



Tesis Doctoral

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

THE USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AS AN ENERGY SOURCE IN THE RESIDENTIAL HOUSING SECTOR

USO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO FUENTE PARA EL
SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL



Eulalia Jadraque Gago

Tesis doctoral

UNIVERSIDAD DE GRANADA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL



**THE USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY
AS AN ENERGY SOURCE IN THE RESIDENTIAL
HOUSING SECTOR**

**USO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO
FUENTE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGIA
ELECTRICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL**

Eulalia Jdraque Gago

Granada, 2011

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Eulalia Jadraque Gago
D.L.: GR 2738-2011
ISBN: 978-84-694-3563-2

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL



**THE USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AS AN
ENERGY SOURCE IN THE RESIDENTIAL HOUSING
SECTOR**

**USO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO
FUENTE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGIA
ELECTRICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL**

Eulalia Jadraque Gago

TESIS DOCTORAL

Para la obtención del

**GRADO DE DOCTOR EUROPEO POR LA
UNIVERSIDAD DE GRANADA**

Directores

Javier Ordóñez García

Antonio Espín Estrella

Granada, 2011

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL



**THE USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AS AN
ENERGY SOURCE IN THE RESIDENTIAL HOUSING SECTOR**

**USO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO FUENTE
PARA EL SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA EN EL
SECTOR RESIDENCIAL**

**Memoria presentada por D^a. Eulalia Jadraque Gago para aspirar
al grado de Doctor Europeo por la Universidad de Granada**

Fdo. D^a. Eulalia Jadraque Gago

Directores

Fdo. D. Javier Ordóñez García
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Granada

Fdo. D. Antonio Espín Estrella
Doctor Ingeniero Industrial
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Granada

Granada, 2011

TESIS DOCTORAL

**Memoria presentada por D^a. Eulalia Jadraque Gago para aspirar al grado de
Doctor Europeo por la Universidad de Granada**

TRIBUNAL DE TESIS

Presidente: Fdo.:

Secretario: Fdo.:

Vocal: Fdo.:

Vocal: Fdo.:

Vocal: Fdo.:

Granada, 2011

A María y Sara

*“Nuestra ignorancia no es tan grande
como nuestra incapacidad
para utilizar lo que sabemos”*

M. King Hubbert (Geofísico y autor de la Teoría del Cenit)

Agradecimientos

Esta tesis es fruto de mucho trabajo que no se podría haber llevado a cabo si no es por el apoyo de todas las personas que me han rodeado durante estos inolvidables años de aprendizaje.

Mi gratitud más sincera a mis dos directores de tesis: Javier Ordóñez García y Antonio Espín Estrella, especialmente a Javier por haber estado siempre ahí desde el principio de todo, por su orientación y disposición incondicional. Es una suerte haber podido trabajar con ambos, por lo mucho que he aprendido y porque sin su ayuda no habría podido completar mi camino para obtener el grado de doctor. A mis compañeros Francisco Javier Alegre Bayo, Germán Martínez Montes, han hecho una gran labor crítica y de supervisión, ayudando a aumentar en gran medida la calidad de esta tesis y de las publicaciones que de ella se han derivado. A Begoña.

A la Edinburgh Napier University y al Transport Research Institute (TRI) por haberme permitido realizar una parte de esta tesis. Al profesor Tariq Muneer por su inestimable ayuda y paciencia y también a su familia. A mis compañeros en Edimburgo: Saioa Etxebarria-Berrizbeitia, Yieng Wei Tham, Yasser Aldali. A Jitka Mohelnikova, Sarah McCormack y Harris Kambezidis.

A la empresa Añil Construcciones y Servicios, S.A. por financiar una parte de la investigación.

A Mónica, M^a José y Paz por infundirme ánimos y por su amistad. A Pamela Faber. A Jesús Garrido, José Manuel Poyatos, Miguel Ángel Gómez y Antonio Peña.

A mi familia, especialmente a mi madre por ser el mayor apoyo que he tenido para cada una de las metas que he trazado en mi vida, y a quien quiero dedicar esta tesis. Gracias a mi hija Sara por existir, porque basta una sonrisa para darle sentido a tanto esfuerzo y porque en estos años me ha enseñado a valorar lo que es realmente importante en la vida también a ella le dedico esta tesis.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ESTRUCTURA DE TESIS	5
Capítulo I: Introducción	
EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN RESIDENCIAL	9
RADIACIÓN SOLAR	22
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	26
ILUMINACIÓN	33
OBJETIVOS	60
METODOLOGÍA	61

Capítulo II: Marco Normativo

ARTICULO: THE USE OF SOLAR ENERGY IN THE BUILDINGS CONSTRUCTION SECTOR IN SPAIN

Abstract	62
1 INTRODUCTION	63
2 SOLAR ENERGY IN SPAIN	64
3 LEGISLATION REGARDING CONSTRUCTION	67
3.1 Europe	67
3.2 Spain	67
4 METHODOLOGY	71
5 RESULTS	72
6 CONCLUSIONS	75
REFERENCES	77

Capítulo III: Modelos de Descomposición para la Irradiancia Horaria y la Temperatura

ARTICULO: INTER-RELATIONSHIP BETWEEN MEAN-DAILY IRRADIATION AND TEMPERATURE, AND DECOMPOSITION MODELS FOR HOURLY IRRADAITION AND TEMPERATURE

Abstract	79
1 INTRODUCTION	80
2 PRESENTLY AVAILABLE INFORMATION	83
3 PREVIOUS WORK	84

4	PRESENTLY PROPOSED MODELS	94
4.1	Models for mean-daily irradiation	94
4.2	Models for mean-hourly irradiation	105
4.3	Models for hourly temperature	107
5	CONCLUSIONS	109
6	ACKNOWLEDGEMENTS	110
	REFERENCES	110

Capítulo IV: Capacidad Energética Solar Fotovoltaica

ARTICULO: ANALYSIS OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CAPACITY OF RESIDENTIAL ROOFTOPS IN ANDALUSIA (SPAIN)

	Abstract	113
1	INTRODUCTION	114
2	CONTEXT AND JUSTIFICATION	115
3	METHODOLOGY	115
3.1	Building characterization. Total roof surface area	116
3.2	Useful roof surface area	119
3.3	Installation design	122
3.3.1	Installation type 1	123
3.3.2	Installation type 2	123
4	RESULTS	126
5	CONCLUSIONS	129
	REFERENCES	129

Capítulo V: Modelo Energético

ARTICULO: DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL FOR THE RESIDENTIAL SECTOR: ELECTRICITY CONSUMPTION IN ANDALUSIA (SPAIN)

	Abstract	131
1	INTRODUCTION	132
2	OUTLINE OF THE MODEL	133
3	CALCULATING ELECTRICAL POWER BY DETERMINATION OF THE LUMINOUS FLUX	134
3.1	Units and systems of illumination	134
4	CHARACTERIZATION OF RESIDENTIAL HOUSING UNITS	135
5	NUMBER OF LUMINAIRES AND NOMINAL POWER	137
6	NATURAL LIGHT	138
7	HOUSEHOLD PROFILES	138
8	CALCULATION OF THE ELECTRICITY CONSUMPTION FOR LIGHTING	139
9	COMPARISON OF THE MODEL WITH QUESTIONNAIRE DATA	143
9.1	Questionnaire	143
10	CONCLUSIONS	145
11	ACKNOWLEDGEMENTS	146
	REFERENCES	146

Capítulo VI: Conclusiones

CONCLUSIONES 149

CONCLUSIONS 150

Capítulo VII: Perspectivas de Trabajo Futuras 151

Anexo: Otras Publicaciones

ARTICULO: EVALUATION OF THE ACCURACY OF MATHEMATICAL MODELS
THROUGH USE OF MULTIPLE METRICS 152

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL CONSUMO
ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA RESIDENCIAL 162

RESUMEN

La edificación en Europa, representa más del 40% del consumo final de energía de los Estados miembros de la Unión Europea (UE), de los cuales el uso residencial representa el 63% del consumo total de energía. En España el sector de la edificación residencial consume el 10% (10.793 ktep.) del consumo de energía total.

El Plan de Fomento de las Energías Renovables en España proyecta superar en 2020 los objetivos marcados por Europa y cubrir con un 22,7% el consumo final de energía. La Unión Europea ha establecido para los países miembros la obligación de elaborar un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables con el objetivo de ayudar al medio ambiente.

El importante volumen de construcción de vivienda residencial en los últimos años y el déficit en fuentes de energía convencionales, justifican las actuaciones que tengan como objetivo conseguir la autosostenibilidad energética de los usos relacionados con la vivienda residencial (iluminación, calefacción, electrodomésticos,...). La solución de instalar instalaciones fotovoltaicas integradas en los edificios puede ser una alternativa interesante para conseguir dicha sostenibilidad energética.

En esta tesis se analiza el marco normativo a nivel de Europa y España, que rige el proceso edificatorio en relación con el uso de la energía renovable. El objeto del estudio es analizar la evolución en la implantación de distintas tecnologías relacionadas con la energía en los edificios. Se hace especial hincapié en el uso de la energía solar. Se han recopilado los datos estadísticos desde el año 1996 obtenidos de la Dirección General de Programación Económica de la Secretaría de Estado de Infraestructuras dependiente del Ministerio de Fomento. La investigación se centra en los edificios de nueva planta cuyo uso principal es residencial. Se analiza la evolución que ha experimentado el número de viviendas y edificios relacionándolos con el tipo de energía instalada (electricidad, gas ciudad, GLP, energía solar, c. sólido).

Definidas las características de irradiación medias para cada una de las provincias de Andalucía y los parámetros técnicos de la instalación fotovoltaica se estima la energía eléctrica anual susceptible de ser generada. En esta tesis se presenta la evaluación de un nuevo modelo para la determinación de la radiación solar media diaria y horaria tendiendo como base la temperatura, obteniéndose los datos de radiación solar media

diaria y horaria y de temperatura que permiten diseñar una instalación solar fotovoltaica.

Caracterizado el sector de la edificación se obtiene la capacidad energética de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red que se podrían ubicar en las cubiertas de los edificios. Partiendo de la caracterización del sector residencial y mapas urbanos digitales obtenidos de Google Earth se mide la superficie útil de cubierta de una muestra de edificios representativa de la población. Para ello se tienen en cuenta la altura de los edificios, tipologías constructivas, además de las limitaciones tales como la orientación, inclinación, la ubicación y el sombreado.

Determinada la energía eléctrica generada por las instalaciones fotovoltaicas se estudia que porcentaje de energía eléctrica para uso lumínico podría ser cubierto por esta energía generada. Con este objetivo se desarrolla un modelo que permite conocer la evolución y comportamiento del consumo de energía eléctrica en el sector residencial relacionado con el uso final de iluminación. Mediante análisis estadístico, se definen tres tipologías de edificación representativas del parque de viviendas (las mismas que se utilizaron para la obtención de la capacidad energética de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red en las cubiertas de los edificios). Para cada una de estas tipologías se calcula y diseña la instalación de iluminación necesaria para garantizar confort en las actividades desarrolladas, obteniéndose el consumo energético.

Aplicando el modelo planteado, se compara el consumo eléctrico generado por el uso exclusivo de bombillas incandescente con el que se obtendría sustituyendo las bombillas convencionales por otras de bajo consumo. Los resultados obtenidos pueden servir para apoyar las políticas energéticas nacionales e internacionales, como “La Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España” y “La Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia”.

ABSTRACT

Building construction in Europe is responsible for more than 40% of the total energy consumption of the member states of the European Union (EU). In these countries, 63% of this total energy consumption is for residential uses. In Spain, the residential building sector consumes 10% (10.793 ktep) of the total energy consumption in the country.

The national *Plan de Fomento de las Energías Renovables* [Plan for the Development of Renewable Energies] predicts that in 2020, Spain will achieve the objectives set by Europe and obtain 22.7% of its total energy from renewable energy sources. The European Union requires all member states to elaborate a national action plan to foment the use of renewable energies in order to preserve the environment.

In recent years, the huge volume of residential buildings and the growing deficit of conventional energy sources justify actions whose purpose is to foment energy self-sustainability for residential building uses (illumination, heating, use of electrical appliances, etc.). The installation of photovoltaic installations in buildings is an interesting alternative that will smooth the way towards energy sustainability.

This PhD dissertation analyzes the legal framework in Europe and Spain, which regulates building construction and its use of renewable energies. The objective of the study described in this dissertation was to analyze the evolution of the implementation of various energy-related technologies in buildings with a special focus on solar energy. Accordingly, from the year 1996 onwards, statistical data were obtained from the *Dirección General de Programación Económica de la Secretaría de Estado de Infraestructuras* [General Directorate of the Secretary of State for Infrastructure] which depends on the Spanish Ministry of Development and Public Works. This dissertation focuses on new buildings with a principally residential use. It analyzes the evolution over the years of the number of houses and residential buildings, and relates this information to the type of energy installed (electricity, natural gas, petroleum-based liquid fuel, solar energy, and coal).

After defining the average irradiation characteristics of each province in the region of Andalusia and the technical parameters of photovoltaic installation, the electrical energy that can be potentially generated was estimated. This dissertation presents the evaluation of a new model that determines the mean daily and hourly solar radiation, based on temperature. The data regarding temperature as well as the mean daily and

hourly solar radiation provided by this model facilitates the design of photovoltaic solar energy installations.

After describing the building construction sector, we obtained the energy capacity of the grid-connected photovoltaic installations that can be placed on building roofs. Based on the characterization of the residential sector and the digital urban maps obtained with Google Earth, the useful roof surface of a representative sample of buildings was measured and calculated. For this purpose, relevant factors considered were building height, building type, and constraints such as orientation, tilt, location, and shade.

Once the electrical energy generated by photovoltaic installations was determined, we then studied what percentage of electrical energy for lighting purposes could be covered by solar energy. This led us to develop a model that provides a description of the evolution and behaviour of electrical energy consumption in the residential sector, specifically related to final illumination use. Statistical analysis was used to define three building types that were representative of the total number of buildings (the same ones used to obtain the energy capacity of the grid-connected photovoltaic installations on building roofs). For each of these building types, we calculated and designed the lighting installation necessary to guarantee the comfortable performance of daily activities, and thus obtained the energy consumption.

The model was then used to compare the electricity consumption generated by the exclusive use of incandescent light bulbs with the consumption that would be obtained if they were replaced by low-energy light bulbs. The results obtained can be used to support national and international energy policies such as *La Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España* [Strategy for Energy Conservation and Efficiency in Spain] and *La Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia* [Spanish Strategy for Climate Change and Clean Energy].

ESTRUCTURA DE TESIS

El volumen de esta tesis doctoral incluye la investigación realizada como queda reflejada en los artículos científicos publicados, enviados a revistas y congresos internacionales. Cabe mencionar que los artículos aquí presentados son fieles a su formato de publicación original en cuanto a nomenclatura de figuras, acrónimos y referencias.

- El **Capítulo I: Introducción**, establece las bases conceptuales para el desarrollo de la investigación. Incluye secciones sobre el sector de la construcción residencial, radiación solar, energía solar fotovoltaica e iluminación, que se presentan de manera general, refiriendo los artículos que conforman los sucesivos capítulos de tesis y donde se explica detalladamente cada una de las metodologías utilizadas para cada objetivo particular.

- El **Capítulo II: Marco Normativo**, Javier Ordóñez García, Eulalia Jadraque Gago, Javier Alegre Bayo and Germán Martínez Montes “THE USE OF SOLAR ENERGY IN THE BUILDINGS CONSTRUCTION SECTOR IN SPAIN”, recopila la investigación realizada y publicada en la revista *Renewable & Sustainable Energy Reviews* del año 2007, v.11, p. 2166-2178.

Tema que aborda y contribución

Se revisa el marco normativo que afecta a la edificación en relación con las energías renovables a nivel de la Unión Europea y de España. Se analiza el sector de la edificación y se obtiene la evolución que ha tenido la implantación de distintas tecnologías relacionadas con la energía en los edificios haciendo especial hincapié al estudio del uso de la energía solar.

En los últimos años se ha producido un desarrollo de las políticas que tienen como objetivo la eficiencia energética y la potenciación de las fuentes renovables como consecuencia de los compromisos adquiridos por los distintos países a nivel mundial, en relación con los efectos nocivos del consumo de energías procedentes de combustibles fósiles. También ha habido un incremento en la construcción de edificios energéticamente sostenibles.

- El **Capítulo III: Modelos de Descomposición para la Irradiancia Horaria y la Temperatura**, E J Gago, S Etxebarria, Y Tham, Y Aldali and T Muneer “INTER-

RELATIONSHIP BETWEEN MEAN-DAILY IRRADIATION AND TEMPERATURE, AND DECOMPOSITION MODELS FOR HOURLY IRRADIATION AND TEMPERATURE”, recopila la investigación realizada y publicada en la revista International Journal of Low-Carbon Technologies del año 2010 Advance Access published October 6.

Tema que aborda y contribución

Los registros de la temperatura terrestre han existido durante siglos y para muchas ubicaciones del planeta. Tal es así que la temperatura es el parámetro meteorológico más ampliamente medido.

No ocurre lo mismo con la medida de la radiación solar, que es registrada con muy poca frecuencia quizás por considerarse un parámetro secundario o por el coste excesivo que supone su medición.

