055	100,054964	95,472294	4,745036	0,045277	4,527706
Media	694,090000	95,460000	0,137932	95,460000	93,824904	5,738929	0,061751	6,175096
8	714,830000	97,321000	0,136146	98,312426	98,981283	0,991426	0,010187	1,018717
m	694,090000	95,460000	0,137533	95,460000	100,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabla V: Resumen de resultados experimentales en el modelo 1.2 para α constante.

5. Modelado con matriz de coeficientes α' y α_M .

En este capítulo se estudiará el “Modelo 2” de estimación de energía de origen fotovoltaico. Siguiendo con el planteamiento expuesto en el capítulo 3 de Igual manera que el “Modelo 1”, en esta ocasión se analizan dos versiones.

5.1. Modelo 2.1: $E \approx E_e = \alpha' \cdot I$.

5.1.1. Planteamiento del problema.

De acuerdo con la ecuación (3) y (4) de la formulación matemática del modelo de estimación de energía fotovoltaica se tiene que:

$$E_e = P(I) = a_0 + a_1 \cdot I = (a_0 \quad a_1) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ I \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}$$

Teniendo en cuenta que: I = iluminancia acumulada calculada en punto 4.1

Si se supone $\mathbf{A} = (a_0 \quad a_1)$ Tal que $\mathbf{A} = \alpha'$

Entonces se puede considerar que

$$E_e = P(I) = \alpha'_0 + \alpha'_1 \cdot I = (\alpha'_0 \quad \alpha'_1) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ I \end{pmatrix} = \alpha' \cdot \mathbf{I}$$

La energía fotovoltaica estimada a partir de la iluminancia medida en la instalación será

$$E_e = \alpha' \cdot \mathbf{I} \quad (13)$$

Para determinar el valor de la matriz de coeficientes $\alpha' = (\alpha'_0 \quad \alpha'_1)$ proponemos un procedimiento de cálculo que se explica en los siguientes apartados.

5.1.2. Cálculo de la matriz de coeficientes α' .

De acuerdo con el modelo de estimación que se quiere estudiar, se tiene que

$$E \approx E_e = \alpha \cdot I$$

Si se supone que para un día concreto, existe un valor de energía estima igual a la energía producida por la instalación fotovoltaica ($E = E_e$)

Entonces

$$\alpha = \frac{E}{I}$$

Siendo α el factor de proporcionalidad entre la energía (E) y la iluminancia (I) para ese día.

Para calibrar el modelo se tomará N días de estudio dando como resultado un conjunto de valores de α , tal que cada elemento de dicho conjunto viene definido de la siguiente forma:

$$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}, \forall j = 1, 2, \dots, N$$

Donde I_j y E_j toman el valor la iluminancia acumulada en klxh y la energía medida en kWh por cada día de calibración.

Días de entrenamiento	Iluminancia acumulada por día	Energía producida por día	Factor de proporcionalidad por día
j	I_j	E_j	α_j
1	693,620000	86,780000	0,125112
2	652,060000	92,460000	0,141797
3	736,550000	91,660000	0,124445
4	748,050000	101,050000	0,135085
5	588,410000	88,820000	0,150949
6	712,440000	102,650000	0,144082
7	727,500000	104,800000	0,144055

Tabla VI: valores de α_j

Los valores de α_j obtenidos que se presentan en la tabla VI están representados en la gráfica 9

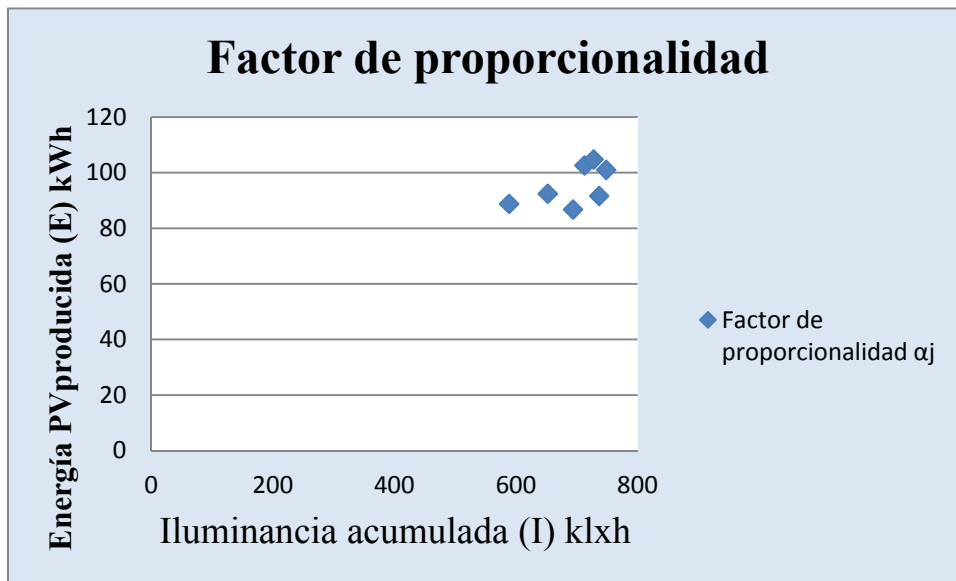


Figura 9: Factor de proporcionalidad α_j

Conocida la constelación formada por el conjunto de factores de proporcionalidad de cada día de entrenamiento $\{\alpha_j\}$, se puede comprobar en la figura 9 que el factor de proporcionalidad estudiado en este modelo de estimación no es único y su valor es distinto día a día.

Siguiendo con la solución pilinómica, para resolver la ecuación energía estimada E_e es necesario calcular la matriz de coeficientes α' , tal que, aplicado a la iluminancia I (lxh) de un día cualquiera, permita estimar la energía E (Wh) que se producirá en la instalación fotovoltaica de referencia,

Teniendo en cuenta, la aproximación lineal que se propone, para la solución de este problema, se tiene, que los valores de los coeficientes de la recta resultante, de la regresión aplicada a la gráfica que representa los coeficientes de proporcionalidad α_j , deben resolver satisfactoriamente la función E_e .

La figura 10 representa la línea de tendencia de α_j

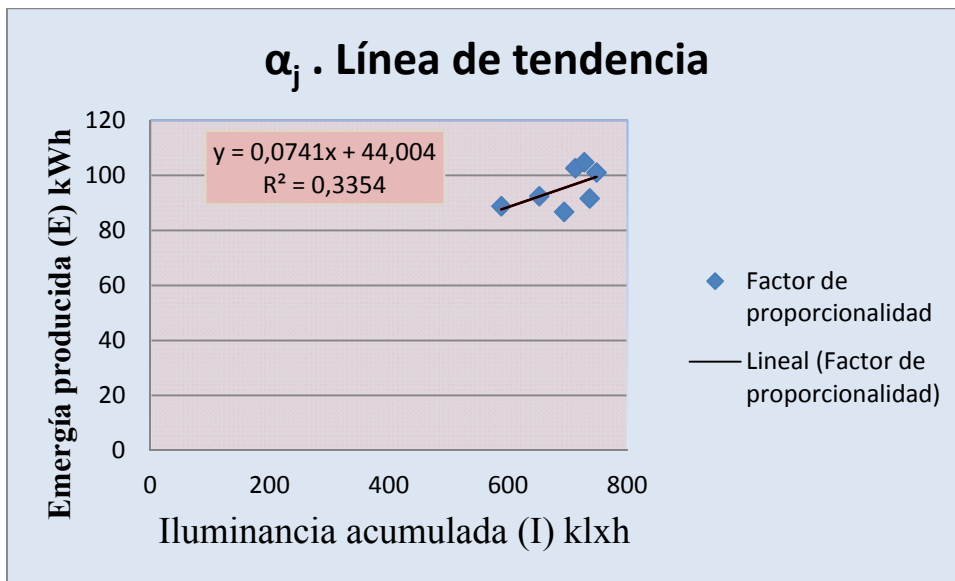


Figura 10: Matriz de coeficiente α'

La gráfica ha sido obtenida mediante la expresión

$$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}, \forall j = 1, 2, \dots, N$$

De tal forma que de acuerdo con la ecuación (13) se tiene

$$E_e = \alpha'_1 I + \alpha'_0 \quad (14)$$

Donde la matriz de coeficientes α' toma los siguiente valores

$$\alpha' = (\alpha'_0 \quad \alpha'_1) = (0,0741 \quad 44,004)$$

5.1.3. Resultados experimentales con α' .

Se presenta a continuación un resumen de los resultados obtenidos del “Modelo 2.1” al considerar la solución de la energía estimada según se expresa en la ecuación (14)

En la “Tabla VI” se recogen las expresiones desarrolladas para la implementación del “Modelo 2.1” y que han sido utilizadas para calibrar y evaluar dicho modelo de estimación.