Se presenta la evaluación de un nuevo modelo para la determinación de la radiación solar media diaria y horaria sobre la base de la temperatura. El modelo propuesto es de una constitución muy simple y no requiere ningún parámetro meteorológico secundario como exigen los modelos que están disponibles en la literatura.

Se presentan también modelos de temperatura horaria que sólo requieren los datos de temperatura media diaria.

La comparación se llevó a cabo teniendo en cuenta el rendimiento de los modelos propuestos con modelos anteriores. Se encontró que los modelos actuales son capaces de proporcionar estimaciones fiables de la irradiación y temperatura horaria con una buena precisión.

- **El Capítulo IV: Capacidad Energética Solar Fotovoltaica**, J. Ordóñez, E. Jadraque, J. Alegre and G. Martínez “ANALYSIS OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CAPACITY OF RESIDENTIAL ROOFTOPS IN ANDALUSIA (SPAIN)”, recopila la investigación realizada y publicada en la revista Renewable & Sustainable Energy Reviews del año 2010, v.14, p. 2122-2130.

Tema que aborda y contribución

Se plantea como objetivo determinar el potencial energético solar de las cubiertas de edificios residenciales en Andalucía, a partir de plantas fotovoltaicas conectadas a red y ubicadas en las mismas. Para ello se desarrolla una metodología que permite a partir de la caracterización de la vivienda, obtener la superficie susceptible de ser ocupada por el sistema fotovoltaico, de esta forma se estima la energía eléctrica anual generada

teniendo en cuenta las características de irradiación media para cada una de las provincias de Andalucía y los parámetros técnicos de la instalación fotovoltaica.

- El **Capítulo V: Modelo Energético**, E. Jadraque, A. Espín and J. Ordóñez “DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL FOR THE RESIDENTIAL SECTOR: ELECTRICITY CONSUMPTION IN ANDALUSIA (SPAIN)”, recopila la investigación realizada y publicada en la revista Energy and Building del año 2011, (In Press).

Tema que aborda y contribución

El desarrollo de modelos que permitan conocer la evolución y comportamiento del consumo de energía eléctrica en el sector residencial y su relación con los usos finales hará posible la elaboración de medidas encaminadas a lograr un mayor ahorro energético y al aumento de la eficiencia energética.

El objetivo es el diseño, desarrollo y aplicación de un modelo para la estimación del consumo de energía eléctrica originado por el uso de la iluminación en el sector residencial.

El modelo se aplica a Andalucía permitiendo obtener el ahorro en el consumo eléctrico para uso de iluminación una vez se consigan los objetivos marcados por las directrices políticas establecidas en la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia cuyo objetivo es la sustitución progresiva en un plazo de tres años de las bombillas de filamento incandescente por otras de bajo consumo.

- El **Capítulo VI: Conclusiones**, resume los hallazgos más relevantes asociados a la investigación que aquí se presenta como un compendio de los 4 capítulos anteriores así como la investigación relevante asociada que se pone de manifiesto en el anexo.

- El **Capítulo VII: Perspectivas de Trabajo Futuras**, se plantean las futuras líneas de investigación.

Además de los capítulos mencionados anteriormente se ha recogido en un anexo contribuciones adicionales de la doctoranda en otras publicaciones relacionadas con los objetivos de la investigación de esta tesis doctoral.

- En el **Anexo**, se hace referencia a otros trabajos de investigación en los que ha participado la doctoranda asociado a la temática de esta tesis.

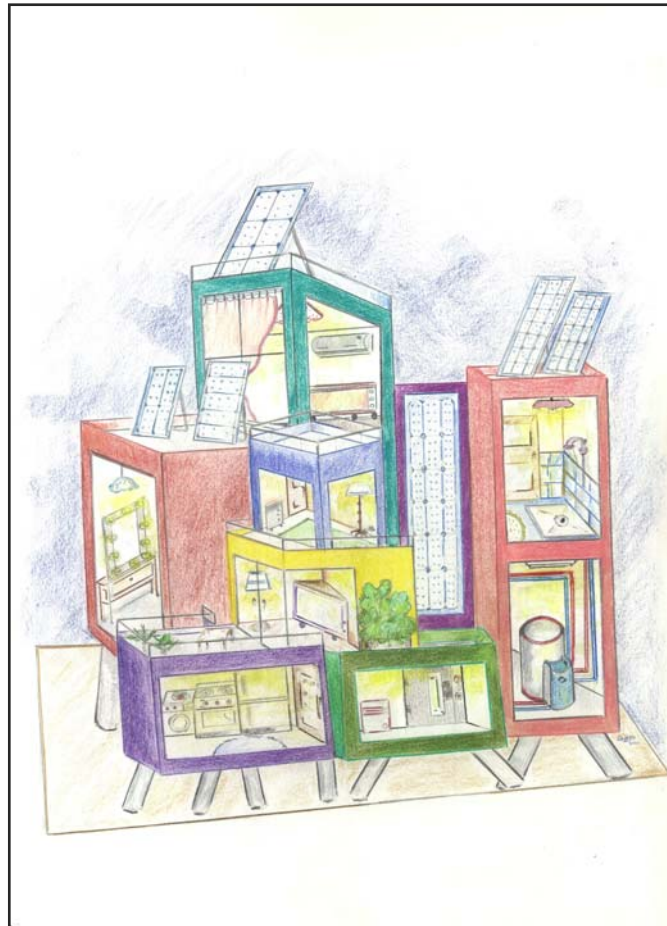
La primera publicación, Eulalia Jadraque Gago, Javier Ordóñez García, Germán Martínez Montes y Javier Alegre Bayo “EDIFICACION SOSTENIBLE Y EFICIENCIA ENERGETICA”, recopila la investigación realizada como comunicación

presentada en el XII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA DE PROYECTOS y publicada en el libro de RESUMENES (ISBN: 978-84-613-3498-8).

Es ella se desarrolla un modelo de optimización del consumo energético en los edificios residenciales con el fin de identificar potenciales ahorros y llevar a cabo medidas de mejora que permitan mejorar la eficiencia en el consumo de energía en cada edificio así como la identificación del potencial de incorporar energías alternativas.

La segunda publicación, N. Caliskan, E. Jadraque, Y. Tham and T. Muneer “EVALUATION OF THE ACCURACY OF MATHEMATICAL MODELS THROUGH USE OF MULTIPLE METRICS”, recopila la investigación realizada y publicada en la revista Sustainable Cities and Society del año 2011, (In Press).

Se seleccionan una serie de indicadores que proporcionan una herramienta para la validación de modelos matemáticos. Además se obtiene un factor que permite la categorización de los modelos con respecto a sus resultados. Para ello se ha desarrollado un software en Microsoft Excel /Visual Basic que permite la automatización de validación del modelo.



Capítulo I: Introducción

EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN RESIDENCIAL

1 INTRODUCCIÓN

Los edificios residenciales en España son responsables del 10% del consumo total de energía [1-2]. En el periodo comprendido entre los años 2002 y 2006 el parque de viviendas creció un 90,35%, alcanzándose un total de 23.859.014 viviendas en el último año [3]. Por otra parte, estas viviendas, en la gran mayoría, se han construido sin los adecuados criterios de eficiencia energética.

Los hábitos de los consumidores hacen que se demande un grado de confort térmico cada vez mayor, que provoca un aumento del consumo relacionado con la climatización del edificio [4].

Por último, añadir que España tiene una fuerte dependencia energética del exterior, la cual se cifra en 2007 en el 79,5% frente a un 53,1% en el total de la Unión Europea [5].

Conscientes de la necesidad de reducir el consumo energético de los edificios, las Administraciones Públicas han empezado a tomar medidas. A nivel estatal, la entrada en vigor del Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación y el Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba la Certificación Energética de Edificios tienen entre otros objetivos reducir el consumo energético de los edificios.

En relación a los edificios existentes, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en la 2ª Edición del Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2008-2012, incluye medidas estratégicas dirigidas a mejorar sus características térmicas así como ayudas económicas para las rehabilitaciones que conlleven una disminución del consumo de energía del edificio.

2 ANTECEDENTES

El desarrollo de los métodos para estimar el consumo energético en la edificación ha evolucionado desde metodologías sencillas [6], hasta el uso de algoritmos matemáticos más complejos como las redes neuronales artificiales (RNA) [7], basados en la

eficiencia de los procesos llevados a cabo por el cerebro e inspirados en su funcionamiento.

Numerosos autores e investigadores han analizado los consumos en el sector de la edificación mediante el estudio de los cambios en la estructura del consumo de energía [8-10] o de las causas y efectos del mismo [11]. Proporcionan datos de apoyo para trabajar con la eficiencia energética de los edificios [12], concluyendo que mientras que el consumo de energía y los precios de la misma están aumentando, la disponibilidad de energía está disminuyendo como consecuencia de que las medidas tomadas para hacer frente a este problema han sido insuficientes para producir una mejora sustancial [11].

El consumo de energía también puede ser analizando cómo influye en éste el estilo de vida de los ocupantes de un hogar. La dificultad de realizar estos estudios radica en estandarizar los hábitos de consumo del usuario del sector residencial. Estos hábitos dependen de factores como: el clima [13], situación económica [14], condición social, cantidad y edades de habitantes por vivienda [15], características de la vivienda, equipamiento eléctrico [16], aire acondicionado [17] y calefacción [18].

La calidad de la construcción [19,20] así como el diseño del edificio repercuten en el consumo de energía de tal forma que se puede llegar a un aumento desmesurado del consumo energético o a un ahorro sustancial de éste, partiendo de un mismo nivel de confort, simplemente dejando que el propio edificio actúe como captador, acumulador y distribuidor de la energía recibida y producida [21].

Para ello, el edificio deberá ofrecer a la orientación Norte los parámetros más estancos y las áreas interiores de estancia limitada o que no utilicen calefacción. De la misma manera, habrá que situar las mayores aberturas y las zonas sedentarias hacia el Sur. Así, se podrán utilizar estos espacios como captadores por efecto invernadero. Esta energía captada se distribuye y se acumula en el interior [22-25].

Como conclusión, es necesaria la supervisión de los Gobiernos para garantizar la seguridad del abastecimiento energético, llevar a cabo acciones para promover la sostenibilidad y el uso y competitividad del suministro de energía [26-28].

3 EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

El ahorro y uso eficiente de la energía en la vivienda involucra la actividad de arquitectos, ingenieros y profesionales del sector de la construcción. Abarca desde el diseño mismo hasta el ofrecimiento a sus ocupantes de un confort ambiental integral y

Uso de la energía solar fotovoltaica como fuente para el suministro de energía eléctrica en el sector residencial

el mejoramiento del ambiente y la calidad de vida. También involucra la actividad de instituciones públicas, privadas y organismos no gubernamentales, vinculados a los sectores constructivo, energético y ambiental, así como a estudiantes de arquitectura, ingeniería y otras disciplinas afines, con el fin de identificar el impacto del cambio ambiental global por el consumo energético en el diseño y construcción de las viviendas.

Con el fin de ponderar en su justa medida el impacto, tanto energético como ambiental, que ejerce el sector de la construcción, se citan unas cifras que demuestran la importancia de este sector en comparación con el cómputo total.

En la Unión Europea el 40% del consumo total de energía corresponde a los edificios [1].

En España el sector de la edificación residencial consume el 10% (10.793 ktep) del consumo de energía total [3]. En el periodo comprendido entre los años 2002 y 2006 el parque de viviendas creció un 90,35%, alcanzándose un total de 23.859.014 viviendas en el último año [29]. Este incremento ha ido asociado a un aumento del consumo eléctrico en el sector de la edificación [30]. A título de ejemplo, y para el caso de Andalucía, la distribución del consumo de energía eléctrica en el año 2006 (35.342 GWh) fue la siguiente: sector residencial 34,9% (12.320 GWh), sector servicios 33,4% (11.807 GWh), industria 26,5% (9.367 GWh), sector primario 4,1% (1.455 GWh) y sector transporte 1% (393 GWh) [31].

La evolución en España del número de viviendas se muestra en gráfico 1.

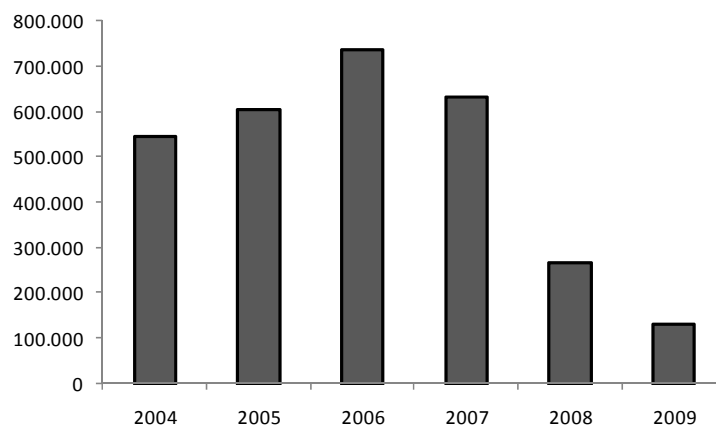


Gráfico 1. Evolución del número de viviendas. Datos: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Andalucía tenía un parque total de 4.163.281 viviendas en 2006, el 17,5 % del total de viviendas en España, es decir, en España una de cada cinco viviendas es andaluza. Andalucía ocupaba en 2006 el primer lugar dentro de España en construcción de nuevas viviendas, con un valor del 20,7% del total [32].

En el gráfico 2 se puede ver la evolución que ha experimentado la construcción de edificios.

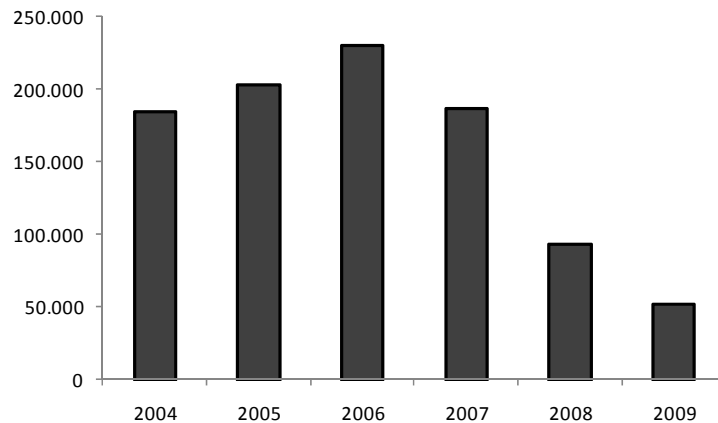


Gráfico 2. Evolución del número de edificios. Datos: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Se puede concluir señalando la importancia que tiene el consumo de energía en los edificios y que cualquier ahorro que se consiga en los mismos sería muy beneficioso, tanto en el ámbito económico como medioambiental, justificándose los esfuerzos encaminados a optimizar ese consumo.

Otro aspecto a considerar es el tipo de energía primaria que se está utilizando para hacer frente a la demanda energética, ya que dependiendo del mismo el consumo será más o menos perjudicial para el medio ambiente.

La gráfica 3 muestra el número de viviendas en edificios en España que son suministrados por distintas formas de energía: eléctrica, gas ciudad, gases licuados de petróleo y energía solar.

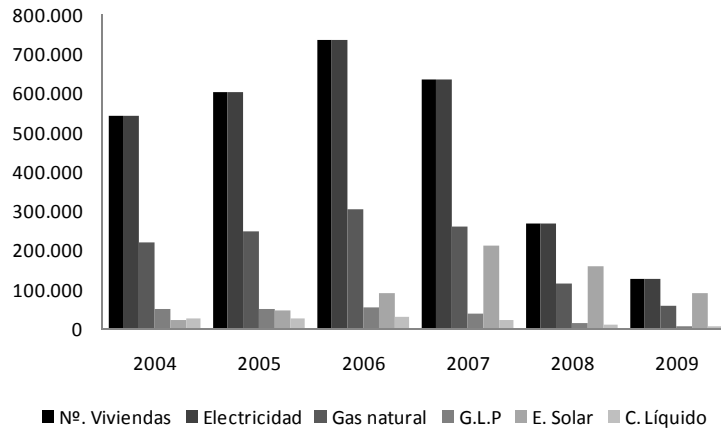


Gráfico 3. Evolución del número de viviendas/energía instalada. Datos: Ministerio de Fomento.
Elaboración propia.

La Directiva SAVE¹ de la Unión Europea dedica importantes fondos públicos para financiar proyectos que reduzcan la emisión de CO₂ a la atmósfera así como también obliga a los países miembros a tomar medidas legales para reducir dichas emisiones [28].

En lo referente exclusivamente a edificios, la Unión Europea ha aprobado la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. En ella se hace hincapié en *la necesidad de medidas que aumenten el número de edificios que no solo cumplan los requisitos mínimos de eficiencia energética actualmente vigentes, sino que también sean más eficientes energéticamente al reducir tanto el consumo energético como las emisiones de dióxido de carbono* [33].

El Código Técnico de la Edificación (CTE), al amparo de la Ley de la Ordenación de la Edificación, define y desarrolla requisitos básicos de seguridad y habitabilidad que deben satisfacerse en los edificios, prescribiendo las exigencias a cumplir al proyectar, construir, usar, mantener y conservar los edificios, con el fin de fomentar su calidad, garantizar la seguridad y salud de los usuarios y proteger el medio ambiente en su entorno inmediato [33].

¹ DIRECTIVA 93/76/CEE DEL CONSEJO de 13 de septiembre de 1993 relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE).

4 LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO

Llamamos *demanda energética de un sistema* (ya sea un edificio o cualquier otro sistema) a la energía que necesita para realizar su función. Esta energía es suministrada por un equipo que tiene un rendimiento determinado y, por tanto, necesitará más energía que la estrictamente necesaria para suministrar la demanda. La energía consumida por el equipo para suministrar la demanda se denominará consumo [35]. El consumo atiende pues a la relación entre la demanda y el rendimiento del sistema suministrador de energía siguiente [35]:

$$C_i = \frac{D_i}{R_i}$$

Nuestro objetivo es reducir el consumo de energía en los edificios, para ello debemos disminuir la demanda y/o aumentar el rendimiento². Para ver cuál de los dos aspectos muestra mayor interés, se trazará una gráfica en donde se ilustra cómo afectan al consumo las variaciones de ambas magnitudes (demanda y rendimiento).

Se supone un edificio que inicialmente tiene un consumo C_0 , una demanda D_0 y un sistema energético de rendimiento R_0 (por tanto, $C_0 = D_0/R_0$). Actuamos sobre el edificio de tal manera que disminuimos su demanda en una cantidad d , y aumentamos el rendimiento de los equipos en una cantidad r , por tanto su nuevo consumo será [35]:

$$C = \frac{D_0 - d}{R_0 + r} = C_0 \frac{1 - d'}{1 + r'} \quad \begin{array}{l} 0 \leq d' \leq 1 \\ 0 \leq r' \leq \infty \end{array}$$

donde $d' = d/D_0$ y $r' = r/R_0$

² Eficiencia energética del edificio: cantidad de energía calculada o medida que se necesita para satisfacer la demanda de energía asociada a un uso normal del edificio que incluirá, la energía consumida en la calefacción, la refrigeración, la ventilación, el calentamiento del agua y la iluminación. Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.

En la gráfica 4 se representa la evolución de C/C_0 (consumo) en función de las nuevas variables d' y r' .

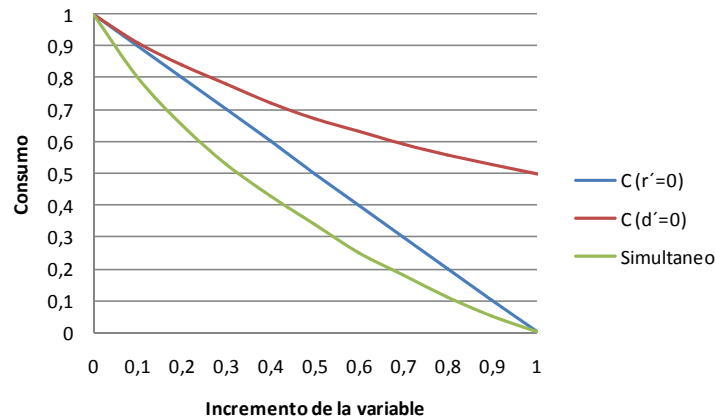


Gráfico 4. Evolución del consumo en función del aumento del rendimiento de los equipos o de la disminución de la demanda del edificio. Fuente: Elaboración propia.

Puede concluirse que es mucho más eficiente disminuir la demanda del edificio que aumentar el rendimiento de los equipos, si bien la optimización³ se consigue realizando ambas acciones.

5 EL ORIGEN DE LA DEMANDA DEL EDIFICIO

En una vivienda la demanda energética es básicamente de tres tipos:

- Térmica, para satisfacer los requerimientos de ACS, calefacción y refrigeración.
- Lumínica, para los requerimientos de confort lumínico.
- Eléctrica, para las aplicaciones (diferentes aparatos).

El tipo de energía que se use para suplir estas demandas variará de un edificio a otro (puede ser completamente eléctrica, solo en parte y la térmica sea suministrada por una caldera de gas, gasóleo, etc.).

La demanda energética de un edificio varía ostensiblemente dependiendo de varios factores entre los que destacan:

³ Optimización del consumo energético, cuyo objeto es disminuir el uso de energía pero produciendo los mismos resultados finales. Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.

1. *El clima.* Es evidente que los gastos en calefacción, para dos edificios idénticos aumentará en climas fríos. Por el contrario los gastos de refrigeración serán superiores en climas cálidos [37].

2. *La función.* Un edificio de oficinas tendrá necesidades muy diferentes en calidad y cantidad de energía que una vivienda, un hotel o un hospital. La demanda variará así mismo de forma diferente a lo largo del día.

3. *La calidad de la construcción.* Dos edificios en un mismo clima presentan consumos diferentes debido a la calidad tanto de los materiales como del acabado. Un edificio con una carpintería de mala calidad presentará filtraciones muy elevadas frente a otro con carpintería de mejor calidad [38].

4. *El diseño del edificio.* Las ganancias solares, que dependen de la orientación de los huecos, la posibilidad de generar ventilaciones, etc., son conceptos de diseño que nada tienen que ver con la calidad de la construcción y que, en cambio, permiten ahorrar energía [39,40].

5. *El uso o manipulación que los ocupantes hacen del mismo* (desde la manipulación manual hasta un sofisticado diseño de control automático) [18].

El gráfico 5 representa la explicación por usos del consumo anual residencial. Se puede observar que el consumo se debe principalmente al uso del frigorífico, televisión, iluminación y pequeños electrodomésticos. El consumo del frigorífico supone un 27,3% de la demanda residencial, la iluminación el 23,5% y la televisión aporta el 12%. La lavadora supone tan solo el 5% del consumo total residencial, pues su uso no es continuo a lo largo del día. El consumo por calefacción eléctrica es del 10% de esta demanda.

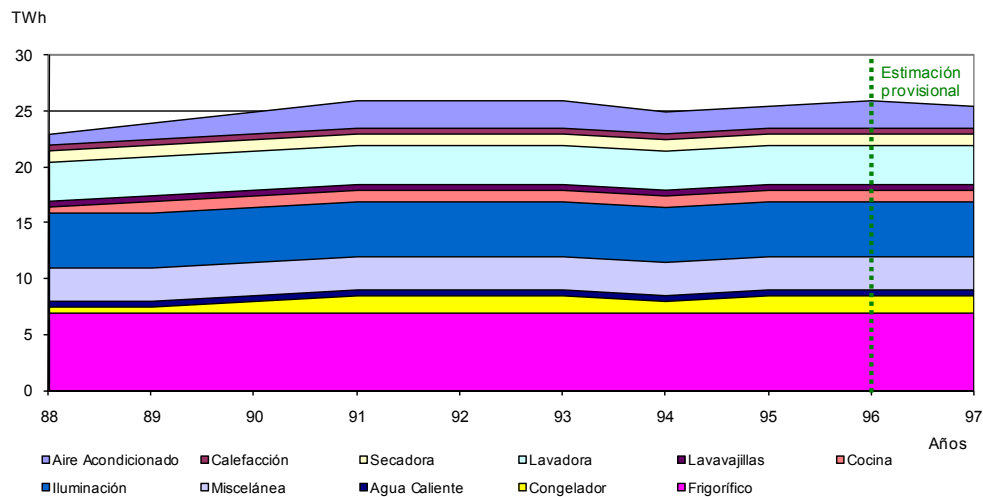


Gráfico 5. Explicación por usos del consumo anual residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

En el gráfico 6, se aprecia que la curva de carga del sector residencial tiene su punta de 21 a 22 horas, momento de mayor ocupación en el hogar. La lavadora y la secadora concentran su consumo durante las mañanas. A las 12 horas, estos dos usos suponen el 21% de la demanda total residencial. Durante la noche existe otra punta de consumo de lavadora y secadora consecuencia del trabajo fuera de casa de los componentes principales de un número de hogares. El agua caliente tiene dos puntas claras, a las 9 de la mañana y a las 5 de la tarde, que coinciden con el aseo matinal y el fregado de vajilla posterior a la comida.

Los usos relacionados con la comida en el hogar, cocina y horno, concentran su consumo en las horas previas a la comida, 2 de la tarde, y cena, en menor medida, a las 9 de la noche. El lavavajillas tiene sus puntas de consumo en las horas posteriores a la comida y la cena, en torno a las 16 y 22 horas.

Iluminación, calefacción y televisión mantienen un perfil que coinciden con los niveles de ocupación de los hogares. El frigorífico y congelador mantienen el mismo nivel de consumo a lo largo del día, al no desconectarse en ningún momento.

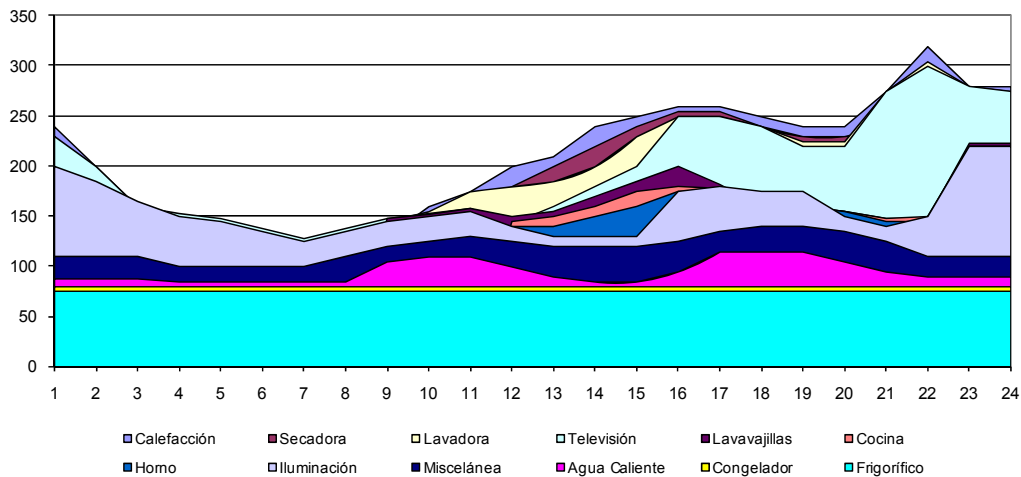


Gráfico 6. Curva de carga del hogar medio en un día tipo laborable. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

REFERENCIAS

[1] IDAE, Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012. Plan de acción 2008-2012. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007.

[2] García JO, Gago EJ, Bayo JA, Montes GM. The use of solar energy in the buildings construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007;11:2166–2178.

[3] Ministerio de Vivienda. Estimación del Parque de Viviendas. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Estudios y Estadísticas. www.mviv.es;2006.

[4] Consejería de Economía y Consumo. Guía de Rehabilitación Energética de Edificios de Viviendas Dirección General de Industria, Energía y Minas;2008.

[5] Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadística. Industria y Energía. 7/2009.

[6] Fumo N, Mago P, Luck R. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models, *Energy and Buildings* 2010;42:2331–2337.

[7] Altan DO. The prediction of heating energy consumption in a model house by using artificial neural networks in Denizli–Turkey. *Advances in Engineering Software* 2010;41:141–147.

[8] Zhongren Z, Wenliang W, Xiaohua W, Qun C, Ou W. Analysis of changes in the structure of rural household energy consumption in northern China: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:187–193.

[9] Shuqin C, Hiroshi Y, Mark DL, Zhenhai L. Contrastive analyses on annual energy consumption characteristics and the influence mechanism between new and old residential buildings in Shanghai, China, by the statistical methods. *Energy and Buildings* 2009;41:1347–1359.

[10] Shuqin C, Hiroshi Y, Nianping L. Statistical analyses on summer energy consumption characteristics of residential buildings in some cities of China. *Energy and Buildings* 2010;42:136–146.

[11] Arun AE. Energy efficiency in New Zealand's residential sector: A systemic analysis. *Energy Policy* 2008;36:3278–3285.

[12] Shuqin C, Nianping L, Jun G, Yanqun X, Fengmei S, Ji N. A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China. *Energy and Buildings* 2008;40:654–665.

[13] Aune M. Energy comes home. *Energy Policy* 2007;35:5457–5465.

[14] Dianshu F, Sovacool BK, Minh VK. The barriers to energy efficiency in China: Assessing house hold electricity savings and consumer behavior in Liaoning Province. *Energy Policy* 2010;38:1202–1209.

[15] Carlsson-Kanyama A, Lindén A. Energy efficiency in residences-Challenges for women and men in the North. *Energy Policy* 2007;35:2163–2172.

[16] Adua L. To cool a sweltering earth: Does energy efficiency improvement offset the climate impacts of life style? *Energy Policy* 2010;38:5719–5732.

[17] Chua KJ, Chou SK. Energy performance of residential buildings in Singapore. *Energy* 2010;35:667–678.

[18] Desmedt J, Vekemans G, Maes D. Ensuring effectiveness of information to influence household behavior. *Journal of Cleaner Production* 2009;17:455–462.

[19] Bansal NK, Bhattacharya A. Parametric equations for energy and load estimations for buildings in India. *Applied Thermal Engineering* 2009;29:3710–3715.

[20] Bojic M, Despotovic M, Malesevic J, Sokovic D. Evaluation of the impact of internal partitions on energy conservation for residential buildings in Serbia. *Building and Environment* 2007;42:1644–1653.

[21] Catalina T, Virgone J, BlancoE. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy and Buildings* 2008;40:1825–1832.

[22] Carvalho MMQ, La Rovere EL, Goncalves ACM. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:3199–3205.

[23] Caldera M, Corgnati SP, Filippi M. Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings. *Energy and Buildings* 2008;40:1972–1983.

[24] Hammada F, Abu-Hijleh B. The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building. *Energy and Buildings* 2010;42:1888–1895.

[25] El Asmar T. REACt: self-sufficient renewable energy air-conditioning system for Mediterranean countries. *Desalination* 2008;220:600–611.

[26] Rourke FO, Boyle F, Reynolds A. Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:1975–1984.

[27] Lv Shilei, WY. Target-oriented obstacle analysis by PESTEL modeling of energy efficiency retrofit for existing residential buildings in China's northern heating region. *Energy Policy* 2009;37:2098–2101.

[28] Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios.

[29] Ministerio de Vivienda, Encuesta sobre Tenencia y Uso de la Vivienda de los Hogares para el año 2006. www.mviv.es;2006.

[30] Agencia Andaluza de la Energía, Datos energéticos de Andalucía 2006. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía. www.agenciaandaluzadelaenergia.es;2006.

[31] Ministerio de la Vivienda, Estadística de la Vivienda. www.mviv.es;2006.

[32] DIRECTIVA 93/76/CEE DEL CONSEJO de 13 de septiembre de 1993 relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE).

[33] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Ahorro de Energía. Abril 2009.

[34] Callen H. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*, Wiley, NY.;1985.

[35] Montoro JM. Guía de buenas prácticas de eficiencia energética en edificación. 2004.

[36] Radhi H, Eltrapolsi A, Sharples S. Will energy regulations in the Gulf States make buildings more comfortable—A scoping study of residential buildings. *Applied Energy* 2009;86:2531–2539.

[37] Dixon G, Abdel-Salam T, Kauffmann P. Evaluation of the effectiveness of an energy efficiency program for new home construction in eastern North Carolina. *Energy* 2010;35:1491–1496.

[38] Carlo J, Lamberts R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. *Energy and Buildings* 2008;40:2002–2008.

[39] Sozer H Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment* 2010;45:2581-2593.

[40] Tuhus-Dubrow D, Krarti M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment* 2010;45:1574–1581.

RADIACIÓN SOLAR

1 INTRODUCCIÓN

Se define energía solar o radiación solar como la energía que proviene del sol. La radiación solar que recibe la tierra es del orden de 1,5 kilovatios (kW) por hora. Esto puede suponer un suministro de energía capaz de soportar el consumo mundial. Es decir, se dispone de una fuente de energía con un enorme potencial y con la ventaja de ser una energía renovable [1].

La energía solar presenta una serie de inconvenientes: captación, almacenaje, así como el hecho de presentar variaciones debido a las condiciones meteorológicas, ambientales y geográficas.

Como base de partida para desarrollar este trabajo será necesario conocer con profundidad la física de la radiación solar al objeto de poder determinar la cantidad de energía que puede ser aprovechada para su uso en el sector de la vivienda residencial [2].

2 EL SOL

El sol es una inmensa fuente de energía inagotable con un diámetro de $1,39 \times 10^9$ metros (m) situado a una distancia media de $1,5 \times 10^{11}$ respecto de la Tierra. Tiene una temperatura media de 5.500°C y en su interior tienen lugar una serie de reacciones que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar [3].

La radiación en el sol es $63.450.720 \text{ W/m}^2$. La cantidad de energía por unidad de tiempo y área que se alcanza sobre una superficie orientada normalmente hacia la dirección de los rayos solares en la atmósfera es conocida como *constante solar*. Esta constante tiene un valor medio anual de 1.367 W/m^2 que varía estacionalmente en un ± 3.3 debido a la excentricidad de la órbita terrestre [4].

3 RADIACIÓN SOLAR

En función de cómo inciden los rayos en la Tierra se distinguen tres componentes de la radiación solar [4]:

- Directa: es la recibida del Sol sin desviarse a su paso por la atmósfera.
- Difusa: es la que sufre cambios en su dirección principalmente debidos a la reflexión y difusión en la atmósfera.
- Albedo (reflejada): es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

La radiación solar global es la suma de los tres tipos antes citados. Se define la Irradiación como la energía por unidad de superficie a lo largo de un periodo de tiempo. Se expresa en julios por metro cuadrado (J/m^2), aunque también se expresa en Wh/m^2 (potencia), mediante la conversión de unidades [1].