Día	Iluminancia acumulada	Energía medida PV	Factor de proporcionalidad	Energía estimada	Error Absoluto
J	I	E	α	E_e	\mathcal{E}
	Klx	kWh	W/lx	kWh	kWh
1 · N	$I_j = \sum_{i=1}^n (l_{ij} \Delta t)$	$E_j = \sum_{i=1}^n (P_{ij} \Delta t)$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}$	$E_{ej} = \alpha'_1 I_j + \alpha'_0$	$\mathcal{E}_j = E_j - E_{ej}$
M	$\bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^N (I_j)}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N (E_j)}{N}$	$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^N (\alpha_j)}{N}$	$\bar{E}_e = \frac{\sum_{j=1}^N (E_{ej})}{N}$	$\bar{\mathcal{E}} = \frac{\sum_{j=1}^N (\mathcal{E}_j)}{N}$
N+1	$I_j = \sum_{i=1}^n (l_{ij} \Delta t)$	$E_j = \sum_{i=1}^n (P_{ij} \Delta t)$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_j}$	$E_{ej} = \alpha'_1 I_j + \alpha'_0$	$\mathcal{E}_j = E_j - E_{ej}$
'	$\bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^N (I_j)}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N (E_j)}{N}$	$\alpha' = (\alpha'_0 \quad \alpha'_1)$	$E_{e'} = \alpha'_1 \bar{I} + \alpha'_0$	$\mathcal{E}' = \bar{E} - E_{e'}$

Tabla VII: Resumen de expresiones empleadas en el modelo 2.1 para α'

En la “Tabla VIII” se recogen los resultados obtenidos al aplicar las expresiones desarrolladas para la implementación del “Modelo 2.1”.

Días	Iluminancia acumulada I (klxh)	Energía Medida PV E kWh	Factor de proporcionalidad α	Energía estimada Ee kWh	Precisión %	Error absoluto ϵ_a kWh	Error relativo ϵ_r	Error relativo ϵ_r %
1	693,620000	86,780000	0,125112	95,425142	90,037864	8,645142	0,099621	9,962136
2	652,060000	92,460000	0,141797	92,345546	99,876212	0,114454	0,001238	0,123788
3	736,550000	91,660000	0,124445	98,606255	92,421716	6,946255	0,075783	7,578284
4	748,050000	101,050000	0,135085	99,458405	98,424943	1,591595	0,015751	1,575057
5	588,410000	88,820000	0,150949	87,629081	98,659177	1,190919	0,013408	1,340823
6	712,440000	102,650000	0,144082	96,819704	94,320218	5,830296	0,056798	5,679782
7	727,500000	104,800000	0,144055	97,935650	93,450048	6,864350	0,065500	6,549952
Media	694,090000	95,460000	0,137932	95,459969	95,312883	4,454716	0,046871	4,687117
8	714,830000	97,321000	0,136146	96,996803	99,666879	0,324197	0,003331	0,333121
"	694,090000	95,460000	0,137533	95,459969	99,999968	0,000031	0,000000	0,000032

Tabla VIII: Resumen de resultados experimentales en el modelo 2.1 para α constante.

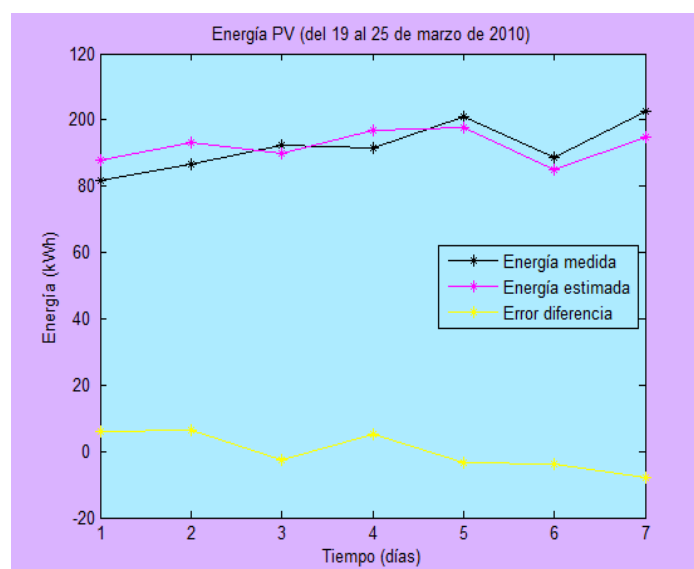


Figura 11: Error entre energía estimada y medida para α'

La figura 11 representa el error cometido al considerar la α' para estimar la energía eléctrica producida en la instalación fotovoltaica. El estudio se ha realizado tomando como días de calibración del 19 al 25 de marzo de 2010.

En la tabla 2 queda reflejado la mejora en precisión respecto del modelo 1 donde α es constante. El error cometido es de $\epsilon=0,552\%$.

Días	Iluminancia (klxh)	Energía	Energía	Precisión %
		Medida PV kWh	Estimada kWh	
1	627,410	81,900	87,999	99,256
2	693,620	86,780	93,295	99,249
3	652,060	92,460	89,971	99,731
4	736,550	91,660	96,729	99,447
5	748,050	101,050	97,649	99,664
6	588,410	88,820	84,880	99,556
7	627,410	102,650	94,801	99,235
Media		92,189	92,189	99,448

Tabla IX: Error entre energía estimada y medida para α' sobre días de entrenamiento

Otra mejora realizada al modelo de estimación utilizando α' es la posibilidad de estimar

Los valores de energía previstos para el día siguiente del periodo de entrenamiento. Esta nueva aproximación posibilita al modelo la capacidad de predicción.

En la tabla 3 se recoge los datos del día 26 de marzo de 2010 donde se tiene una precisión del 91,608% .

Días	Iluminancia (klxh)	energía	energía	Precisión
		Medida PV kWh	Estimada kWh	
				%
Media		92,189	92,189	99,448
26/03/2010	727,500	104,800	96,005	91,608

Tabla X: Error entre energía estimada y medida para α'

El error absoluto $\epsilon_{abs} = |Ee - E| = 8,795 \text{ kWh}$

$$\epsilon = \epsilon_{abs} / E = 0,08392$$

Lo que supone un error relativo medio $\epsilon\% = 8,392\%$

5.2. Modelo 2.2: $E \approx E_e = \alpha_M \cdot I_M$.

5.2.1. Concepto de iluminancia modulada.

En el modelo de estimación de energía que proponemos en este trabajo, se describe un problema técnico, donde, la clave de la solución, consiste en encontrar un factor de proporcionalidad adecuado, de tal modo, que multiplicando éste por la iluminancia medida, mediante un sensor solar doméstico de bajo coste, se pueda conocer la energía que produciría una instalación fotovoltaica, caracterizada por dicho factor de proporcionalidad.

En los prototipos estudiados hasta el momento se han ensayado varias soluciones que han dado como resultado distintos factores de proporcionalidad que se han obtenido al tratar la matriz de coeficientes de un polinomio en I . Para abordar el problema planteado se ha definido el concepto de iluminancia acumulada cada día, partiendo de la iluminancia medida por el sensor solar.

En este momento de desarrollo del modelo, y después de considerar diversas observaciones, se pretende exponer un nuevo experimento, para lo cual, ha sido necesario plantear una nueva manera de tratar la iluminancia medida. Este procedimiento implica la definición del concepto de “Iluminancia modulada”.

Elevación solar

Un elemento crucial en el concepto de iluminancia modulada es la consideración del ángulo de elevación del sol y su relación con la función de potencia generada por la instalación fotovoltaica y por otro lado se une correspondencia existente entre ésta y la iluminancia medida.

En la figura 12 se puede observar la función elevación solar para los días de entrenamiento. Su forma de onda es cuasi-senoidal, lo que permite aventurar una modulación de esta señal con la señal de iluminancia, de tal suerte que aplicando el modelo propuesto mejore los resultados de la energía estimada respecto de la producida.