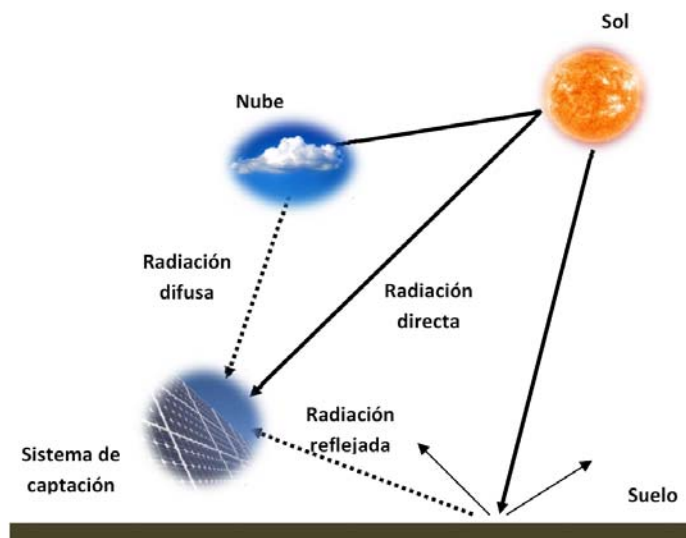


Figura 1. Componentes de la radiación solar terrestre total. Fuente: Elaboración propia.

4 IRRADIACIÓN SOLAR

La construcción de edificios energéticamente eficientes ha experimentado un incremento en las tres últimas décadas. La utilización de elementos arquitectónicos de captación de energía solar para maximizar el aprovechamiento de la luz del día, calor solar, ventilación y energía solar requiere datos de la radiación solar por hora y la temperatura.

En la mayoría de las regiones del mundo, especialmente en los países en desarrollo, las mediciones de la radiación solar no son fáciles de conseguir debido al excesivo coste y al gran esfuerzo que supone. La temperatura del aire, por el contrario, se mide en la mayoría de estaciones meteorológicas. Hasta 2010 sólo había tres estaciones en el noroeste de Europa con los registros de radiación en un periodo superior a 85 años. En el Reino Unido no fue sino hasta la década de 1950 cuando la Oficina Meteorológica instaló solarímetros Kipp. Por el contrario, existen registros de temperatura en numerosos lugares del mundo y por un período mucho más largo. A título de ejemplo, los registros más antiguos de la temperatura para el centro de Inglaterra han existido desde 1659. En la India el número de lugares con registros de temperatura es de 161, pero sólo existen 18 estaciones de medida de la irradiación. En Malasia y España existen 41 y 113 estaciones que miden la temperatura, pero sólo hay 9 y 33 estaciones, respectivamente, para el registro de la irradiación [2].

Thorton y Running [5] y Rivington y otros [6] señalan que incluso en los países más desarrollados como los EE.UU. y Gran Bretaña, la superficie terrestre cubierta por estaciones de medida de la radiación solar es menor al 1%.

La NASA proporciona un recurso útil para la obtención de valores mensuales de irradiación y temperatura observados por satélite. Existe, sin embargo, la necesidad de desglosar los datos diarios en horas, ya que hay una oscilación significativa de la temperatura por hora en un día determinado.

La primera investigación relacionada con la radiación solar fue llevada a cabo por Ångström y otros [7], estableciendo una relación entre la irradiación y la duración de la insolación. Desde entonces la investigación en este campo ha recorrido un largo camino. Hoy en día, una cantidad considerable de información está disponible en modelos matemáticos que relacionan la radiación solar con otros parámetros meteorológicos como la temperatura, la nubosidad, la cantidad de lluvia, la humedad e incluso la visibilidad. Sin embargo, como se ha señalado anteriormente el parámetro que tiene la mayor red de medición es la temperatura ambiente.

En este trabajo de investigación se presenta la evaluación de un nuevo modelo para la determinación de radiación solar media diaria y horaria teniendo como base la temperatura. El modelo propuesto es de una constitución muy simple y no requiere ningún parámetro meteorológico secundario como exige otro grupo de modelos que están disponibles en la literatura [2-8]. Por otra parte, los modelos de temperatura horaria que se presentan sólo requieren los datos de temperatura media diaria.

De este modo, se obtienen los datos de radiación solar media diaria y horaria y de temperatura que permiten diseñar una instalación solar fotovoltaica.

REFERENCIAS

[1] Pareja AM. Radiación solar y su aprovechamiento energético. Nuevas Energías. Marcombo Ediciones Técnicas. ISBN 978-84-267-1559-3;2009.

[2] Muneer T. Solar radiation and daylight models. Elsevier Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-5974-2;2004.

[3] Comellas GJ, Cruz M. El Sol y el Sistema Solar. Equipo Sirius, S.A. ISBN 978-84-86639-00-6;1986.

[4] Méndez MJM, Cuervo GR. Energía Solar Fotovoltaica. ECA. Instituto de Tecnología y Formación. FC editorial. ISBN 978-84-96743-29-8;2007.

[5] Thornton PE, Running SW. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agric Meteorol* 1999;93:211-228.

[6] Rivington M, Matthews K.B, Bunchan K. A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. In: *Proceedings of the Integrated assessment and decision support, 1st Biennial Meeting of International Environmental Modelling and Software Society, Vol. 3, June 24-27 2000*:193-198.

[7] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. *QJR. Meteorol Soc* 1924;50:121-125.

[8] Muneer T, Saluja G. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces. *Energy Conversion and Management* 1985;25:443.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

1 DEFINICIÓN

La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene por medio del proceso directo de transformación de la energía del sol en energía eléctrica. La transformación se realiza por medio de módulos o paneles solares fotovoltaicos que captan la radiación solar. Los paneles solares fotovoltaicos son elementos generadores de electricidad y están formados por células fotovoltaicas [1].

2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS (SSF)

Se define sistema fotovoltaico el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica [2].

Las instalaciones fotovoltaicas, formadas por un conjunto de placas solares, pueden ser de dos tipos [3]:

- *Conectadas a la red*: la energía es transformada en corriente alterna mediante los inversores y vertida a la red eléctrica de distribución.
- *Aisladas de la red*: se utiliza para suministrar energía eléctrica a emplazamientos aislados de la red. Están equipados con sistemas de acumulación de energía.

3 ELEMENTOS DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

En esta tesis se trabaja con un diseño de sistema fotovoltaico conectado a la red y ubicado en la cubierta del edificio. Este sistema consta de los siguientes elementos (Figura 1):

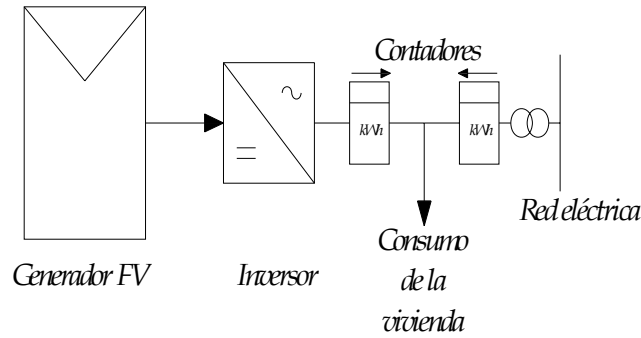


Figura 1. Esquema de sistema solar fotovoltaico conectado a Red. Fuente: Elaboración propia.

El elemento principal de un SSF es el generador fotovoltaico, que recibe el nombre de célula solar. Esta capta la energía solar transformándola en corriente continua a través del efecto fotovoltaico. La célula fotovoltaica es un elemento semiconductor en el que, de forma artificial, se crea un campo eléctrico permanente de manera que cuando se expone a la luz solar se produce un flujo de electrones que provoca la aparición de dicha corriente [4].

Los tipos de paneles solares vienen dados por la tecnología de fabricación de las células, y son fundamentalmente:

- Silicio cristalino (monocristalino y multicristalino).
- Silicio amorfo.

La célula fotovoltaica se comporta como un *diodo*: la parte expuesta a la radiación solar es la N, y la parte situada en la zona de oscuridad, la P. Los terminales de conexión de la célula se hallan sobre cada una de estas partes del diodo: la carga correspondiente a la zona P se encuentra metalizada por completo, mientras que en la zona N el metalizado tiene forma de peine, a fin de que la radiación solar llegue al semiconductor (Figura 2).

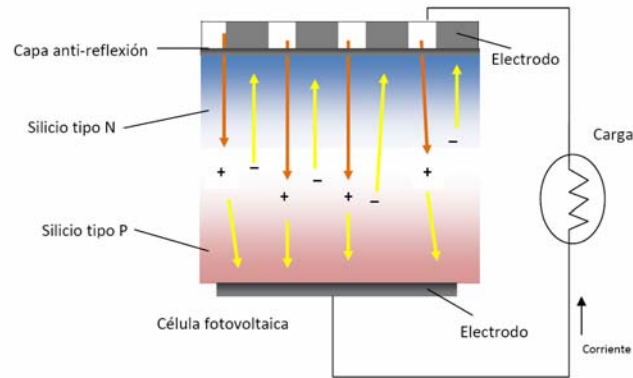


Figura 2. Funcionamiento de una célula solar fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros fundamentales de la célula solar fotovoltaica son los siguientes [4]:

- *Corriente de iluminación (I_L)*: la corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la célula.
- *Corriente de oscuridad*: es debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se produce en el interior del semiconductor.
- *Tensión de circuito abierto (V_{oc})*: la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula.
- *Corriente de cortocircuito (I_{SC})*: máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados.

Cuando la célula solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existen dos valores de tensión e intensidad para los cuales la potencia entregada será máxima:

- V_m (*tensión máxima*).
- I_m (*intensidad mínima*).

y que siempre serán menores que V_{oc} e I_{SC} .

En función de estos valores la potencia máxima que puede entregar la célula solar será:

$$P_m = V_m \cdot I_m$$

Esto nos permite definir el factor de forma (FF) como el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito

abierto y la corriente de cortocircuito. En las células solares más habituales, los valores típicos de FF son 0,7 ó 0,8.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OC} \cdot I_{OC}}$$

Al conjunto de células conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco se le denomina panel solar o modulo fotovoltaico [5].

Las células fotovoltaicas producen corriente continua a una tensión nominal de 6, 12, 24... voltios. Estas células tienen un polo positivo y otro negativo pudiendo conectarlas de dos formas:

- *Conexión en paralelo*: permitirá aumentar la intensidad total del conjunto.
- *Conexión en serie*: permitirá aumentar la tensión final en los extremos de la célula equivalente.

Un elemento imprescindible en las instalaciones conectadas a redes es el inversor, cuya función es convertir la corriente continua de la instalación en corriente alterna¹.

Por tanto, el proceso de producción de electricidad en un sistema conectado a la red eléctrica será:

- Captación de la radiación solar mediante las células.
- Producción de energía eléctrica en forma de corriente continua.
- Conversión en corriente alterna mediante inversores.
- Elevación de la tensión mediante un transformador de potencia.
- Venta a la red eléctrica.

4 DISEÑO Y CALCULO DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS CONECTADAS A RED

Las consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el diseño y cálculo de una instalación solar fotovoltaica son:

¹ La corriente continua (Direct Current-DC) es aquella cuyas cargas viajan siempre en la misma dirección desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial mientras que la corriente alterna (Alternatin Current-AC) tiene una fuerza y dirección variable.

- *Elección de la ubicación del lugar.* La cantidad de radiación recibida dependerá del lugar geográfico, es decir de la latitud. A la hora de orientar los paneles solares hay que tener en cuenta que la posición de la Tierra con respecto del Sol presenta un ángulo de declinación que no es constante y varía diariamente.

- *Cantidad de energía que es capaz de inyectar a la red.* Para estimar la energía generada se utiliza la fórmula siguiente [6]:

$$E_p = \frac{G_{dm}(\alpha, \beta) \cdot P_{mp} \cdot PR}{G_{CEM}}$$

donde:

$G_{dm}(\alpha, \beta)$. Valor medio mensual y anual de la irradiación diaria sobre el plano del generador en kWh/(m²·día).

P_{mp} . Potencia pico del generador: franja horaria determinada en la que la energía captada es recogida.

$G_{CEM} = 1 \text{ kWh/m}^2$.

PR. Performance Ratio: factor de Rendimiento Global del sistema en el que se tienen en cuenta las pérdidas energéticas asociadas a los rendimientos de conversión de corriente continua a alterna, de seguimiento del punto de máxima potencia del inversor y al hecho de que el rendimiento de las células solares en la realidad es inferior al que indica el valor de su potencia nominal, debido a que el valor de la temperatura de operación suele ser notablemente superior a 25° [6].

- *Estimación de la radiación recibida en el emplazamiento de la instalación.* La inclinación del panel influye en la cantidad de irradiación sobre la superficie. Por tanto se deberá tener en cuenta el cálculo de las pérdidas por radiación [6].

- *Cálculo de la potencia del generador fotovoltaico* [4]. Para determinar la potencia pico que debe suministrar el generador fotovoltaico debemos conocer:

- La potencia que se quiere inyectar a la red eléctrica.
- El valor de la radiación solar.
- La estimación de las pérdidas que puedan existir en la instalación, obtenidas según la siguiente expresión:

$$P_{mp} = \frac{E_p \cdot G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) \cdot PR}$$

- *Elección de los paneles solares para configurar el generador fotovoltaico* [4].

Hay que considerar lo siguiente:

- Tensión necesaria para que el inversor proporcione energía correcta a la red.
- Potencia total que debe entregar el generador.

El número de paneles necesarios lo obtenemos dividiendo la potencia pico entre el valor de la potencia que es capaz de suministrar el panel.

$$N_{paneles} = \frac{Potencia_{pico}}{Potencia_{panel}}$$

- *Determinación del inversor.* El inversor se encarga de convertir la corriente continua de la instalación en corriente alterna, igual a la utilizada en la red eléctrica: 220 V de valor eficaz y una frecuencia de 50 Hz. Debe sincronizar la onda eléctrica generada con la de la corriente eléctrica de la red.

Las características de un inversor deben ser:

- Alta eficiencia: debe funcionar bien para un amplio rango de potencias.
- Bajo consumo en vacío, es decir, cuando no hay cargas conectadas.
- Protección contra cortocircuitos.
- Seguridad.
- Buena regulación de la tensión y frecuencia de salida, compatible con la red eléctrica.

REFERENCIAS

[1] Moro VM. Instalaciones Solares Fotovoltaicas (1ª edición). ISBN 978-84-973-2776-3;2010.

[2] Fernández SJM. Guía completa de la Energía Solar Fotovoltaica. AMV ediciones. ISBN 84-87440-45-2;2006.

[3] Castro GM, Carpio IJ, Guirado TR, Colmenar SA, Dávila GL. Energía Solar Fotovoltaica. Monografías Técnicas de Energías Renovables. ISBN 84-86505-67-4;2000.

[4] Díaz CT, Carmona RG. Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Mc Graw hill. ISBN 978-84-481-7169-9;2010.

[5] Labouret A, Villos M. Energía Solar Fotovoltaica. Manual Práctico.AMV EDICIONES. 2008.

[6] Méndez MJM, Cuervo GR. Energía Solar Fotovoltaica. ECA. Instituto de Tecnología y Formación. FC editorial. ISBN 978-84-96743-29-8;2007.

ILUMINACIÓN

1 CONCEPTOS BÁSICOS

Una buena iluminación es importante para facilitar el rendimiento en una tarea visual y crear un entorno visual adecuado.

Para conseguir una buena iluminación del recinto es necesario tener en cuenta una serie de criterios básicos referentes a la disposición de la luz, condiciones del alumbrado, superficie a iluminar, actividad a desarrollar, edad de los usuarios, etc.

La luz es una radiación electromagnética que se propaga por el espacio a una velocidad $c=300.000 \text{ km/s}^1$. Según la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), es la radiación electromagnética capaz de estimular el órgano humano de la vista provocando una sensación visual.

El espectro de radiaciones electromagnéticas es muy amplio. Para la iluminación interesa la franja visible, teniendo cada longitud de onda y su frecuencia correspondiente asociado un color [1]:

- Longitudes de onda “ λ ” comprendidas entre 380 nm (violeta) y 780 nm (rojo) ($1\text{nm}=1\times 10^{-9} \text{ m.}$).
- Frecuencias $f=c/\lambda$ comprendidas entre $789\times 10^{12} \text{ Hz}$ (violeta) y $384\times 10^{12} \text{ Hz}$ (rojo).

Tanto la luz natural como la artificial producida en las lámparas están formadas por una agregación de radiaciones de distintas frecuencias. La luz natural es blanca al estar formada por un conjunto continuo de radiaciones electromagnéticas de distinta frecuencia, con un reparto entre frecuencias relativamente uniforme [1].

La luz artificial se produce en las lámparas normalmente de las siguientes formas [2]:

- *Por incandescencia.*

¹ James Clerk Maxwell (Edimburgo, 13 de junio de 1831- Cambridge, Reino Unido, 5 de noviembre de 1879). Físico británico conocido principalmente por haber desarrollado un conjunto de ecuaciones que expresan las leyes básicas de la electricidad y magnetismo, así como por la estadística de Maxwell-Boltzmann en la teoría cinética de gases.

Es la emisión de radiación luminosa mediante procesos térmicos. Consiste en calentar un cuerpo sólido hasta su temperatura de incandescencia, emitiendo una luz de un color dominante definido por dicha temperatura.

En iluminación se genera así la luz en las lámparas de incandescencia. El espectro de la luz así producida (es decir, la distribución de energía entre las distintas frecuencias) es bastante continuo, sin grandes irregularidades.

- *Por luminiscencia.*

Es la emisión de radiación luminosa por átomos, moléculas o iones, excitados por choque de electrones, es decir, por procedimientos no térmicos. La luminiscencia es el efecto luminoso producido generalmente por la excitación de los electrones de la última capa. El espectro de la luminiscencia es discontinuo, lo que no ocurre con la incandescencia, que es continuo. Se produce al añadir energía a un gas que se ioniza y emite luz.

En iluminación se produce la luz así en las lámparas de luminiscencia, aportándose energía por medio de una descarga eléctrica producida entre dos electrodos separados por una atmósfera de gas.

2 MAGNITUDES Y UNIDADES DE MEDIDA

La luz es una radiación electromagnética y como tal se pueden estudiar las magnitudes que definen esta forma de energía.

2.1 Flujo luminoso Φ (lumen-lm)

Es la cantidad de luz emitida en todas direcciones por una fuente de luz en la unidad de tiempo. Se representa por la letra griega “fi” Φ , y se mide en lumen (lm) [3]².

2.2 Rendimiento luminoso η (lumen/vatio-lm/W)

²Un lumen es la cantidad de luz monocromática de frecuencia 540×10^{12} hz. que tiene una potencia total de 1/683 W. Como se ve, es una unidad de “potencia luminosa”, es decir, cantidad de energía emitida por unidad de tiempo.

Es la relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente de luz y la energía eléctrica necesaria para producirla. Se representa por la letra griega “teta” η , y se mide en lumen/vatio (lm/W) [4].

Viene dada por la siguiente relación:

$$\eta = \frac{\Phi}{W}$$

donde,

Φ (lumen, lm): Flujo luminoso producido por la fuente luminosa.

W (vatios, W): Potencia eléctrica consumida por la fuente luminosa.

Conocida la potencia eléctrica de una lámpara “W” (W) y el rendimiento luminoso “ η ”, podemos calcular el flujo luminoso que sale de la misma mediante la siguiente fórmula:

$$\Phi = \eta \times W$$

Tipo de lámpara	Flujo luminoso (lm)	Rendimiento luminoso (lm/W)
Incandescente standard de 100 W	1.380	20
Fluorescente 40 W (Blanco frío)	3.200	95

Tabla 1. Flujo luminoso y rendimiento luminoso de algunas lámparas. Fuente: Obralux.

www.obralux.com.

2.3 Intensidad luminosa I (candela-cd)

Es la cantidad de luz emitida por una fuente de luz, en la unidad de tiempo, pero en una única dirección. La intensidad luminosa emitida en una cierta dirección por una fuente con flujo luminoso Φ en el sector de ángulo sólido³ ω centrado en esa dirección es [4]:

³ Para comprender el concepto, debe tenerse en cuenta el concepto de “ángulo sólido” ω medido en estereorradianes:

- Con ángulos planos, medidos en radianes, una circunferencia tiene $2\cdot\pi$ radianes.

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

Dicha intensidad luminosa se mide en candelas (cd).

2.4 Luminancia L (cd/m²=nit)

Es la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente, procedente de una fuente de luz [2]⁴.

2.5 Iluminancia ó nivel medio de iluminación requerido Em (lux-lx)

Se define como la cantidad de flujo luminoso incidente por unidad de superficie del objeto iluminado. Se representa por la letra “E”, y se mide en lux, siendo 1 lux=1 lumen/1 m² [2].

Viene dada por la expresión:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

donde,

Φ (lumen, lm): flujo luminoso producido por la fuente luminosa.

S (m²): Superficie iluminada.

-
- Con ángulos sólidos, medidos en estereorradianes, una esfera tiene $4 \cdot \pi$ estereorradianes.

Así pues, una fuente luminosa que emita un flujo luminoso de $4 \cdot \pi$ lúmenes en todas direcciones, emite una intensidad luminosa de 1 cd. en todas direcciones. Una candela es “la intensidad luminosa en una dirección dada procedente de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz. y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 W por estereorradián”.

⁴De este modo, la luminancia se mide en $\text{cd/m}^2 = \text{nit}$, y viene dada por: $L = \frac{I}{S'} = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha}$ siendo “I” la intensidad luminosa de la fuente en cd. Permite medir la cantidad de luz que incide sobre un plano inclinado un cierto ángulo “ α ” con la dirección del rayo de luz que viene de la fuente luminosa.

3 LÁMPARAS Y LUMINARIAS

3.1 Conceptos generales sobre lámparas

Generalmente se usan dos sistemas para medir las propiedades cromáticas de una fuente luminosa. La temperatura de color (T_c) y el índice de rendimiento del color (R_a).

3.1.1 Temperatura de color (T_c)

Se define como la temperatura absoluta (K) a la que un cuerpo negro⁵ emite una radiación luminosa que impresiona al ojo con un color igual o similar al de la fuente luminosa. Se representa con “ T_c ” (K) [5].

En la tabla 2 se muestra la temperatura de color de diferentes fuentes luminosas, definiéndose solamente las lámparas de uso doméstico más comunes:

Tipo de lámpara	Temperatura de color (K)
Lámpara halógena	3.000 a 3.100
Lámpara de incandescencia	3.100
Lámpara de fluorescencia	
• Luz día	5.000
• Blanco neutro	4.000
• Blanco cálido	3.300

Tabla 2. Temperaturas de color de distintos tipos de lámpara de uso doméstico. Fuente: Luminotécnia.

Obralux. www.obralux.com.

Se define apariencia de color como el color de la fuente luminosa. Es un color fundamentalmente blanco con una cierta tonalidad de color y está asociada de forma biunívoca a una temperatura de color [5].

Para cada temperatura de color de la tabla 2 y considerando el recinto que se va a iluminar y la atmósfera luminosa buscada, se obtiene el grupo de apariencia de color de la tabla 3:

⁵ El radiador denominado *cuerpo negro* es aquel cuyas propiedades de intensidad y espectro dependen exclusivamente de su temperatura.

Grupo apariencia de color	Apariencia de color	Temperatura de color	Recintos adecuados
1, ww	Cálido	< 3.300 K	Zonas residenciales
2, nw	Neutro	Entre 3.300 K y 5.000 K	Zonas de trabajo
3, tw	Frío	> 5.000 K	Altos niveles (lx), tareas especiales. Climas cálidos

Tabla 3. Clasificación según apariencias de color. Fuente: Norma Alemana DIN 5035.

3.1.2 Rendimiento de color (Ra ó IRC)

El rendimiento de color de una fuente de luz expresa la capacidad de discriminar colores en los objetos iluminados por dicha fuente. Se representa con “Ra” ó con “IRC” [5].

El IRC usual para los distintos tipos de lámparas se muestra en la tabla 4:

Tipo de lámpara	IRC (%)
Incandescentes	100
Incandescentes con ciclo halógeno	100
Fluorescentes según tipos	15 a 95

Tabla 4. Rendimientos de color en las lámparas de uso doméstico. Fuente: Obralux. www.obralux.com.

3.2 Descripción de los tipos de lámparas más comunes para uso doméstico

3.2.1 Lámparas de incandescencia convencionales

Es la segunda lámpara eléctrica en antigüedad, después del arco voltaico (solo usadas en focos y proyectores antiguos de cine)⁶.

Las bombillas modernas se realizan con un filamento de Wolframio arrollado en espiral, que por el paso de la corriente se calienta hasta $T = 2.400-2.900$ K, dispuesto en el interior de un globo de vidrio en el que se ha introducido un gas inerte (hidrógeno y nitrógeno) [6].

Ventajas:

- Es muy adaptable y cómoda.
- Hay muchas formas:

⁶ Su invento se atribuye a Thomas Alva Edison. Milán, Ohio, el 11 de febrero, 1847–18 de octubre, 1931, que consiguió la primera lámpara de incandescencia o bombilla en 1879, usando un filamento carbonizado de bambú, después de hacer más de mil ensayos con distintos materiales.

- Mignon.
 - Tubulares.
 - Mariposa.
 - Concentradoras (con reflector).
 - Difusoras.
 - Dicroica. Tiene un reflector de luz visible que permite pasar rayos infrarrojos hacia atrás, disminuyendo el calor sobre el objeto iluminado.
 - Se pueden fabricar para corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), y para cualquier tensión.
 - Muy buena reproducción cromática, al tener espectro continuo, con IRC prácticamente 100%.
 - No necesitan accesorios para su funcionamiento, conectándose directamente a la red.
 - Fácil regulación de la intensidad luminosa con un potenciómetro.
 - Posibilidad de encendido y reencendido instantáneos (posibilidad que no tienen las lámparas de luminiscencia, obligando a usar éstas en algunos casos).
 - Elevado flujo luminoso para una lámpara de reducidas dimensiones.
- Inconvenientes:
- Bajo rendimiento luminoso ($\eta = 8-18 \text{ lm/W}$). Solo el 10% de la energía consumida por la lámpara se transforma en luz, el resto se disipa en forma de calor (Figura 2).
 - Corta vida útil (500-1.000 h.).
 - Fuerte depreciación del flujo luminoso a lo largo de su vida útil.
 - Es sensible a cambios de tensión en la red, disminuyendo de forma notable su flujo luminoso y su vida útil.

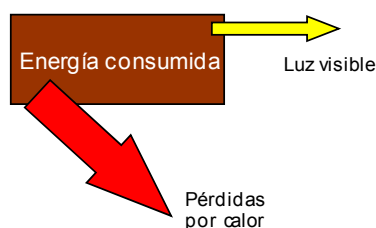


Figura 1. Rendimiento de una lámpara incandescente. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Lámparas fluorescentes⁷

Están constituidas por un tubo de vidrio o bulbo tubular recubierto interiormente de un material fluorescente, que tiene en sus extremos los electrodos y en su interior un relleno de gas formado por gas inerte (argón o kriptón) y vapor de mercurio. En ellas se produce una descarga eléctrica a través del gas entre los electrodos, iniciándose el arco eléctrico. Dicho arco aumenta la temperatura y presión del mercurio contenido en forma líquida dentro del tubo, provocando su vaporización y empezando éste a emitir luz. Dicha luz incide sobre el material fluorescente que recubre el interior del tubo, el cual es excitado sobre todo por la parte ultravioleta, emitiendo a su vez nueva luz que completa el espectro emitido finalmente por la lámpara [7].

Las más comunes tienen la apariencia de un tubo de vidrio, de color blanco, con 2 conexiones eléctricas en sus extremos. Tradicionalmente presentan un diámetro de 38 mm. aunque, hoy lo más normal es 26 mm., del tipo ahorrador de energía. También los hay de 16 mm., e incluso de diámetros inferiores para usos especiales. Tienen longitudes de diversos valores normalizados y son normalmente de color blanco [8].

⁷ El más antiguo antecedente de la iluminación fluorescente posiblemente sea un dispositivo construido por el físico alemán Heinrich Geissler en 1856, mediante el cual obtuvo una luz de brillo azulado a partir de un gas noble (como argón o neón) encerrado en un tubo excitado con una bobina de inducción. Debido a su forma, este dispositivo pasó a llamarse "Tubo de Geissler". En 1891, el inventor estadounidense Daniel McFarlane Moore comenzó a realizar experimentos con tubos de descarga gaseosa, creando así en 1894 la Lámpara Moore, que era una lámpara comercial que competía con las bombillas de luz incandescentes creadas por su antiguo jefe Thomas Alva Edison. En 1901, Peter Cooper Hewitt presentó su lámpara de vapor de mercurio, la cual emitía luz de coloración verde-azulada, que era inapropiada para la mayoría de los usos prácticos. Sin embargo, su diseño fue muy cercano al de las lámparas actuales, además de tener mayor eficiencia que sus similares incandescentes. En 1926, Edmund Germer, Friedrich Meyer y Hans Spanner propusieron incrementar la presión del gas dentro del tubo y recubrirlo internamente con un polvo fluorescente que convirtiera la radiación ultravioleta emitida por un gas en estado de plasma en una luz blanca más uniforme. La idea fue patentada al año siguiente y posteriormente la patente fue adquirida por la empresa estadounidense General Electric y bajo la dirección de George E. Inman la hizo disponible para el uso comercial en 1938. Los conocidos tubos rectos y de encendido por precalentamiento se mostraron por primera vez al público en la Feria Mundial de New York, en el año 1939. Desde entonces, los principios de funcionamiento se han mantenido inalterables, salvo las tecnologías de manufactura y materias primas usadas, lo que ha redundado en la disminución de precios y ha contribuido a popularizar estas lámparas en todo el mundo.

La característica fundamental de estas lámparas es la composición de los polvos fluorescentes que recubren el interior del tubo, pues de éstos depende la tonalidad de la luz. Así se obtienen los siguientes tonos [7]:

- Color de luz blanco/día: $T_c = 6.000-65.000$ K (“tw” -trifle white). Aspecto limpio y frío. Apropiado para locales de exposición con escaparates, tiendas de automóviles, ordenadores, electrodomésticos...

- Color de luz blanco/neutro o blanco/frío: $T_c = 4.000$ K (“nw”- natural white). Ambiente dinámico y de trabajo intelectual. Apropiado para aulas y locales administrativos.

- Color de luz blanco/cálido: $T_c = 3.000$ K (“ww” - warm white). Atmósfera acogedora, adecuada para lugares de recepción en hoteles, edificios sanitarios...

- Color de luz de lujo. Se consigue una luz de tonos agradables y cálidos, un mejor IRC, pero menor rendimiento luminoso (η).

Para conseguir el funcionamiento se necesitan los siguientes elementos:

- Reactancia. Permite reducir el voltaje hasta el valor requerido.
- Cebador. Permite iniciar el arco en la luminaria.
- Condensador. Normalmente está integrado con la reactancia. Permite aumentar el factor de potencia hasta el valor requerido (0,8 en los tubos de \varnothing 26 mm.).

Ventajas [6]:

- Rendimiento luminoso elevado: $\eta = 95-105$ lm/W.
- Para un mismo flujo luminoso, su consumo es el 20% del de una lámpara de incandescencia.
- Vida útil (6.000-20.000 h.), muy superior a la de las lámparas de incandescencia.
- Calentamiento muy débil. La superficie del tubo está a unos 55 °C. Es así porque invierte muy poca energía en calor. Supone menos carga para el aire acondicionado.
- Permite una amplia variedad de tonalidades de color, incluyendo la luz del día.
- La luz es difusa, lo que supone una gran comodidad visual, evitando en buena medida los deslumbramientos y una menor cantidad de sombras.

Inconvenientes [6]:

- Precio más elevado de 1ª instalación que las lámparas incandescentes.
- Fragilidad mecánica.
- Tiempo de encendido apreciable. No son aptas para múltiples encendidos y apagados, los cuales además disminuirían su vida útil.

- Originan en el usuario cierto “parpadeo” debido a la corriente alterna, originando una fatiga mayor en el ojo, teniendo incluso cierto efecto estroboscópico. Hoy se soluciona con las modernas reactancias y autotransformadores electrónicos, y disponiendo los tubos por parejas o tríos en las luminarias.

- Al arrancar, consumen aproximadamente 1,8 veces la potencia nominal, que es la que consumen en régimen permanente, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de dimensionar la instalación eléctrica.

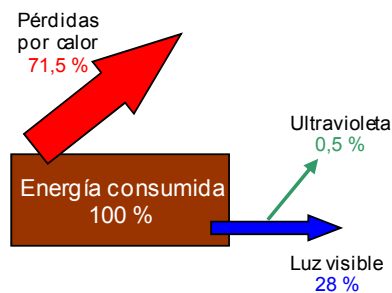


Figura 2. Rendimiento de una lámpara fluorescente. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Lámparas de incandescencia halógenas o de cuarzo-yodo

Hay de 2 tipos [6]:

- De baja tensión: 230 V.
- De muy baja tensión: 50 V.

Su fundamento consiste en añadir unos gases con yodo al gas inerte que rellena el globo de vidrio, con lo que se consigue regenerar en parte el filamento de Wolframio, aumentando la vida útil de la lámpara.

Características:

- Flujo luminoso un 20% superior al de las lámparas incandescentes convencionales (20-24 lm/W).
- Vida útil de ≈ 2000 h. Casi no tienen depreciación a lo largo de la misma.
- Necesitan para su funcionamiento una mayor temperatura, por ello, las lámparas se hacen de menor tamaño.
- Permiten un control exacto del flujo luminoso, admitiendo el uso de reguladores de dicho flujo.
- Conservan un IRC elevado.

Se incluye a continuación un resumen de las características principales de las lámparas más comunes de uso doméstico.

Formato o modelo	Potencia (W)	Tensión (V)	Rendimiento (lm/W)	Temperatura color (K)	IRC (%)
Standard	15	220/230	8	2.000	100
	25	220/230	9	2.000	100
	40	220/230	10	2.000	100
	60	220/230	12	2.000	100
	100	220/230	14	2.000	100
	150	220/230	15	2.000	100
	200	220/230	16	2.000	100
	300	220/230	17	2.000	100
	500	220/230	19	2.000	100
	750	220/230	20	2.000	100
	1.000	220/230	20	2.000	100
	1.500	220/230	20	2.000	100
2.000	220/230	21	2.000	100	
Standard mate	40	220/230	18	2.000	100
	60	220/230	18	2.000	100
	100	220/230	19	2.000	100

Tabla 5. Lámparas incandescentes. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores.

Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

Formato o modelo	Potencia (W)	Tensión (V)	Rendimiento (lm/W)	Temperatura color (K)	IRC (%)
Lineal (Doble terminal)	100	220/230	17	3.000	100
	150	220/230	18	3.000	100
	200	220/230	18	3.000	100
	250	220/230	20	3.000	100
	300	220/230	20	3.000	100
	400	220/230	20	3.000	100
	500	220/230	20	3.000	100
	750	220/230	23	3.000	100
	1.000	220/230	24	3.000	100
	1.500	220/230	24	3.000	100
2.000	220/230	24	3.000	100	
Cápsulas de baja tensión	35	12	18	3.000	100
	50	12	20	3.000	100
	75	12	21	3.000	100
	100	12	24	3.000	100
Standard mate	20	12	-	3.200	100
	35	12	-	3.200	100
	50	12	-	3.200	100
	65	12	-	3.200	100

Tabla 6. Lámparas halógenas. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores.

Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

Formato o modelo	Potencia (W)	Tensión (V)	Rendimiento (lm/W)	Temperatura color (K)	IRC (%)
Cápsulas tensión normal	75	220/230	14	2.800	100
	100	220/230	14	2.800	100
	150	220/230	15	2.800	100
Doble envoltura	75	220/230	15	2.900	100
	100	220/230	16	2.900	100
	150	220/230	17	2.900	100
	500	220/230	21	3.200	100
	1.000	220/230	24	3.200	100
	2.000	220/230	25	3.200	100
Globo	100	220/230	15	2.800	100
	150	220/230	14	2.800	100
Par-38	75	220/230	-	2.900	100
	100	220/230	-	2.900	100
	150	220/230	-	2.900	100

Tabla 7. Lámparas halógenas. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores. Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

Formato o modelo	Potencia (W)	Tensión (V)	Rendimiento (lm/W)	Temperatura color (K)	IRC (%)
Tubo standard diámetro 38 mm.	20	Luz Día	53	6.500	75
	40	Luz Día	63	6.500	75
	65	Luz Día	62	6.500	75
	115	Luz Blanca	60	4.100	63
	65	Luz Blanca	73	4.100	63
	40	Luz Blanca	72	4.100	63
	20	Luz Blanca	60	4.100	63
Tubo standard diámetro 26 mm.	15	Luz Día	56	6.200	72
	18	Luz Día	59	6.200	72
	23	Luz Día	70	6.200	72
	30	Luz Día	67	6.200	72
	36	Luz Día	70	6.200	72
	58	Luz Día	69	6.200	72
	15	Luz Blanca	64	4.100	63
	18	Luz Blanca	64	4.100	63
	23	Luz Blanca	83	4.100	63
	30	Luz Blanca	77	4.100	63
	36	Luz Blanca	83	4.100	63
	58	Luz Blanca	83	4.100	63

Tabla 8. Lámparas fluorescentes. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores. Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

Formato o modelo	Potencia (W)	Tensión (V)	Rendimiento (lm/W)	Temperatura Color (K)	IRC (%)
Tubo standard diámetro 26 mm.	18	Blanco Cálido	81	3.000	85
	30	Blanco Cálido	77	3.000	85
	36	Blanco Cálido	96	3.000	85
	58	Blanco Cálido	93	3.000	85
	18	Blanco Cálido	53	3.000	95
	30	Blanco Cálido	60	3.000	95
	36	Blanco Cálido	64	3.000	95
Tubo standard diámetro 16 mm.	58	Blanco Cálido	62	3.000	95
	14	Luz Día	79	6.200	86
	21	Luz Día	84	6.200	86
	24	Luz Día	67	6.200	86
	28	Luz Día	86	6.200	86
	35	Luz Día	87	6.200	86
	39	Luz Día	73	6.200	86
	49	Luz Día	74	6.200	86
54	Luz Día	75	6.200	86	
80	Luz Día	72	6.200	86	

Tabla 9. Lámparas fluorescentes. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores.

Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

3.3 Definición y clasificación de las luminarias

Luminarias son aquellos aparatos que distribuyen, filtran o transforman la luz emitida por una o varias lámparas y que contiene todos los accesorios necesarios para fijar las lámparas y conectarlas al circuito eléctrico de alimentación [9].

Las luminarias para alumbrado interior incluyen los siguientes elementos [10]:

- Lámparas de incandescencia.
- Luminarias de tubos fluorescentes.
- Luminarias de lámparas de descarga.

Las luminarias pueden dirigir la luz mediante alguno o varios de los elementos siguientes [9]:

- *Elementos reflectores.* Situados tras la lámpara, normalmente con acabado de espejo o de color blanco.

- *Elementos refractores.* Situados delante de la lámpara, son transparentes o translúcidos, y la luz pasa a través de ellos modificando su dirección, actuando el elemento como una lente.

- *Elementos difusores.* Situados delante de la lámpara. Son translúcidos, y la luz cuando pasa a través de ellos se difunde en todas direcciones, cambiando en algunos

casos su color y evitando que se vea directamente la lámpara, con lo que se disminuyen o evitan los deslumbramientos.

Las luminarias se pueden clasificar atendiendo a los criterios siguientes [11]:

- Según la forma de transmitir la luz:
 - Luminarias reflectoras.
 - Luminarias refractoras.
 - Luminarias difusoras. Difunden la luz para conseguir una luz difusa y disminuir el deslumbramiento que originaría la visión directa de la lámpara. Se emplean mucho en iluminación de viviendas.
 - Luminarias mixtas.
- Según la simetría del haz luminoso.
 - Luminarias de distribución simétrica. En ellas el flujo luminoso se reparte simétricamente con respecto a dos planos verticales perpendiculares alineados con los ejes principales de la luminaria. Son así la práctica totalidad de las luminarias usadas en iluminación de interiores.
 - Luminarias de distribución asimétrica.
- Según la distribución del flujo luminoso con respecto al plano horizontal.
 - Luminarias de flujo directo. Cuando el flujo luminoso emitido bajo el plano horizontal que pasa por el vértice de la fuente de luz es $\geq 90\%$ del flujo luminoso útil.
 - Luminarias de flujo semidirecto. Entre el 60% y el 90%.
 - Luminarias de flujo difuso y directo-indirecto. Entre el 40% y el 60%.
 - Luminarias de flujo semiindirecto. Entre el 10% y el 40%.
 - Luminarias de flujo indirecto. Entre el 0% y el 10%.
- Según el ángulo de apertura.
 - Luminarias de tipo intensivo. β entre 0° y 30° .
 - Luminarias de tipo intensivo. β entre 0° y 30° .
 - Luminarias de tipo semiintensivo. β entre 30° y 40° .
 - Luminarias de tipo dispersor. β entre 40° y 50° .
 - Luminarias de tipo semiextensivo. β entre 50° y 60° .
 - Luminarias de tipo extensivo. β entre 60° y 70° .
 - Luminarias de tipo hiperextensivo. β entre 70° y 90° .

4 METODO RESUMIDO

4.1 Iluminación de interiores

4.1.1 Lámparas y luminarias

Las lámparas empleadas en iluminación de interiores abarcan casi todos los tipos existentes en el mercado (incandescentes, halógenas, fluorescentes, etc.). Las lámparas escogidas, por lo tanto, serán aquellas cuyas características (fotométricas, cromáticas, consumo energético, economía de instalación y mantenimiento, etc.) mejor se adapten a las necesidades y características de cada instalación (nivel de iluminación, dimensiones del local, ámbito de uso, potencia de la instalación...) [12].

Fluorescentes compactas Ámbito de uso	Tipos de lámparas más utilizados
Doméstico	Incandescente
	Fluorescente
	Halógenas de baja potencia
	Fluorescentes compactas
Oficinas	Alumbrado general: fluorescentes
	Alumbrado localizado: incandescentes y halógenas de baja tensión
Comercial (Depende de las dimensiones y características del comercio)	Incandescentes
	Fluorescentes
	Grandes superficies con techos altos: mercurio a alta presión y halogenuros metálicos
Industrial	Industrial
Deportivo	Luminarias situadas a baja altura: fluorescentes
	Luminarias situadas a gran altura: lámparas de vapor de mercurio a alta presión, halogenuros metálicos y vapor de sodio a alta presión

Tabla 10. Tipos de lámparas más utilizados en función del ámbito de uso. Fuente: D. Oriol Boix Aragonés. Departamento de Ingeniería Eléctrica de UPC. Septiembre de 1999. ISBN: 84-600-9647-5.
<http://edison.upc.edu/curs.ilum>.

La elección de las luminarias está condicionada por la lámpara utilizada y el entorno de trabajo de ésta. La forma y tipo de las luminarias oscilará entre las más funcionales, donde lo más importante es dirigir el haz de luz de forma eficiente como pasa en el alumbrado industrial, a las más formales donde lo que prima es la función decorativa como ocurre en el alumbrado doméstico [12].

Las luminarias para lámparas incandescentes tienen su ámbito de aplicación básico en la iluminación doméstica. Por lo tanto, predomina la estética sobre la eficiencia luminosa. Solo en aplicaciones comerciales o en luminarias para iluminación suplementaria se buscará un compromiso entre ambas funciones. Son aparatos que necesitan apantallamiento pues el filamento de estas lámparas tiene una luminancia muy elevada y pueden producir deslumbramientos [11].

En segundo lugar tenemos las luminarias para lámparas fluorescentes. Se utilizan mucho en oficinas, comercios, centros educativos, almacenes, industrias con techos bajos, etc. por su economía y eficiencia luminosa. Así pues, nos encontramos con una gran variedad de modelos que van de los más simples a los más sofisticados con sistemas de orientación de la luz y apantallamiento (modelos con rejillas cuadradas o transversales y modelos con difusores) [11].

4.1.2 Sistemas de alumbrado interior

Cuando una lámpara se enciende el flujo emitido puede llegar a los objetos de la sala directamente o indirectamente por reflexión en paredes y techo. La cantidad de luz que llega directa o indirectamente determina los diferentes sistemas de iluminación con sus ventajas e inconvenientes [13].

- Luz directa.
- Luz indirecta proveniente del techo.
- Luz indirecta proveniente de las paredes.

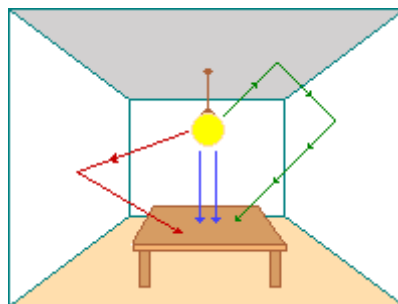


Figura 5. Sistemas de Iluminación. Fuente: Luminotecnia. Iluminación de Interiores y exteriores. D. Oriol Boix Aragonés. Departamento de Ingeniería Eléctrica de UPC. Septiembre de 1999. ISBN: 84-600-9647-5. <http://edison.upc.edu//curs.ilum>.

Según la distribución del flujo luminoso con respecto al plano horizontal se pueden distinguir los siguientes tipos de iluminación, definidos por el tipo de luminaria [14]:

- Iluminación directa. Del 90% al 100% del flujo luminoso se dirige hacia el suelo. Las luminarias son normalmente reflectoras, con el reflector dirigido hacia abajo. Rendimiento luminoso del sistema: 45%-50% (es decir, un 45%-50% de la luz producida en las lámparas llega al plano de trabajo).

- Iluminación semidirecta. Del 60% al 90% del flujo luminoso se dirige hacia el suelo. Las luminarias de este tipo se consiguen añadiendo a las luminarias de iluminación directa un difusor adecuado que conduce parte de la luz por encima de la horizontal, reduciendo algo el rendimiento luminoso de la luminaria, pero consiguiendo un efecto mucho mejor. Rendimiento luminoso del sistema: 40%.

- Iluminación difusa y directa-indirecta (también llamada mixta). Se dirige al suelo aproximadamente la misma cantidad que al techo (40% al 60%). Rendimiento luminoso del sistema: 35%. Distinguimos 2 casos:

- Iluminación difusa. Se emite luz difusa en todas direcciones, rodeando la lámpara en la luminaria con un elemento difusor que suele ser globo de material traslúcido.

- Iluminación directa-indirecta. Se emite luz hacia arriba y hacia abajo, también con un elemento difusor, pero no en el plano horizontal, ya que la luminaria en esa zona es opaca.

- Iluminación semiindirecta. Del 10% a 30% del flujo luminoso se dirige hacia el suelo, y del 60% al 90% hacia el techo. Se consigue dirigir así el flujo luminoso disponiendo en la parte inferior de la luminaria un difusor realizado con pantalla de papel, plásticos o vidrios traslúcidos, que permiten un control muy preciso de la luz que pasa a través de ellas. El rendimiento luminoso del sistema es de un 25%, ya que buena parte de la luz es absorbida por techo y paredes.

- Iluminación indirecta. Casi todo el flujo luminoso (90%) se dirige hacia arriba en ángulos por encima de la horizontal, repartiéndose uniformemente en el techo y reflejándose desde éste hacia el suelo.

4.2 Deslumbramiento

Cuanto mayor es la cantidad de luz sobre una tarea o plano de trabajo, parece razonable que habrá un mayor rendimiento visual, pero un exceso de iluminación puede producir efectos perjudiciales, como puede ser el deslumbramiento⁸ y la contaminación lumínica⁹. Por tanto, se ha de considerar que obtener el nivel de iluminación adecuado a la tarea y al entorno debe ser tarea prioritaria del diseño de un sistema de alumbrado, aparte de otras consideraciones estéticas, económicas, de mantenimiento, etc. [2].

4.3 Niveles de iluminación recomendados

Los niveles de iluminación recomendados para un local dependen de las actividades que se vayan a realizar en él. A continuación se reflejan en la tabla 11 los valores mínimos y recomendados de la iluminancia.

⁸ Es la sensación producida por el exceso de iluminación dentro del campo visual. Esta sensación altera la tarea visual del ojo produciéndole anomalías: molestias, reducción de visibilidad o ambas a la vez. En la iluminación interior, el deslumbramiento fisiológico (o perturbador) es de menos importancia que el deslumbramiento psicológico (molesto). El deslumbramiento, en cualquiera de los tipos anteriores, viene producido directamente o por reflexión. El deslumbramiento se puede controlar actuando sobre las lámparas, luminarias y materiales que rodean el espacio donde se realiza la tarea visual.

⁹ La contaminación lumínica o resplandor luminoso nocturno en el cielo es el brillo producido por la reflexión y difusión de la luz artificial en los gases y partículas en suspensión de la atmósfera.

ESTANCIA	ILUMINANCIA Mínima (lx)	ILUMINANCIA Recomendada (lx)
EDIFICIOS DE VIVIENDAS		
Vestíbulo	100	150
Pasillo	100	150
Escalera interior	150	200
Cocina	300	400
Cuarto de baño	100	300
Aseo	100	200
Dormitorios	50	100
Vestidor	150	200
Comedor	200	300
Salón-Estar	200	300
Cuarto de los niños	100	200
Biblioteca	500	600
Cuartos de estudio	300	500
Despacho	400	500
Trastero	50	100
Garaje privado	100	200
ZONAS COMUNES		
Portal	100	200
Escalera	100	150
Pasillos	100	150
Porches	50	100
Portería-Conserjería	100	150
Patios	50	50
Cuartos de basura	150	200
LOCALES TECNICOS		
Cuarto de contadores de agua	200	250
Cuarto de contadores de gas	200	250
Cuarto de contadores eléctricos	200	250
Centros de transformación	250	250
Sala de maquinas de ascensor	200	300
Sala de maquinas de frío	200	250
Sala de calderas	200	250
Sala de grupo de elevación de agua	200	250
Sala de grupo contra incendio	200	250
Sala de grupo de emergencia	200	250

Tabla 11. Valores de iluminación. Fuente: Manual de Alumbrado Westinghose. Editorial Dossat, S.A. Madrid 1989

4.4 Cálculo de instalaciones de alumbrado

4.4.1 Método de los lúmenes o del factor de utilización

En el interior de un local la iluminación en un punto sobre una superficie horizontal se obtiene no sólo por el flujo recibido directamente desde la luminaria, sino también

por el reflejado desde el techo y las paredes laterales que reciben flujo luminoso de la luminaria. Parte de este flujo es reflejado según la naturaleza de la superficie y las características espectrales del flujo incidente. Después de una o más reflexiones, una parte de dicho flujo puede recibirse eventualmente en la superficie horizontal considerada que es denominada generalmente como plano de trabajo y puede ser un plano real o un plano imaginario a una distancia determinada sobre el suelo [13].

Si el flujo que incide sobre el plano de trabajo se divide por el flujo emitido por el elemento de iluminación, la relación es denominada *factor de utilización* para la unidad determinada y la sala particular considerada [15].

Para el cálculo del factor de utilización además de tener en cuenta lo anterior, es necesario considerar los siguientes parámetros:

- *Distancia de suspensión de la luminaria. Altura del plano de trabajo al suelo. Altura del plano de las luminarias al plano de trabajo h (m).* La iluminación pretende conseguir una óptima iluminación del plano de trabajo, situado a la siguiente altura “ h_1 ” del suelo [16]:

- Locales de trabajo y estancia: $h_1 = 0,85$ m.
- Pasillos y zonas de paso: $h_1 = 0,00$ m.