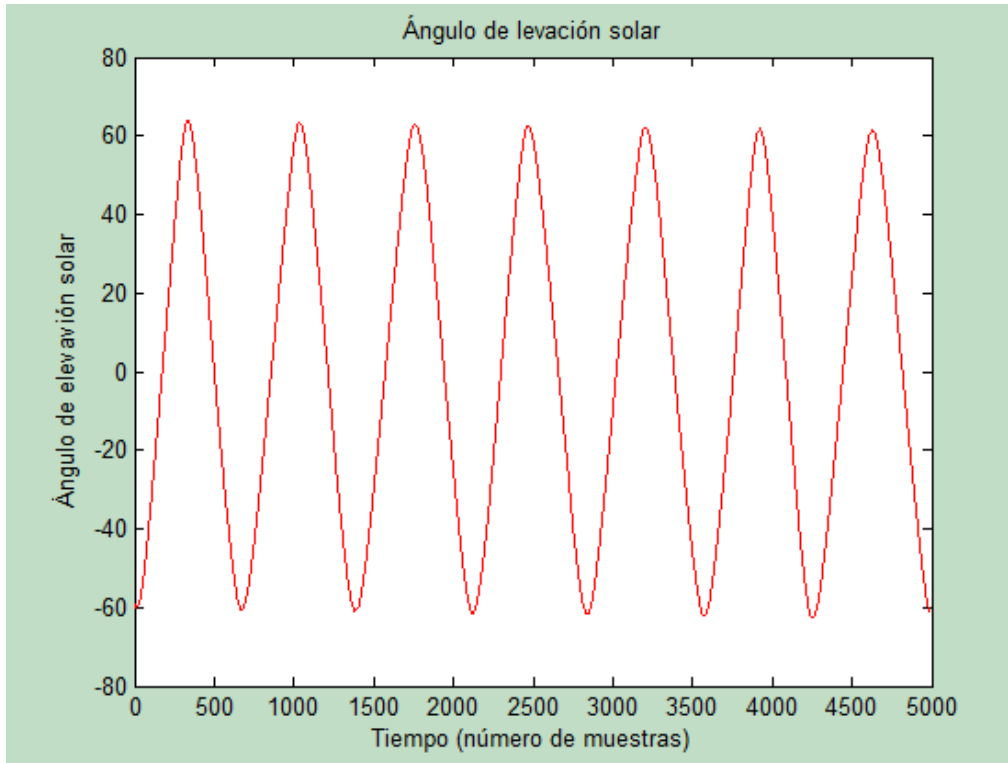


Figura 12: Función elevación solar desde el 19 al 25 de marzo de 2010

Función iluminancia modulada

La iluminancia modulada (l^M) es una función creada con el objetivo de subsanar el efecto de saturación del sensor domótico. De esta forma se pretende alcanzar el valor real de iluminancia.

Iluminancia modulada (l^M) en klx es una combinación entre la iluminancia (l) medida por el sensor domótico y la elevación solar. Esta nueva función se define como la suma de l y un factor de modulación ($K \cdot h$) condicionado por un criterio de selección (C). Su expresión matemática es la sigue:

$$l^M = l + k \cdot h \cdot C \quad (1)$$

Donde h es ángulo de elevación solar en grados y toma valores entre 60° y -60° , k es una constante que se define como factor de acoplamiento entre iluminancia y ángulo de elevación. Se expresa de la siguiente forma:

$$k = (l_{max} - St) / h_{max} \quad (\text{klx} / ^\circ) \quad (2)$$

“ St ” toma el valor de saturación que registra el sensor domótico en klx, h_{max} indica el máximo valor que toma el ángulo de elevación solar en grados y l_{max} representa el valor máximo que tomaría la iluminancia medida si se tiene un sensor solar ideal.

Con el propósito de obtener un valor lo más cercano posible al valor verdadero, y sabiendo que la l_{max} se toma en el momento de máxima radiación solar y coincide con h_{max} , como también existe un l igual a St se puede escribir.

$$l_{max} = \frac{h_{max}}{h_{st}} \cdot St \quad (.)$$

Siendo h_{st} el ángulo de elevación solar para $l = St$, se tiene que.

$$K = \left(\frac{h_{max}}{h_{st}} - 1 \right) \cdot \frac{St}{h_{max}} \quad (.)$$

Con lo cual, el factor de acoplamiento K viene dado por valores conocidos de iluminancia y elevación solar.

El criterio de selección C condiciona la iluminancia modulada de tal forma que

$$C = \begin{cases} 0 & \text{si } l \leq St \\ 1 & \text{si } l > St \end{cases} \quad (.)$$

Esto significa que la iluminancia modulada es igual a la iluminancia medida hasta que el sensor llega a su saturación.

$$l^M = l \quad (.)$$

A partir del momento en que la iluminancia medida l es superior al valor de saturación, la iluminancia modulada crece en (Δl) siendo

$$\Delta l = k \cdot h \quad (.)$$

En la figura 11 se muestra la forma de onda de la iluminancia modulada frente a la iluminancia medida registra en un día claro. Como se puede observar, en la ascendencia, ambas curvas se corresponden con precisión. Durante el periodo de saturación del sensor, mientras la iluminancia media permanece constante la influencia de la elevación solar genera incrementos de iluminancia hasta llegar a la l_{max} .

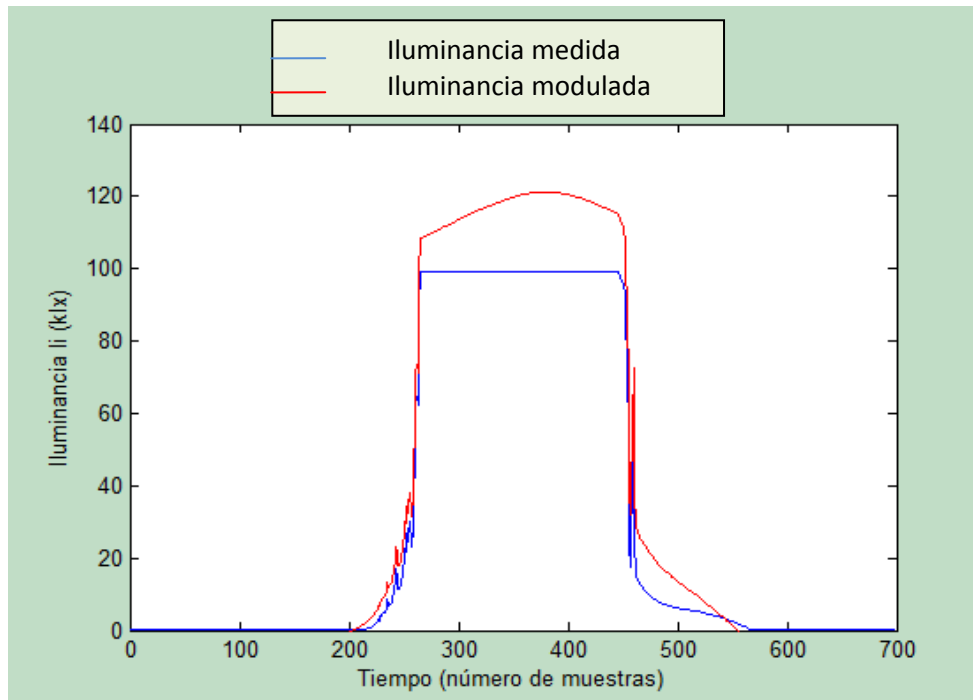


Figura 13: Iluminancia modulada versus iluminancia medida

En la pendiente de bajada, la iluminancia modulada se aleja de la iluminancia medida. Se aprecia una pequeña desadaptación entre ambas curvas. No se ha podido averiguar el motivo este desajuste que se manifiesta en las gráficas de todos los días estudiados para hacer este trabajo. No obstante se pretende seguir investigando las razones que motivan esta desviación por si tuviera alguna influencia significativa para los resultados del modelo que se propone.

5.2.2. Cálculo de la iluminancia modulada acumulada.

En el punto 5.2.1 se definió el concepto de iluminancia modulada

$$I^M = I + K \cdot h \cdot C$$

Como el factor de acoplamiento K viene dado por valores conocidos de iluminancia y elevación solar.

$$K = \left(\frac{h_{max}}{h_{st}} - 1 \right) \cdot \frac{St}{h_{max}}$$

La función iluminancia modulada representada en la figura se puede escribir así:

$$l^M = l + \left(\frac{h_{max}}{h_{st}} - 1 \right) \cdot \frac{St}{h_{max}} \cdot h \cdot C$$

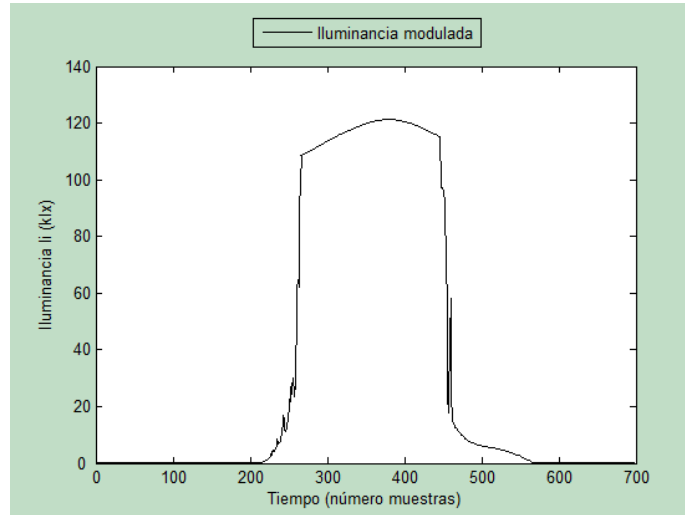


Figura 14: Iluminancia modulada para un día claro

Iluminancia modulada acumulada

La iluminancia modulada acumulada (I_M) se define como el área obtenida al integrar la iluminancia modulada (l^M) en klx por unidad de tiempo en horas, de modo que:

$$I_M(klxh) = \int_t l^M \cdot dt \quad ()$$

Al ser la iluminancia modulada una función discreta, la iluminancia modulada acumulada se puede expresar como la sumatoria de n elementos donde l_i^M representa el valor de iluminancia modulada en cada muestra a lo largo de un día. de tal manera que (I_M) se puede escribir de la siguiente forma:

$$I_M = \sum_{i=1}^n l_i^M \Delta t$$

Teniendo en cuenta que los datos de iluminancia se agrupan por días, resulta de interés para el estudio que se está realizando considerar la iluminancia modulada acumulada cada día de tal forma que

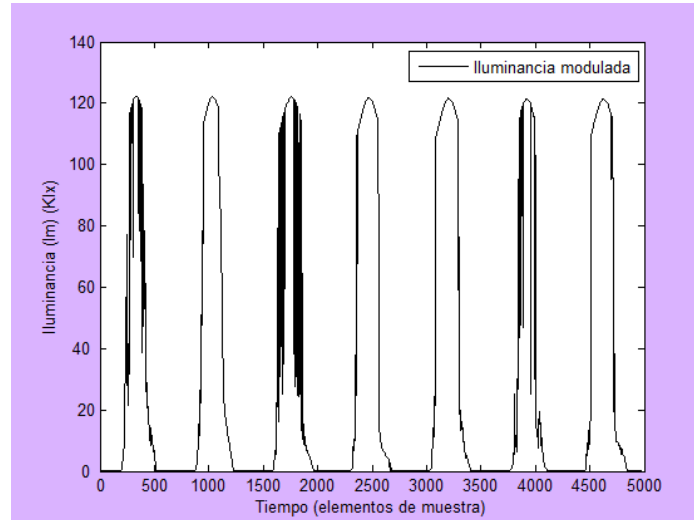


Figura 15: Iluminancia modulada de cada uno de los días de entrenamiento.

$$I_{Mj}(klxh) = \sum_{i=1}^n l_{ij}^M \cdot \Delta t$$

l_{ij}^M = Iluminancia modulada en cada incremento de tiempo y día

$j = 1 \dots N$. Siendo N = Número de días utilizados en el estudio

5.2.3. Cálculo de la matriz de coeficientes α_M .

En puntos anteriores se ha introducido los conceptos de iluminancia modulada y de iluminancia modulada acumulada, tomando como punto de partida la iluminancia medida por el sensor domótico. Estas definiciones son necesarias para resolver el “Modelo 2.2” de energía estimada.

Esta versión se ha tomado en consideración, teniendo en cuenta las evidencias observadas en el tratamiento de los datos recolectados de la instalación fotovoltaica descrita en capítulos anteriores, la cual ha servido de base experimental para el estudio que se está llevando a cabo.

Llegado a este punto, conviene hacer un resumen del planteamiento del problema a resolver y adaptarlo a la versión 2.2, del modelo de estimación de energía.

Si se tiene

$$E_e = P(x) = a_1 \cdot x + a_0$$

Donde

$$x = I_M, \quad / \quad a_1 = \alpha_{M1} \text{ y } a_0 = \alpha_{M0}$$

Entonces

$$E_e = P(I_M) = \alpha_M \cdot I_M$$

Siendo la matriz de coeficientes del polinomio $P(I_M)$

$$\alpha_M = (\alpha_{M1} \quad \alpha_{M0})$$

Para conocer los coeficientes que resuelven la ecuación de estimación E_e se procederá del mismo modo que en el modelo 2.1.

Primero se calculará el conjunto de factores de proporcionalidad respecto de la iluminancia modulada de cada día

$$\alpha_M^j = \frac{E_j}{I_{Mj}}, \quad \forall j = 1, 2, \dots, N$$

Donde I_{Mj} es la iluminancia modulada acumulada cada día

En la tabla VII se presenta el conjunto $\{\alpha_M^j\}$

Días de entrenamiento	Iluminancia acumulada por día	Energía producida por día	Factor de proporcionalidad por día
j	I_{Mj}	E_j	α_M^j
1	690,980000	86,780000	0,125590
2	649,400000	92,460000	0,142378
3	733,180000	91,660000	0,125017
4	744,650000	101,050000	0,135701
5	585,780000	88,820000	0,151627
6	709,020000	102,650000	0,144777
7	723,990000	104,800000	0,144753

Tabla XI: valores de α_M^j

En segundo lugar se obtendrá la matriz $\alpha_M = (\alpha_{M1} \alpha_{M0})$.

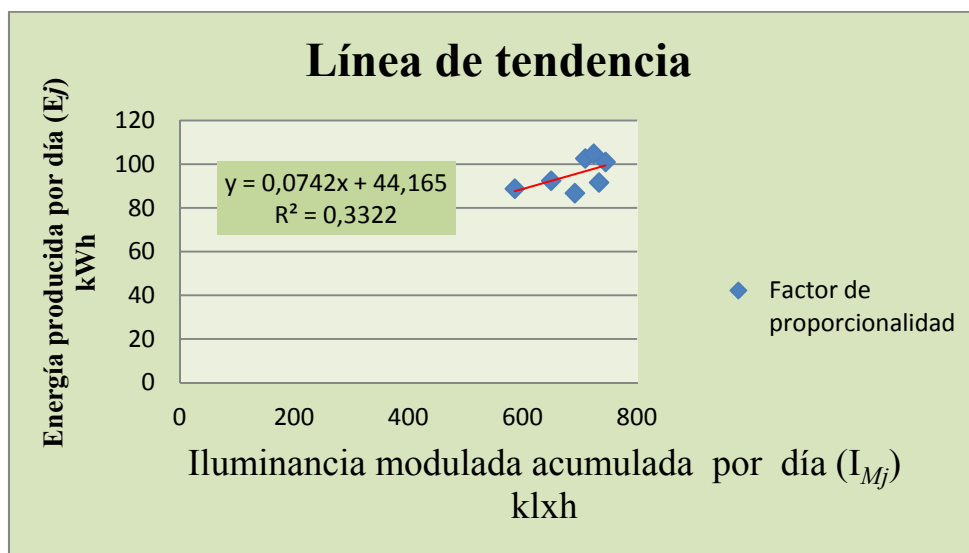


Figura 16: Conjunto $\{\alpha_M^j\}$ y matriz de coeficientes de α_M

Después de aplicar una aproximación lineal a la serie de puntos del conjunto $\{\alpha_M^j\}$. Se tiene que

$$\alpha_M = (0,0742 \ 44,165).$$

5.2.4. Resultados experimentales con α_M .

Día	Iluminancia acumulada	Energía medida PV	Factor de proporcionalidad	Energía estimada	Error Absóluto
J	I	E	A	E _e	ε
	Klx	kWh	W/lx	kWh	kWh
1 · · N	$I_{Mj} = \sum_{i=1}^n l_{ij}^M \Delta t$	$E_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} \Delta t$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_{Mj}}$	$E_{ej} = \alpha_{M1} I_{Mj} + \alpha_{M0}$	$\epsilon_j = E_j - E_{ej}$
N+1	$I_{Mj} = \sum_{i=1}^n l_{ij}^M \Delta t$	$E_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} \Delta t$	$\alpha_j = \frac{E_j}{I_{Mj}}$	$E_{ej} = \alpha_{M1} I_{Mj} + \alpha_{M0}$	$\epsilon_j = E_j - E_{ej}$
Media	$\bar{I}_M = \frac{\sum_{j=1}^N I_{Mj}}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N E_j}{N}$	$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^N \alpha_j}{N}$	$\bar{E}_e = \frac{\sum_{j=1}^N (E_{ej})}{N}$	$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{j=1}^N (\epsilon_j)}{N}$
M	$\bar{I}_M = \frac{\sum_{j=1}^N I_{Mj}}{N}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^N E_j}{N}$	$\alpha_M = (\alpha_{M0} \quad \alpha_{M1})$	$E_{eM} = \alpha_{M1} \bar{I}_M + \alpha_{M0}$	$\epsilon_M = \bar{E} - E_{eM}$