Si la altura y la estética lo permiten, la distancia de suspensión (d') de las luminarias debería estar entre los siguientes valores [15]:

- Iluminación directa, semidirecta y difusa

$$d' = \text{entre } \frac{d}{3} \text{ y } \frac{d}{5}$$

- Iluminación semiindirecta e indirecta

$$d' = \frac{d}{4}$$

donde:

d : altura del plano de trabajo al techo.

d' : altura entre el plano de las luminarias y el techo.

• *Elección de la apertura del haz y del modelo de luminaria.* La apertura o dispersión del haz de luz se define como el ángulo comprendido entre las dos direcciones en que la intensidad luminosa cae un determinado porcentaje (usualmente el 10% ó el 50%) del valor máximo que hay en el centro del haz donde la intensidad es máxima [15]. La apertura del haz de la luminaria se elegirá en función de la altura del local “H”, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tipo de luminaria	Altura del local H (m)	Distancia máxima entre luminarias
Intensiva	>10	$e \leq 1,2h$
Semiintensivo	6– 10	$e \leq 1,5h$
Semiextensiva	4–6	
Extensiva	≤ 4	$e \leq 1,6h$
Distancia pared–luminaria: $e/2$		

Tabla 12. Distancia máxima entre luminarias. Fuente: Luminotecnia. Iluminación de Interiores y exteriores. D. Oriol Boix Aragonés. Departamento de Ingeniería Eléctrica de UPC. Septiembre de 1999. ISBN: 84-600-9647-5. <http://edison.upc.edu/curs.ilum>.

• *Índice del local (K).* El índice del local (K) es el índice que valora la influencia de las dimensiones del local sobre el rendimiento de las luminarias [12]:

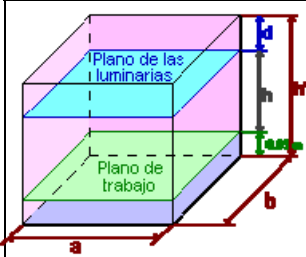
	Sistema de iluminación	Índice del local
	Iluminación directa, semidirecta, directa-indirecta y general difusa	$k = \frac{a \cdot b}{h(a + b)}$
Iluminación indirecta y semiindirecta	$k = \frac{3 \cdot a \cdot b}{2(h + 0.85)(a + b)}$	

Tabla 13. Índice del local dependiendo del sistema de iluminación. Fuente: Luminotecnia. Iluminación de Interiores y exteriores. D. Oriol Boix Aragonés. Departamento de Ingeniería Eléctrica de UPC. Septiembre de 1999. ISBN: 84-600-9647-5. <http://edison.upc.edu/curs.ilum>.

donde:

a: Largo de la superficie rectangular del local (m).

b: Ancho de la superficie rectangular del local (m).

h: Distancia entre el plano de trabajo (0,85 m. sobre el suelo) y el plano horizontal de las luminarias emplazadas colgadas del techo, adosadas a este o empotradas en el mismo.

- *Factor de reflexión o reflectancia “ ρ ” de paredes, suelo y techo.* Es la relación entre el número de lúmenes reflejados (flujo luminoso reflejado) por superficie y el número de lúmenes recibidos en esa misma superficie (flujo luminoso incidente) [12]. Podemos utilizar los valores de la tabla 14 para determinar la reflectancia de los distintos revestimientos. Como las paredes suelen estar cubiertas con muebles, cuadros, ventanas, etc., no debería tomarse un $\rho_{\text{paredes}} > 0,60$ aun con paredes blancas [15].

Paramento	Color	Factor de reflexión (ρ)
Techo	Blanco o muy claro	0,7
	Claro	0,5
	Medio	0,3
Paredes	Claro	0,5
	Medio	0,3
	Oscuro	0,1
Suelo	Claro	0,3
	Oscuro	0,1

Tabla 14. Factor de reflexión en función del material de suelos y otros revestimientos. Fuente: Ramírez Vázquez, J. (1990). Luminotecnia. Enciclopedia CEAC de electricidad. 7ª ed. Ediciones CEAC.

- *Coefficiente de utilización o factor de utilización (C_u).* Se obtiene entrando en las siguientes tablas dadas por el fabricante de la luminaria elegida con los valores del coeficiente del local (K) y de los factores de reflexión (ρ_{paredes} , ρ_{suelo} , ρ_{techo}).

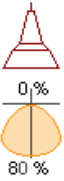
Aparato de alumbrado	Índice del local K	Factores de utilización								
		$\rho_t = 0,7$			$\rho_t = 0,5$			$\rho_t = 0,3$		
		$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$	$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$	$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$
	1	0,27	0,21	0,17	0,26	0,21	0,17	0,26	0,21	0,17
	1,2	0,32	0,26	0,21	0,31	0,25	0,21	0,30	0,25	0,21
	1,5	0,38	0,32	0,27	0,37	0,32	0,27	0,36	0,31	0,27
	2	0,46	0,40	0,36	0,45	0,40	0,36	0,44	0,39	0,36
	2,5	0,51	0,46	0,42	0,50	0,46	0,42	0,49	0,45	0,42
	3	0,55	0,50	0,46	0,54	0,50	0,46	0,53	0,49	0,46
	4	0,61	0,56	0,53	0,60	0,56	0,53	0,59	0,55	0,53
	5	0,64	0,60	0,57	0,63	0,60	0,57	0,62	0,60	0,57
	6	0,67	0,63	0,61	0,66	0,63	0,60	0,65	0,62	0,60
	8	0,70	0,67	0,65	0,69	0,67	0,65	0,68	0,66	0,65
10	0,72	0,70	0,68	0,71	0,69	0,67	0,71	0,69	0,67	
1 Aparato de alumbrado en el centro del local										
1	0,29	0,23	0,19	0,28	0,23	0,19	0,28	0,23	0,19	
1,2	0,35	0,29	0,25	0,34	0,29	0,25	0,33	0,28	0,25	
1,5	0,42	0,37	0,33	0,41	0,36	0,33	0,41	0,36	0,33	
2	0,52	0,47	0,44	0,51	0,47	0,44	0,50	0,47	0,44	

Tabla 15. Cálculo de proyectos de iluminación interior. Lámparas incandescentes. Iluminación directa.
Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores. Autor: Franco Martín Sánchez. 2005.
ISBN: 84-87440-10-X.

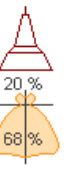
Aparato de alumbrado	Índice del local K	Factores de utilización								
		$\rho_t = 0,7$			$\rho_t = 0,5$			$\rho_t = 0,3$		
		$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$	$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$	$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$
	1	0,27	0,21	0,17	0,25	0,20	0,16	0,23	0,19	0,15
	1,2	0,32	0,26	0,21	0,30	0,24	0,20	0,27	0,23	0,19
	1,5	0,38	0,32	0,27	0,35	0,30	0,26	0,33	0,28	0,24
	2	0,46	0,40	0,35	0,43	0,37	0,33	0,39	0,35	0,32
	2,5	0,51	0,45	0,41	0,47	0,43	0,39	0,44	0,40	0,36
	3	0,55	0,50	0,45	0,51	0,47	0,43	0,47	0,44	0,40
	4	0,60	0,56	0,52	0,56	0,52	0,49	0,52	0,49	0,46
	5	0,64	0,60	0,56	0,60	0,56	0,53	0,56	0,53	0,50
	6	0,66	0,63	0,59	0,62	0,59	0,56	0,58	0,56	0,53
	8	0,70	0,67	0,64	0,66	0,63	0,61	0,61	0,59	0,57
10	0,72	0,69	0,67	0,68	0,65	0,63	0,64	0,67	0,60	
1 Aparato de alumbrado en el centro del local										
1	0,29	0,23	0,19	0,27	0,22	0,18	0,25	0,20	0,17	
1,2	0,34	0,28	0,24	0,32	0,27	0,23	0,30	0,25	0,22	
1,5	0,41	0,36	0,31	0,39	0,34	0,30	0,36	0,32	0,28	
2	0,51	0,46	0,42	0,48	0,43	0,40	0,45	0,41	0,38	

Tabla 16. Cálculo de proyectos de iluminación interior. Lámparas incandescentes. Iluminación semidirecta. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores. Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

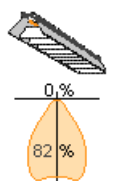
Aparato de alumbrado	Índice del local K	Factores de utilización								
		$\rho_t = 0,7$			$\rho_t = 0,5$			$\rho_t = 0,3$		
		$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$	$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$	$\rho_p = 0,5$	$\rho_p = 0,3$	$\rho_p = 0,1$
	1	0,29	0,24	0,20	0,29	0,23	0,20	0,28	0,23	0,20
	1,2	0,35	0,29	0,25	0,34	0,28	0,25	0,33	0,28	0,24
	1,5	0,41	0,36	0,31	0,41	0,35	0,31	0,40	0,35	0,31
	2	0,50	0,45	0,41	0,49	0,44	0,41	0,48	0,44	0,41
	2,5	0,55	0,50	0,47	0,54	0,50	0,46	0,53	0,50	0,46
	3	0,59	0,55	0,51	0,58	0,54	0,51	0,58	0,54	0,51
	4	0,65	0,61	0,58	0,64	0,60	0,58	0,63	0,60	0,57
	5	0,68	0,65	0,62	0,67	0,64	0,62	0,66	0,64	0,62
	6	0,70	0,67	0,65	0,69	0,67	0,65	0,69	0,67	0,65
	8	0,73	0,71	0,69	0,72	0,71	0,69	0,72	0,71	0,69
10	0,75	0,73	0,71	0,74	0,73	0,71	0,74	0,73	0,71	
1 Aparato de alumbrado en el centro del local										
	1	0,32	0,26	0,22	0,31	0,26	0,22	0,30	0,26	0,22
	1,2	0,38	0,33	0,29	0,37	0,32	0,29	0,37	0,32	0,29
	1,5	0,46	0,41	0,38	0,46	0,41	0,38	0,45	0,41	0,38
	2	0,57	0,53	0,50	0,57	0,53	0,50	0,56	0,53	0,50

Tabla 17. Cálculo de proyectos de iluminación interior. Lámparas fluorescentes. Iluminación directa con armadura sencilla. Fuente: Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores. Autor: Franco Martín Sánchez. 2005. ISBN: 84-87440-10-X.

Un coeficiente de utilización alto indica que una gran parte del flujo luminoso producido en la lámpara o lámparas de las luminarias se aprovecha en el plano de trabajo [12]. El coeficiente de utilización (C_u) es tanto mayor cuanto:

- Mayores son los factores de reflexión de techo, paredes y suelo.
- Mayores son la longitud “L” y la anchura del local “A”.
- Menor es la altura del plano de trabajo “h”.
- *Coeficiente o factor de conservación de las lámparas “C_c”*. Los valores de flujo luminoso dados por el fabricante de las lámparas son para una lámpara nueva y limpia. Sin embargo, a lo largo de la vida útil de la lámpara se produce una disminución del mismo por [16]:
 - Envejecimiento de la lámpara (es irreversible).
 - Ensuciamiento de la lámpara (puede solucionarse limpiándola).

En la tabla 18 se dan los valores del coeficiente de conservación (C_c) teniendo en cuenta lo anterior.

TIPO DE MANTENIMIENTO	COEFICIENTE DE CONSERVACIÓN			
	Luminaria AL AIRE	Luminaria ABIERTA	Luminaria CERRADA	Luminaria ESTANCA
Bueno	0,70	0,75	0,80	0,90
Medio	0,60	0,60	0,70	0,80
Malo	0,50	0,50	0,55	0,70

Tabla 18. Coeficientes de conservación. Fuente: Luminotecnia. Iluminación de Interiores y exteriores. D. Oriol Boix Aragonés. Departamento de Ingeniería Eléctrica de UPC. Septiembre de 1999. ISBN: 84-600-9647-5. <http://edison.upc.edu/curs.ilum>.

Para las lámparas de uso domestico se puede considerar que el mantenimiento es medio por lo siguiente:

- Las condiciones ambientales son menos limpias que en un mantenimiento bueno donde el aire es filtrado.
- Las luminarias no se limpian frecuentemente.
- Las lámparas se sustituyen solamente conforme se van fundiendo.
- *Número de lámparas y luminarias.* Para determinar el número de lámparas y luminarias se siguen los siguientes pasos:
 - Determinamos el flujo luminoso total necesario para la iluminación del local, que viene dado por [15]:

$$\Phi_{\text{total}} = \frac{E_m \cdot S}{Cu \cdot Cc}$$

donde:

Φ_{total} (lm): Flujo luminoso total en lúmenes.

E_m (lx): Nivel medio de iluminación necesario en el local.

S (m^2) = a·b: Superficie en planta del local.

Cu : Coeficiente de utilización del local.

Cc : Coeficiente de conservación de la lámpara.

- Determinamos el número necesario de luminarias (N_{lum}) en el local con la expresión:

$$N_{\text{lum}} = \frac{\Phi_{\text{total}}}{n_{\text{lum}} \cdot \Phi_{\text{lámpara}}}$$

donde:

$\Phi_{\text{lámpara}}$ (lm): Flujo luminoso producido por la lámpara.

n_{lum} : Número de lámparas dentro de una luminaria.

Se situará en el local un número de luminarias igual o inmediatamente superior al obtenido.

- Finalmente calculamos el número necesario de lámparas mediante la formula:

$$N_{\text{lámparas}} = N_{\text{lum}} \cdot n_{\text{lum}}$$

Normalmente interesa disponer muchas luminarias de no mucha potencia en lugar de pocas luminarias de mucha potencia, para conseguir así un adecuado coeficiente de uniformidad.

- *Nivel de iluminación final con el número de luminarias adoptado.* Viene dado por la expresión:

$$E_{\text{m-final}} = \frac{N_{\text{lum-final}} \cdot \Phi_{\text{lámpara}} \cdot n_{\text{lum}} \cdot Cu \cdot Cc}{S}$$

REFERENCIAS

[1] Andrés DJR. Curso de Iluminación. Luminotecnia. Universidad de Málaga. <http://exp-grafica.uma.es>.

[2] Espín EA, Aznar DF, Manzano ER, Espín MA. Luminotecnia Básica para Ingenieros. ISBN 978-84-92680-10-8;2009.

[3] Álamos HJA. Luminotecnia. Iluminación. Generalidades. www.elprisma.com.

[4] Martín SF. Manual Práctico de Iluminación. Magnitudes Luminosas Fundamentales. Unidades y Medidas. ISBN 84-87440-10-X;2005.

[5] Carrión RPM. Luminotecnia. El Color y la Luz. Universidad de Toledo.

[6] Foster R. Tipos de lámparas e Iluminación. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Capitulo 46. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. www.mtas.es.

[7] IDAE. Guía Técnica de la Iluminación Eficiente. Sector Residencial y Terciario. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid;2006.

[8] Electrónica Industrial, S.L. El Mundo de las Lámparas. www.silix.es.

[9] Martín SF. Manual Práctico de Iluminación. Luminarias. ISBN 84-87440-10-X;2005.

[10] IDAE. Aplicaciones Eficientes de Lámparas. Comité Español de Iluminación (CEI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Cuadernos de Eficiencia Energética en Iluminación nº 1;1996.

[11] IDAE. Aplicaciones Eficientes de Luminarias. Comité Español de Iluminación (CEI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Cuadernos de Eficiencia Energética en Iluminación nº 2;1996.

[12] Martín SF. Manual Práctico de Iluminación. Iluminación de Interiores. ISBN: 84-87440-10-X;2005.

[13] McGraw-Hill. Iberdrola. Ente Vasco de la Energía Técnicas y Aplicaciones de la Iluminación. 1ª edición.: Serie McGraw-Hill de Electrotecnologías.

[14] Ramírez VJ. Sistemas de Iluminación. Proyectos de Alumbrado. Ediciones CEAC. Enciclopedia CEAC de Electricidad. Barcelona 1974-1977.

[15] Boix AO. Luminotecnia. Iluminación de Interiores y exteriores.UPC. ISBN 84-600-9647-5. <http://edison.upc.edu//curs.ilum>;1999.

[16] Luminotecnia Arquitectónica y Urbana. LAU 611. <http://editorial.cda.ulpgc.es>.

OBJETIVOS

A lo largo de este apartado se exponen los objetivos, tanto generales como específicos que se han marcado para la presente tesis.

Como se ha señalado anteriormente, el importante volumen de construcción de edificios para uso residencial en los últimos años y el déficit en fuentes de energía convencionales justifican las actuaciones que tengan como objetivo conseguir la autosostenibilidad energética de los usos relacionados con la vivienda residencial. Las instalaciones fotovoltaicas integradas en los edificios puede ser una alternativa interesante para conseguirla.

El objetivo general de la investigación que aquí se plantea responde, en base a todo lo anteriormente expuesto, al *Uso de la energía solar fotovoltaica como fuente para el suministro de energía eléctrica en el sector residencial*. La finalidad de la investigación es a) obtener la capacidad energética de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red que se podrían ubicar en las cubiertas de los edificios b) desarrollar un modelo que permita conocer la evolución y comportamiento del consumo de energía eléctrica en el sector residencial relacionado con el uso final de iluminación c) determinar el porcentaje de energía eléctrica para uso lumínico que podría ser cubierto por la energía generada.