Tabla XII: Resumen de expresiones empleadas en el modelo 2.2 para α_M

Días	Huminancia acumulada	Energía Medida PV	Factor de proporcionalidad	Energía estimada	Precisión	Error absoluto	Error relativo	Error relativo
	I	E	α	Ee		ϵ_a	ϵ_r	ϵ_r
	(klxh)	kWh		kWh	%	kWh		%
1	690,980000	86,780000	0,125590	95,458515	89,999407	8,678515	0,100006	10,000593
2	649,400000	92,460000	0,142378	92,373279	99,906207	0,086721	0,000938	0,093793
3	733,180000	91,660000	0,125017	98,589755	92,439718	6,929755	0,075603	7,560282
4	744,650000	101,050000	0,135701	99,440829	98,407550	1,609171	0,015925	1,592450
5	585,780000	88,820000	0,151627	87,652675	98,685741	1,167325	0,013143	1,314259
6	709,020000	102,650000	0,144777	96,797083	94,298181	5,852917	0,057018	5,701819
7	723,990000	104,800000	0,144753	97,907857	93,423528	6,892143	0,065765	6,576472
Media	691,000000	95,460000	0,138549	95,459999	95,308619	4,459507	0,046914	4,691381
8	711,730000	97,321000	0,136739	96,998165	99,668278	0,322835	0,003317	0,331722
	691,000000	95,460000	0,138148	95,459999	99,999999	0,000001	0,000000	0,000001
M			0,0742 , 44,165					

Tabla XIII: Resumen de resultados experimentales en el modelo 2.2 para α_M .

En la tabla XIV se muestra un cuadro resumen de los resultados obtenidos comparando los distintos modelos de solución. En la tabla XV se da la misma información pero de forma extendida.

Resultados comparativos

	Modelo 1.1	Modelo 1.2	Modelo 2.1	Modelo 2.2
	1	2	3	4
E_e	$\alpha \cdot \mathbf{I}$	$\alpha_m \cdot \mathbf{I}$	$\alpha' \cdot \mathbf{I}$	$\alpha_M \cdot \mathbf{I}_M$
E_e	$(0 \ \alpha) \cdot$	$(0 \ \alpha_m) \cdot$	$(\alpha'_0 \ \alpha'_1) \cdot$	$(\alpha'_{M0} \ \alpha'_{M1}) \cdot$
E_e	$0.1373 \cdot \mathbf{I}$	$0.1375 \cdot \mathbf{I}$	$0,0741 \cdot \mathbf{I} + 44,04$	$0,0742 \cdot \mathbf{I}_M + 44,165$
$\mathcal{E}_r \%$	1,312141	1,018717	0,333121	0,331722

Tabla XIV: Resumen de resultados comparativos de las cuatro soluciones.

	Illuminancia acumulada	Energía Medida PV	Factor de propor- cionalidad	Energía estimada	Precisión	Error	Error relativo	Error relativo
Modelo1.1	I (klxh)	E kWh	α	Ee kWh	%	ϵ_a kWh	ϵ_r	ϵ_r %
Media	694,090000	95,460000	0,137932	95,737277	93,848462	5,710270	0,061515	6,151538
P	714,830000	97,321000	0,136146	98,597989	98,687859	1,276989	0,013121	1,312141
	694,090000	95,460000	0,137533	95,737277	99,709535	0,277277	0,002905	0,290465
Modelo 1.2								
Media	694,090000	95,460000	0,137932	95,460000	93,824904	5,738929	0,061751	6,175096
P	714,830000	97,321000	0,136146	98,312426	98,981283	0,991426	0,010187	1,018717
m	694,090000	95,460000	0,137533	95,460000	100,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Modelo 2.1								
Media	694,090000	95,460000	0,137932	95,459969	95,312883	4,454716	0,046871	4,687117
P	714,830000	97,321000	0,136146	96,996803	99,666879	0,324197	0,003331	0,333121
'	694,090000	95,460000	0,0741 , 44,04	95,459969	99,999968	0,000031	0,000000	0,000032
Modelo 2.2								
Media	691,000000	95,460000	0,138549	95,459999	95,308619	4,459507	0,046914	4,691381
P	711,730000	97,321000	0,136739	96,998165	99,668278	0,322835	0,003317	0,331722
M	691,000000	95,460000	0,0742 , 44,165	95,459999	99,999999	0,000001	0,000000	0,000001

Tabla XV: Resultados comparativos extendidos de las cuatro soluciones..

6. Soft.MoPrEFv.01.

En este capítulo se estudiará el archivo utilizado para recolectar los datos que se van a emplear en el presente estudio. Por otro lado describirá la estructura del programa desarrollado en este trabajo. “

6.1. Generalidades sobre el archivo de datos.

6.1.1. El archivo de datos y su contenido.

El sistema domótico implementado genera un archivo de datos diario. Actualmente se dispone de un conjunto de fichero, los cuales forman parte una amplia base de datos que permitirían realizar un estudio dilatado en el tiempo. En la figura se muestra la relación de archivos del mes de febrero de 2010

Nombre	Fecha modificación	Tipo	Tamaño
medidas_norcopia_backup01_02_2010_11_38	01/02/2010 13:37	Documento de texto	351 KB
medidas_norcopia_backup02_02_2010_11_39	01/02/2010 14:41	Documento de texto	15 KB
medidas_norcopia_backup04_02_2010_13_08	04/02/2010 15:08	Documento de texto	322 KB
medidas_norcopia_backup05_02_2010_13_09	05/02/2010 15:08	Documento de texto	300 KB
medidas_norcopia_backup06_02_2010_13_09	06/02/2010 15:09	Documento de texto	304 KB
medidas_norcopia_backup07_02_2010_13_10	07/02/2010 15:09	Documento de texto	302 KB
medidas_norcopia_backup09_02_2010_12_44	09/02/2010 14:44	Documento de texto	638 KB
medidas_norcopia_backup10_02_2010_12_45	10/02/2010 14:44	Documento de texto	299 KB
medidas_norcopia_backup11_02_2010_12_46	11/02/2010 14:44	Documento de texto	328 KB
medidas_norcopia_backup12_02_2010_12_46	12/02/2010 14:46	Documento de texto	312 KB
medidas_norcopia_backup13_02_2010_12_47	13/02/2010 14:46	Documento de texto	330 KB
medidas_norcopia_backup14_02_2010_12_48	14/02/2010 14:47	Documento de texto	346 KB
medidas_norcopia_backup15_02_2010_12_48	15/02/2010 14:48	Documento de texto	354 KB
medidas_norcopia_backup16_02_2010_12_49	16/02/2010 14:48	Documento de texto	340 KB
medidas_norcopia_backup17_02_2010_12_50	17/02/2010 14:49	Documento de texto	350 KB
medidas_norcopia_backup18_02_2010_12_51	18/02/2010 14:49	Documento de texto	345 KB
medidas_norcopia_backup19_02_2010_12_51	19/02/2010 14:50	Documento de texto	327 KB
medidas_norcopia_backup20_02_2010_22_52	21/02/2010 0:50	Documento de texto	496 KB
medidas_norcopia_backup21_02_2010_22_52	22/02/2010 0:51	Documento de texto	327 KB
medidas_norcopia_backup22_02_2010_22_53	23/02/2010 0:51	Documento de texto	350 KB
medidas_norcopia_backup23_02_2010_22_54	23/02/2010 19:57	Documento de texto	278 KB
medidas_norcopia_backup25_02_2010_19_43	25/02/2010 21:43	Documento de texto	293 KB
medidas_norcopia_backup26_02_2010_19_44	26/02/2010 21:42	Documento de texto	318 KB
medidas_norcopia_backup27_02_2010_19_44	27/02/2010 21:44	Documento de texto	304 KB

Figura 17: Relación de archivos de datos del mes de febrero de 2010.

Dentro de cada fichero existe una línea por cada toma de datos de los distintos componentes domóticos, entre ellos algunos de los que se monitorizan son la energía fotovoltaica, y parámetros ambientales. En el cuadro de texto que se ve a continuación se pueden observar dos líneas de datos completas, correspondientes al 31 de enero de 2010, tomadas en distinto momento pero de forma consecutiva.

```

Sun-Jan-31-11:39:32 GMT 2010:-2/6/00-98326680-Wh-2/6/03-8164.4-W-2/6/04-
7420.4-W-2/6/05-8238.0-W-2/5/01-2.2479046E7-Wh-2/5/03-4896.0-W-2/5/04-
5183.0-W-2/5/05-5317.0-W-2/5/06-82.24°C-2/5/07-25.92°C-2/5/13-22.8°C-2/5/11-
16332.8-Lux-2/5/10-0.0-m/s-2/5/12-NO-alarma-2/6/07-3222520.0-Wh-2/6/09-126.0-
W-2/6/10-127.0-W-2/6/11-2.0-W-2/6/13-3737057.0-Wh-2/6/15-24.0-W-2/6/16-88.0-
W-2/6/17-2.0-W-2/7/00-27452510-Wh-2/7/01-796.19995-W-2/7/02-799.64996-W-
2/7/03-793.95-W-2/7/04-2400.0-W¶

Sun-Jan-31-11:41:27 GMT 2010:-2/6/00-98327430-Wh-2/6/03-8379.6-W-2/6/04-
9068.399-W-2/6/05-7829.5996-W-2/5/01-2.2479534E7-Wh-2/5/03-4737.0-W-2/5/04-
5377.0-W-2/5/05-5383.0-W-2/5/06-82.24°C-2/5/07-25.92°C-2/5/13-22.9°C-2/5/11-
18360.32-Lux-2/5/10-0.0-m/s-2/5/12-NO-alarma-2/6/07-3222529.0-Wh-2/6/09-123.0-
W-2/6/10-125.0-W-2/6/11-17.0-W-2/6/13-3737061.0-Wh-2/6/15-144.0-W-2/6/16-
92.0-W-2/6/17-5.0-W-2/7/00-27452600-Wh-2/7/01-949.5-W-2/7/02-952.05-W-
2/7/03-951.74994-W-2/7/04-2858.8499-W¶

```

Figura 18: Cuadro de texto con dos líneas de datos de un archivo norcopia.log

6.1.2. Estructura del archivo de datos.

Cada línea tiene una cabecera que viene dada por la fecha y hora de recogida de los datos de esa línea. Cada medida dentro de una línea viene precedida de la dirección de grupo correspondiente, le sigue el dato y para finalizar se agrega la unidad de medida del parámetro en cuestión. A continuación se representa de forma gráfica la estructura básica de cada línea de datos.

Cabecera	Dirección Grupo	Dato	Unidad de medida
Sun Jan 31 11:39:32 GMT 2010:	2/6/00	98326680	Wh

Cabecera					
Día de la semana	Mes	Día del mes	Hora	Franja horaria	Año

En la tabla siguiente se desglosa la cabecera de la línea de datos correspondiente al 31 de enero de 2010 a las 11 horas 39 minutos 32 segundos según el tiempo del meridiano de Greenwich. También se presenta la relación de las distintas direcciones de grupo con su dato asociado y en el orden en que aparecen en la secuencia de cada línea.

Cabecera					
Día de la semana	Mes	Día del mes	Hora	Franja horaria	Año
Sun	Jan	31	11:39:32	GMT	2010:

Dirección Grupo	Dato	Unidad de medida
2/6/00	98326680	Wh
2/6/03	8164.4	W
2/6/04	7420.4	W
2/6/05	8238.0	W
2/5/01	2.2479046E7	Wh
2/5/03	4896.0	W
2/5/04	5183.0	W
2/5/05	5317.0	W
2/5/06	82.24	°C
2/5/07	25.92	°C
2/5/13	22.8	°C
2/5/11	16332.8	Lux
2/5/10	0.0	m/s
2/5/12	NO	alarma
2/6/07	3222520.0	Wh
2/6/09	126.0	W
2/6/10	127.0	W
2/6/11	2.0	W
2/6/13	3737057.0	Wh
2/6/15	24.0	W
2/6/16	88.0	W
2/6/17	-2.0	W
2/7/00	27452510	Wh
2/7/01	796.19995	W
2/7/02	799.64996	W
2/7/03	793.95	W
2/7/04	2400.0	W

La siguiente tabla muestra las direcciones de grupo que aparecen en el fichero de datos, La primera columna indica el orden en que se encuentran secuenciados en cada una de

las líneas de los archivos de datos, se da una descripción de su significado y la unidad en que está medido cada parámetro y la última columna se marca con una x los datos utilizados en el estudio realizado en este trabajo..

Orden	Dirección de grupo	Descripción	Unidad de medida	Datos utilizados en el estudio
5	2/5/01	Energía	Wh	
6	2/5/03	Potencia	W	
7	2/5/04	Potencia	W	
8	2/5/05	Potencia	W	
9	2/5/06	Temperatura	°C	
10	2/5/07	Temperatura	°C	
11	2/5/13	Tª exterior	°C	
12	2/5/11	Iluminancia	lx	x
13	2/5/10	Velocidad viento	m/s	x
14	2/5/12	Alarma		
1	2/6/00	Energía	Wh	
2	2/6/03	Potencia	W	
3	2/6/04	Potencia fotovoltaica	W	x
4	2/6/05	Potencia	W	
15	2/6/07	Energía	Wh	
16	2/6/09	Potencia	W	
17	2/6/10	Potencia	W	
18	2/6/11	Potencia	W	
19	2/6/13	Energía	Wh	
20	2/6/15	Potencia	W	
21	2/6/16	Potencia	W	
22	2/6/17	Potencia	W	
23	2/7/00	Energía fotovoltaica	Wh	x
24	2/7/01	Potencia	W	
25	2/7/02	Potencia	W	
26	2/7/03	Potencia	W	
28	2/7/04	Potencia fotovoltaica	W	

En primera instancia se realizó un tratamiento con hojas de cálculo excel, procedimiento satisfactorio para obtener resultados de un día. Cuando se pretende evaluar una semana o un periodo más largo este software no parece el más adecuado.

Para el caso de series de datos de periodos mayores de una semana, se ha preparado un programa en matlab que se ha denominado modelo de predicción de energía fotovoltaica (MoPrEFv) que permite leer de forma automática los ficheros .log tal y como se suministra desde el sistema domótico implementado.

Esto permite dedicar un tiempo relativamente corto al acondicionamiento y cálculo de los datos, lo cual, redunda en beneficio del análisis y obtención de información y conocimiento significativo de los datos tratados.

6.2. Estructura del programa MoPrEFv.

El programa desarrollado para tratar los datos que se han utilizado en el estudio que se presenta, si bien, es útil para el propósito que se pensó tiene un alcance limitado y sería interesante trabajar más en su perfeccionamiento si se quisiera profundizar.

El programa “Modelo de predicción de energía fotovoltaica” está estructurado en tres módulos: lectura de fichero de datos, entorno temporal y presentación de resultados.



Figura 19: Diagrama del programa de estimación MPEFV

El módulo 1 se encarga de la lectura de los ficheros “Norcopia .log” procedentes del sistema domótico instalado en la planta fotovoltaica que nos suministra la colección de datos acumulados durante el día. Este se encuentra dividido en tres bloques:

- 1.- Localización y apertura de ficheros
- 2.- Lectura de los campos de cada fichero
- 3.- Generación de resultados

El módulo 2 es un entorno temporal que permite fijar el periodo de días de entrenamiento y la fecha de predicción para aplicar el modelo:

- 1.- Entrada de fecha
- 2.- Llamar a presentación

El módulo 3 tiene como objetivo determinar los resultados que se desean conseguir. Es la parte del programa de cálculo que tiene las relaciones entre los distintos parámetros que analizamos para comprobar que el modelo propuesto es válido para estimar energía. Se ha construido de tres bloques:

- 1.- Lectura del fichero resultados
- 2.- Cálculo de parámetros pedidos
- 3.- Generación de gráficas

Para iniciar el programa se procederá siguiendo la secuencia que se indica en el gráfico. Primero activa la lectura de datos en segundo lugar se indica las fechas de trabajo y finalmente se ordena la generación de resultados

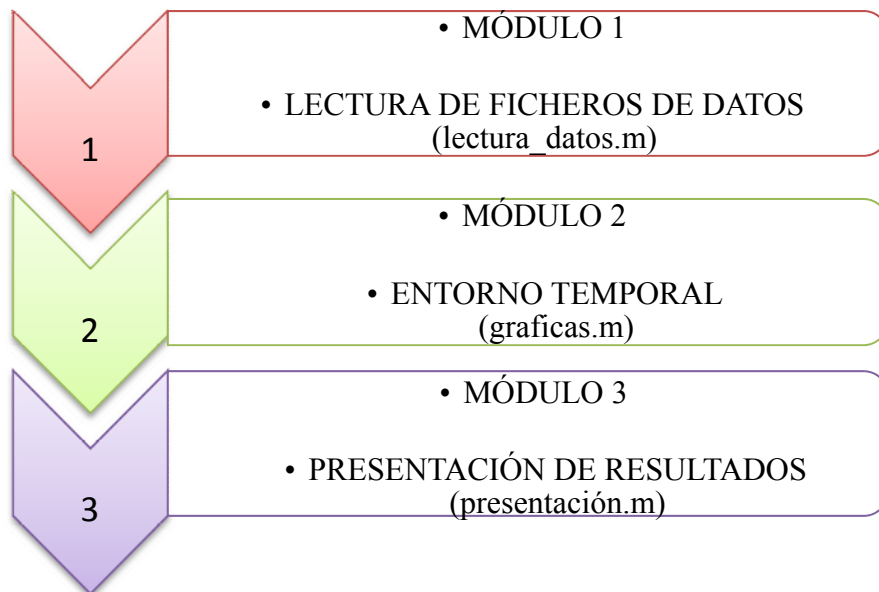


Figura 20: Diagrama de la secuencia de iniciación del programa de estimación

6.2.1. Lectura de datos.

El módulo “lectura de datos” está implementado en el fichero de matlab “lectura_datos.m”. La unidad está estructurada en los siguientes bloques: localización y apertura de ficheros, lectura de los campos de cada fichero y generación de resultados

1. Localización y apertura de ficheros.

A este bloque se le indica la ruta de acceso a los archivos Norcopia.log y se la instrucciones para comenzar con la lectura de cada uno de aquellos que se desean utilizar para trabajar. Por ejemplo:

```
ruta='C:\Users\NorcopiaMarzo2010\'
```

En la carpeta NorcopiaMarzo2010 se encontrarán los archivos *.log (en formato original) que se ha decidido utilizar. El programa se encarga de identificarlos para proceder a su lectura.

2. Lectura de los campos de cada fichero.

Como su nombre indica es la parte encargada de la lectura de cada uno de los campos que componen los ficheros de datos. La información que se pretende extraer está organizada en líneas de datos tal y como se explicó en el punto 6.1.

Identificado el primer fichero, de la pila que se encuentra en la carpeta escogida en la ruta de acceso, se procede a leer cada una de las líneas de datos, comenzando por la cabecera y continuando por todas las direcciones de grupo con sus datos y unidades de medida.

A continuación se muestra un fragmento de la secuencia de lectura del contenido de cada archivo. Como pueden observar se asigna una variable para cada uno de los elementos que forman el contenido del archivo de datos.

En este caso se ha tomado la letra c seguida de un número, por ejemplo

```
“c2=fscanf(fid,'%s',1) %Mes”
```

De esta forma queda identificado el mes. Por lo que, se ha necesitado 88 variables para completar la lectura de una línea.

```
while 1  
[c1,count]=fscanf(fid,'%s',1) %Día de la semana  
if count==0, break end
```

```

c2=fscanf(fid,'%s',1) %Mes
c3=fscanf(fid,'%s',1) %Día del mes
c4=fscanf(fid,'%s',1) ind=regexp(c4,':') %hora formato string
hora=str2double(c4(1:ind(1)-1))
minutos=str2double(c4(ind(1)+(1:2)))
segundos=str2double(c4(ind(2)+(1:2)))
c5=fscanf(fid,'%s',1) %GMT
c6=fscanf(fid,'%s',1) %año
c7=fscanf(fid,'%s',1) %2/6/00
c8=str2double(fscanf(fid,'%s',1)) %Valor
c9=fscanf(fid,'%s',1) %Unidad (Wh)
....
c73=fscanf(fid,'%s',1) %2/7/00 Energía fotovoltaica
c74=str2double(fscanf(fid,'%s',1)) %Valor
c75=fscanf(fid,'%s',1) %Unidad (Wh)
.....

```

Este proceso continua hasta completar todo el archivo. Igualmente se repite para los siguientes archivos, mientras existan elementos en la carpeta identificada.

3. Generación de resultados.

Realizada la lectura de los distintos datos es conveniente proceder a guardar los mismos de forma adecuada. Este bloque genera un conjunto de vectores que cumplen tal cometido, que luego se salvan en un fichero de resultados (resultados.mat). A continuación se muestra parte del código que se usa en el proceso de almacenamiento.

```

v4(n)=datenum([c3,'-',c2,'-',c6(1:end-1),'',c4]) %número de días en fraccional
v41(n)=c41 % Valor de iluminancia instantanea en lx
v86(n)=c86 %Valor de la potencia fotovoltaica en W
n=n
end
fclose(fid)
end
save resultados v4 v41 v86 nerr

```

Utilizar esta posibilidad facilita el proceso de cálculo, evitando que se deba iniciar la lectura de datos cada vez que se desee realizar una operación. Disminuyendo con ello el coste computacional.

6.2.2. Entorno temporal.

Es un módulo puente que facilita la operatividad del proceso de cálculo, pero sobre todo, es una unidad que marca el carácter del modelo de estimación que se pretende ensayar, es decir, comprobar la capacidad de predicción que puede tener el modelo de estimación de energía.

En ese sentido se ha proporcionado al programa la posibilidad de determinar dos rangos de fechas, a saber: en primera instancia, se trata de generar un periodo de entrenamiento que proporcione la capacidad de aprendizaje al modelo, para luego poder estimar la energía considerando los resultados de los datos conocidos. Por otro lado se pretende utilizar datos conocidos y predecir un dato desconocido a partir del aprendizaje adquirido mediante el entrenamiento.

El modelo de entorno temporal permite al usuario definir un periodo de entrenamiento y una fecha de predicción. Es una ventana para interactuar con el programa y que marca el intervalo de actuación del programa.

dia=30; mes=3; anio=2010; dia_inicial=15; dia_final=29

[a,b,c]=presentacion(dia,mes,anio,dia_inicial,dia_final,true)

Este módulo llama a presentación y permite entregar como salida los datos de “Energía Predicha de Iluminancia Medida”, “Energía Predicha de Iluminancia Modulada” y “Energía de Potencia medida” respecto de las fechas indicadas. En definitiva permite construir un entorno temporal para generar los resultados pedidos.

6.2.3. Presentación de resultados.

Este módulo se ha implementado en el archivo presentación.m y permite la interacción con el modelo de predicción de energía fotovoltaica, mediante la SELECCIÓN DE DÍAS DE OPERACIÓN Y GENERACIÓN DE GRÁFICAS DE RESULTADOS

function[EPpm,EPpM,EPm2]=presentacion(dia,mes,anio,dia_inicial,dia_final,grafica)

“Presentación de resultados” es el encargado de cargar el fichero “resultados.mat”, generado en el módulo de lectura de datos, con el contenido de los vectores v4, v46 y v86 que son los que contiene los datos de tiempo, iluminancia y potencia, medidos por el sistema domótico.

Con los datos correspondientes a los días seleccionados calcula los parámetros de iluminancia modulada y energía, tanto del periodo de entrenamiento como del día a predecir. Adicionalmente genera las gráficas que permiten visualizar los resultados obtenidos.

figure,plot(seleclum,selecpot,' '), figure,plot(lumod2,selecpot2,'')

Con la sentencia indicada se generaría: primero la gráfica de iluminancia y de potencia en los días de entrenamiento y después la iluminancia y la potencia el día de predicción seleccionado.

6.2.4. Relación de archivos .m.

Ha sido necesario implementar otros procedimientos y funciones que permiten realizar algún cálculo utilizado en distintos momentos de la ejecución del programa de estimación. Entre ellos se encuentran: iluminancia modulada, cálculo de alfa, cálculo de energía y periodo de selección.

Iluminancia modulada. Este es un módulo diseñado para calcular diferentes operaciones necesarias en el proceso de predicción de energía eléctrica, producida por una instalación fotovoltaica. El módulo actúa como procedimiento, el cual, es llamado por la unidad de gestión de Mpefv. Fundamentalmente se encarga de obtener la función de elevación solar y la iluminancia modulada.

Cálculo de energía. Se trata de una determina la energía partiendo de los valores de incremento de tiempo y de potencia.

Cálculo de alfa. Es una función que calcula el factor de proporcionalidad partiendo de los valores iluminancia y de energía medidas por el sistema.

A continuación se presenta la relación de archivos de matlab (*.m y *.mat) que han sido necesarios para desarrollar el programa de estimación de energía asociado al modelo de estimación que se propone en este trabajo. Los tres primeros corresponden a los módulos básicos del programa de estimación. El segundo grupo son módulos complementarios y el último se refiere al archivo donde se guardan los datos en forma de vectores.

Relación de archivos matlab (*.m y *.mat)

Básicos	Complementarios	Resultados
Lectura_datos.m Graficas.m Presentacion.m	Cal_alfa.m Motor.m Cal_energia.m Periodo.m	Resultados.mat

7. Conclusiones y nuevas líneas de trabajo.

7.1. Conclusiones.

Con los resultados obtenidos de las mediciones tanto en la instalación tomada de modelo como en la simulación con el Matlab, se pueden concretar una serie de conclusiones.

Una vez que el procedimiento de calibración se completa, la producción de energía fotovoltaica se estima mediante el producto de la iluminancia solar medida por la estación meteorológica y el factor proporcional calculado durante el proceso de calibración.

En nuestros experimentos, se han registrado valores de la energía producida por la instalación fotovoltaica y de energía estimada por el modelo propuesto. En este trabajo, utilizamos los datos medidos durante el mes de marzo de 2010. El error medio de la energía estimada en este intervalo de tiempo es del 0,61% sobre los registros energía producida por la instalación de prueba.

Es posible el diseño de la construcción de una instalación de energía fotovoltaica integrada en un edificio, tomando en consideración los datos proporcionados, durante un periodo corto de tiempo, de una estación de meteorología estándar, compatible con los sistemas domóticos del hogar.

Este estudio muestra una correlación entre los niveles de iluminancia medidos por el sensor de luz solar de una estación meteorológica compacta conectada a un sistema domótico y de la energía eléctrica suministrada por la planta fotovoltaica. Hemos propuesto y realizado un método cálculo que hace una estimación precisa de la producción de energía suministrada por una planta fotovoltaica.

La exactitud de nuestro método de es de aproximadamente 91,8%. Este sistema proporciona la estimación de producción de energía de una instalación fotovoltaica con la antelación de un día, con el fin de organizar el flujo de electricidad en la red.

7.1.1. Caracterización de instalaciones fotovoltaicas

- a) El conocimiento del factor de proporcionalidad α de una instalación fotovoltaica permite estimar la energía eléctrica (E) producida a partir de la lectura de la iluminancia recibida (I), sin más que disponer de una estación de medida con sensores solares domóticos.

- b) Independiente del tipo de cielo de forma general el sensor domótico representa fielmente la evolución diaria de la iluminancia con la limitación de su propio nivel de saturación.

7.1.2. Convergencia del modelo de estimación.

- a) Se han analizado cuatro aproximaciones de estimación de energía que muestran una convergencia progresiva al valor real de la energía producida en una instalación fotovoltaica.
- b) De los resultados obtenidos se deduce que el método general propuesto resulta adecuado para la predicción de energía eléctrica solar.
- c) Comparando los casos estudiados se deduce que es posible un mejor resultado en la predicción estimando con valores de luminancia y de elevación de elevación solar.

7.1.3. Conclusiones generales.

- a) Concluido el procedimiento de calibración, la producción de energía fotovoltaica se estima mediante el producto de la iluminancia solar medida por la estación meteorológica y el factor proporcional calculado durante el proceso de calibración.
- b) En los experimentos, se han registrado valores de la energía producida por la instalación fotovoltaica y de energía estimada por el modelo propuesto.
- c) En este trabajo, se utilizan los datos medidos durante el mes de marzo de 2010. El error medio de la energía estimada en este intervalo de tiempo es del 0,61% sobre los registros energía producida por la instalación de prueba.
- d) Es posible el diseño de la construcción de una instalación de energía fotovoltaica integrada en un edificio, tomando en consideración los datos proporcionados, durante un periodo corto tiempo, de una estación de meteorología estándar, compatible con los sistemas domóticos del hogar.
- e) Este estudio muestra una correlación entre los niveles de iluminancia medidos por el sensor de luz solar de una estación meteorológica compacta conectada a un sistema domótico y de la energía eléctrica suministrada por la planta fotovoltaica.
- f) Se ha propuesto y realizado un método de cálculo que hace una estimación precisa de la producción de energía suministrada por una planta fotovoltaica.

- g) La exactitud del método es de aproximadamente 91,8%. Este sistema proporciona la estimación de producción de energía de una instalación fotovoltaica con la antelación de un día, con el fin de organizar el flujo de electricidad en la red.

7.2. Líneas futuras.

Una vez comprobado que el modelo propuesto es válido para la estimación de energía de origen fotovoltaico y que el método empleado para desarrollarlo da resultados satisfactorios, es necesario hacer ver que existen aspectos mejorables y otros que debemos estudiar con mayor profundidad. Por esta razón se plantea algunas líneas de trabajo que se podrán desarrollar en un futuro, entre ellas cabe destacar:

7.2.1. Optimización del modelo propuesto.

- a) La aproximación lineal experimentada es susceptible de optimizar.
- b) Dentro de las soluciones polinómicas, es viable ensayar propuestas distintas a la aproximación lineal.
- c) Es posible plantear alternativas diferentes a la solución polinómica.
- d) El modelo con iluminancia modulada tiene potencial para seguir profundizando en su estudio y mejora.

7.2.2. Extensión de la validación del modelo.

- a) El trabajo deja abierta la puerta al estudio de grandes periodos temporales como puede suponer un año de datos.
- b) Otra alternativa importante es la comparativa con distintas instalaciones

7.2.3. Extensión del modelo para estimación de Potencia.

Del conocimiento de la elevación solar, la iluminancia y su relación con la potencia producida se puede modelar la estimación de potencia de instalaciones fotovoltaicas.

Otra aplicación de este sistema podría ser la estimación del potencial solar en cualquier ubicación geográfica. Esta evaluación de la energía solar podría ser útil en la fase de diseño de una nueva planta fotovoltaica, ya que se puede abordar un estudio previo que puede resultar preciso y fiable y por tanto rentable.

8. Referencias

- [1] D. Benítez, C. González, J. F. Medina; Prediction system based on domotic weather sensors for the energy production of solar power plants; Renewable Energy and Power Quality Journal, No.9 (RE&PQJ-9), May 12th, 2011, ISSN 2172-038X (<http://www.icrepq.com/rev-papers.htm>).
- [2] Canary Government, Tourists arrivals to Canary Islands 1990-2011 (in Spanish), http://www.gobcan.es/presidencia/turismo/estadisticas_y_estudios
- [3] Batista NC, Melício R, Matias JCO, Catalão JPS. Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy. Energy 2013; 49: p. 306–315.
- [4] Figueiredo J, Martins J. Energy Production System Management–Renewable energy power supply integration with Building Automation System. Energy Conversion and Management 2010; 51- 6: p. 1120-1126.
- [5] H. Gabler y E. Wiemken, Wow much energy will a specific PV-system produce?, Actas del XIII Congreso europeo de Energía solar fotovoltaica. Niza, 942-946 (1995)
- [6] S.J. Ransome, J.H. Woohlgemuth, S. Poropat and Rhys Morgan. kWh/kWp dependency on PV technology and balance of systems performance. Proc of the 29th IEEE PVSC, New Orleans , (2002) 1420-1423.
- [7] B. Kroposki, K. Emery, D. Myers, L.Mrig, A comparison of pfotovoltaic module performance evaluation methodologies for energy ratins, Proc of the 24th IEEE PVSC. (1994)
- [11] M.A. Abella y F. Chenlo, Sistemas fotovoltaicos conectados a red: Estimación de la energía generada. Era Solar nº131. 2006
- [12] E. Lorenzo. Medidas del IES, medidas CIEMAT y el “ cascabel del gato” Era Solar nº 114.
- [13]E. Caamaño. Tesis Doctoral “ Edificios Fofotovoltaicos conectados a la red eléctrica; Caracterización y análisis”. E.T.S.I.T. Universidad politécnica de Madrid. 1998.