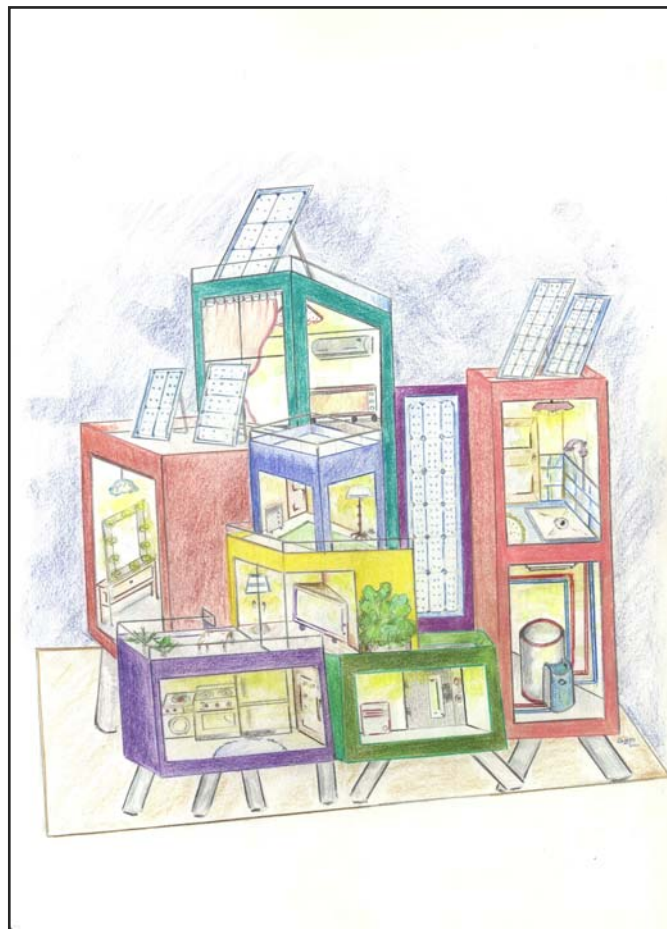
Los objetivos específicos de la investigación recogida en esta memoria de tesis son los siguientes:

- 1) Analizar el marco normativo que rige el proceso edificatorio en relación con el uso de la energía renovable estudiando la evolución en la implantación de distintas tecnologías relacionadas con la energía en los edificios.
- 2) Obtención de datos de radiación solar media diaria y horaria y de temperatura mediante la evaluación de un nuevo modelo para la determinación de la radiación solar media diaria y horaria teniendo como base la temperatura.
- 3) Calculo de la energía eléctrica generada por las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red ubicadas en las cubiertas de los edificios.

- 4) Diseño de un modelo para conocer la evolución y comportamiento del consumo de energía eléctrica en el sector residencial relacionado con el uso final de iluminación.

METODOLOGÍA

En relación con los objetivos específicos, señalados anteriormente, se han llevado a cabo diversas metodologías con el objeto de alcanzar dichos objetivos. En cada uno de los capítulos siguientes se desarrollan las mismas.



Capítulo II: Marco Normativo

THE USE OF SOLAR ENERGY IN THE BUILDINGS CONSTRUCTION SECTOR IN SPAIN

Javier Ordóñez García^a, Eulalia Jadraque Gago^a, Javier

Alegre Bayo^a, Germán Martínez Montes^b

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Department of Civil Engineering,
ETS de Ingenieros de Caminos, University of Granada, 18071 Granada, Spain

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Proyectos de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Civil,

ETS de Ingenieros de Caminos, University of Granada, 18071 Granada, Spain

Abstract

The recent commitment made by many countries to combat the harmful effects of fossil fuel energy has centered world attention on the implementation of policies geared towards an optimal energy performance and the use of renewable energies. The construction of buildings with sustainable energy systems necessarily plays an important role in such policies, given the fact that in 2005 more than 800,000 housing units were constructed in Spain, a country with more than 2500 h of sunlight per year. This article reviews the European and Spanish legislation regarding construction and renewable energies. Within this context, a description and analysis are given of the progress made by the construction sector in the implementation of new energy-related technologies with special emphasis on solar energy. ©2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Solar energy; Construction sector; Building

1 INTRODUCTION

In the last five years there has been a spectacular construction boom in Spain. According to the National Association of Architects,¹ the number of new housing units in this period has doubled, going from 400,000 in 2000 to a record 800,000 in 2005. Because of its geographic location, Spain has over 2500 h of sunlight per year, and is the European country with the third highest quantity of photovoltaic power, amounting to 11.7 MWp in 2004. However, when it comes to using solar energy for domestic activities such as heating water, Spain lags farther behind, only ranking eighth. This fact is significant because domestic energy use is intimately related to the construction sector [1]. Spain's low ranking here means that the country still has a long way to go to fully benefit from this type of energy, and that greater use should be made of solar power in the design and construction of houses. It is our assertion that in a national context in which there is a record-breaking number of new housing units built every year, it is crucial to see exactly how the issue of energy supply is presently being dealt with. The construction boom in Spain also comes at a time when an increasing number of voices are being raised in favor of the development and construction of sustainable housing [2]. There are a wide range of possible measures that could be taken to foment the use of renewable energies [3]. One possibility would be to oblige architects and developers to include a set of minimum requirements for efficient energy use in the project designs of new buildings, as well as to inform the purchaser and/or client of the contents of European Directive 2002/91/EC on the Energy Performance of Buildings [4].

In this article, we analyze European and Spanish legislation that regulates the use of renewable energy in the construction of housing developments. We emphasize the fact that the legislative framework regarding construction will soon experience significant modification in the near future with the passing of the *Código Técnico de la Edificación*² (CTE). The purpose of our study is to review the European and Spanish legislation concerning construction and renewable energies [5], as well as to describe the progress made by the construction sector in the implementation of new energy-related technologies with special emphasis on the use of solar energy.

¹ In Spain this type of professional association is known as the *Colegio de Arquitectos*.

² Technical Building Code.

2 SOLAR ENERGY IN SPAIN

Spain is located in the south eastern part of Europe (see Fig. 1). More specifically, it is situated in the temperate zone between latitudes 43°47'24'' N (Estaca de Bares) and 36°00'3'' S (Punta de Tarifa); and between longitudes 7°00'29'' E (Cape Creus) and 5°36'40'' W (Cape Touriñan). It has a surface area of 580,850 km².



Fig. 1. The geographic location of Spain on the European continent.

To the north, it is bordered by the Cantabrian Sea, France, and Andorra; to the east, by the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean; to the south, by the Atlantic Ocean; and to the west, by the Atlantic Ocean and Portugal. Although Spain is located in a temperate zone, it has the following climate distribution [6] (see Fig. 2):

- *Oceanic climate*: Galicia and the Cantabrian coastline. These areas have mild temperatures and abundant rainfall.
- *Mediterranean climate*: the Mediterranean coastline. This climate is characterized by hot, dry summers, little rainfall, and mild winters. Rainfall is generally more frequent in spring and autumn, when a cold air pool may occur, resulting in intense torrential rains. Periods of drought alternate with periods of abundant precipitation.

- *Highland climate*: the Pyrenees, the *Sistema Central*³ and the Penibetic Mountain Range. Winters are long and cold with abundant rainfall.
- *Continental climate*: the interior of the Iberian Peninsula. This area has cold winters and hot summers because of its distance from the coastline. Storms frequently occur during the summer months.
- *Subtropical climate*: the Canary Islands. The temperatures are mild throughout the year with relatively low levels of precipitation.

Thanks to its geographic location and climate, Spain is in a privileged position in comparison to other European countries since each square meter of its surface area receives 1500 kWh of energy. This figure is similar to that of many Central and South American countries. In fact, in various areas of Spain, there are over 2500 h of sunlight per year [7] (see Fig. 3).



Fig. 2. Climate distribution in Spain.

From the beginning of civilization, men have resorted to bioclimatic architectural methods to significantly reduce and even eliminate the need to artificially heat/cool their homes and light them during the day. With a view to taking greater advantage of sunlight, they would design houses whose windows, doors, balconies, facades, and patios faced the south. They would build glassed-in porches and huge fireplaces to light inside areas. They would whitewash door and window frames to enhance the sensation

³ Mountain range on the Iberian Peninsula, consisting of several smaller mountain ranges, which is a primary feature of the Iberian plateau (*Meseta Central*).

3 LEGISLATION REGARDING CONSTRUCTION

3.1 Europe

In order to promote and encourage the use of solar energy, in December 1997 the European Union passed the *White Paper for a Community Strategy and Action Plan. Energy for the Future: Renewable Sources of Energy*, and proposed as an objective for 2010 that renewable energies supply 12% of the primary energy demands of the European Union [10].

The European Union Green Paper entitled *Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply*, specifically states that one of its priorities is the integration of renewable energies in new constructions through regulations obliging heating and air cooling systems to necessarily depend on these energy sources [11].

In the case of solar thermal energy, the EU White Paper seeks to increase the number of sensors from 6.5 square meters in 1995 to 100 million square meters in 2010 [12]. The purpose of European directive 2002/91/CE is to encourage the use of solar photovoltaic and thermal renewable energies [13]. In this sense, important considerations are external climatic conditions and local characteristics as well as the environmental requirements and the cost-efficiency relation. One of the major objectives here is to improve the energy performance of buildings since such structures have a significant long-term impact on energy consumption (heating and air cooling systems, water heating, and electricity) [14].

3.2 Spain

Legislation regarding construction has experienced important changes since the passing in 2002 of the European Directive on Energy Performance, 2002/91/CE and its transposition to Spanish law at the end of 2005 [14].

The plan to encourage the use of renewable energies has the same global objective as the European Union in its *White Paper on Renewable Energies*, which states that at least 12% of the total energy demand in Spain should be covered by renewable energy sources [15].

The *Ley de Ordenación de la Edificación*, Law 38/1999⁴ of November 5, 1999 establishes three sections of basic demands, which refer to the functionality, safety, and habitability of buildings. The habitability section regulates the economical use of energy and thermal insulation with a view to achieving rational energy use for the optimal functionality of buildings. This means reducing energy consumption to sustainable levels, and having at least a portion of this consumption come from renewable energy sources [16].

Within this context, there are new regulations which regard the following [14]:

- Minimum requirements of energy performance regarding illumination, soundproofing, insulation, heating, air condition, and sanitary hot water in buildings.
- Energy certification for buildings.
- Use of solar photovoltaic and thermal renewable energy.

The legal measures taken in Spain in response to these new demands are specified in the following laws:

(1) The CTE⁵ that defines and establishes the basic requisites for safety and habitability that should be fulfilled by buildings, and which stipulates the requirements that must be complied with in the project design, construction, use, maintenance, and conservation of buildings with a view to enhancing their quality, guaranteeing the health and safety of occupants, and protecting the environment in the immediate surroundings [17].

This code establishes the following set of objectives

- To limit energy demands through the optimization of building designs, taking into account all the techniques of bioclimatic architecture and passive solar energy. For the first time the CTE also includes energy performance criteria for lighting consumption.
- To improve the performance of heating systems through the incorporation of inspections and audits of such installations, and providing solutions to make them more efficient.
- To incorporate solar thermal energy for sanitary hot water. For new buildings this will be obligatory. Depending on the climate zones, between 30% and 70% of the energy demand for sanitary hot water should come from solar energy.

⁴ Law of Building Organization.

⁵ Technical Building Code.

- To implement solar photovoltaic energy in building complexes with high energy consumption. Consequently, solar photovoltaic panels will be obligatory in hotels and hospitals (>100 occupants or beds), multimedia centers (>3000 m²), office buildings (4000 m²), hypermarkets (>5000 m²) and fair pavilions (>10,000 m²). This means installing power between 6.25 and 62.5 kWp. Moreover, all installations of up to 100 kW will be included in the current power rates of 0.4 euros/kW h. (Previously, this was only applicable to installations of up to 5 kW.)

(2) The *Plan de Fomento de las Energías Renovables*⁶ (PFER) [18] describes the principal elements and guidelines that can be considered relevant in designing a strategy so that the growth of renewable energies as a whole can cover at least 12% of all primary consumption by 2010. However, this objective can only be reached if a greater percentage of such energies is used in buildings, and more specifically, in their heating systems, where energy consumption is the highest. The *Reglamento de Instalaciones Térmicas*⁷ (RITE) and its *Instrucciones Técnicas Complementarias*⁸ (ITE) establish the requirements for heating systems in buildings. These regulations are in response to the public demand for thermal comfort and hygiene in heating, cooling, and sanitary hot water systems. The objective of these regulations is to promote a more rational level of energy consumption for economic as well as environmental reasons. In a parallel way, other considerations to be taken into account are the basic construction and design requirements for buildings. In the interest of economic viability, all of these factors must be maintained during an important part of the useful life of the structure [19].

These regulations are divided into two sections. The first section includes the RITE and the ITE. The second section, which is basically informative, is an annex of relevant documents for reference purposes. The following is a summary of the ITEs that explicitly mention renewable energies:

- *ITE 02.4.1. Design. Heating and cooling systems. General description:* According to this document, the choice of a heating and cooling system makes it necessary to examine the possibility of using subsystems of energy conservation and recovery as well as the exploitation of free/renewable energies.

⁶ Plan to promote renewable energies.

⁷ Regulations for thermal systems.

⁸ Complementary technical instructions.

- *ITE 02.4.12. Design. Heating and cooling systems. Electric Energy:* According to this document, in both residential and government buildings that use electrical energy by the Joule effect for heating, the global transmission coefficient of the building (K_G) should not be greater than the boundary value established for this energy source. This would be the case for buildings without heating or which are heated with electrical energy by the Joule effect, as stated in regulation NBE-CT concerning heating systems in buildings [20]. Premises excluded from this requisite, and which thus must comply with the conditions set out in case I (solid, liquid or gaseous fuels) are those using residual or free energy sources as well as electrical energy as an auxiliary energy source as long as the annual coverage of the residual/free energy source is more than two-thirds.

- *ITE 02.5.4. Design. Central production of sanitary hot water. Use of electrical energy for the production of sanitary hot water:* The use of *electrical energy for sanitary water heating* through the Joule effect in central sanitary hot water systems is permitted when it is used as a support for residual/free energy sources, and always as long as these sources cover more than two-thirds of the total energy demand.

- *ITE 04.9.1. Equipment and Materials. Boilers. General conditions:* According to this document, boilers not subject to *Real Decreto*⁹ 275/1995 are those that run on solid, liquid and gaseous fuels, with characteristics or specifications that differ from those fuels generally sold, and which are derived from the recovery of effluents, side products or waste matter, whose combustion is not affected by environmental impact limitations (e.g. waste gas, bio-gas, biomass, etc.).

- The RITE includes as a novelty an *ITE 10.1*, entitled *Producción de ACS mediante sistemas solares activos*,¹⁰ which specifically refers to low-temperature flat solar energy collectors for the heating of sanitary hot water installed at the building site.

- *ITE 10.2. Specific installations. Swimming pools:* According to these regulations, openair swimming pools can only use waste/free, energy sources like solar energy for heating water.

(3) The creation of an Energy Certification for Buildings [21]. The *Energy Performance Certification* of a building is a certificate recognized by the State or a person designated by the State who verifies that the building is energy efficient on the

⁹ A national law in Spain is known as a royal decree [*Real Decreto (R.D.)*].

¹⁰ Production of ACS with active solar energy systems.

basis of calculations established according to a specific methodology. When buildings are constructed, sold, or rented, this certificate with a validity of up to 10 years is made available to the owner or purchaser of the building by the former owner. This certificate gives objective information regarding the energy characteristics of the building to possible buyers or users. Consequently, it is conducive to greater transparency in real estate development and foment investments in energy-saving techniques.

4 METHODOLOGY

In order to carry out our study, we compiled statistics from 1996, which were obtained from the *Dirección General de Programación Económica de la Secretaría de Estado de Infraestructuras*,¹¹ an agency that depends on the *Ministerio de Fomento* or the Spanish Ministry of Public Works and Economy. The role of this Ministry in Spain is to propose and implement government policies concerning land, sea, and air transportation as well as their control, organization and regulation, the administration of postal and telegraphic services, the guidance and management of national agencies related to astronomy, geodetics, geophysics and cartography, and finally the planning and organization of all investments related to these areas [22].

The data for this study was obtained by using a questionnaire, on the basis of the construction licenses granted by the city halls. For the construction of new buildings, a license is necessary. Such a license can only be obtained by presenting the project design of the new building, which must be signed by the architect. Consequently, this is an administrative procedure that gives privileged information regarding the number and characteristics of buildings as well as the type of housing units that this construction generates [22].

The focus of this study is on residential buildings in construction. For our purposes, a *residential building* is defined as any permanent, separate, independent structure whose main purpose is to be occupied by people on a continuous basis (at least 50% of its useful surface with the exclusion of its ground floor and basement). A *house* is defined as an enclosed space or a set of various rooms and annexes that may occupy the entire surface of a building (one-family house) or part of a building, which in this case would be structurally separate and independent from the rest. A house is designed to be

¹¹ Government Office of Economic Planning of the Secretariat of Infrastructure.

occupied by people, generally families of one or various members, and can be directly accessed from the public highway or from shared neighborhood spaces.

In Spain the *Ministerio de Fomento* collects data on a monthly basis for the whole country. The treatment of the response “no answer given” on certain questionnaires is handled by stratifying city halls in provinces by calculating expansion coefficients based on the city population and the number of licenses granted. The formula used is the following:

$$C_{ij} = P_{ij}/p_{ij} \cdot L_{ij}/l_{ij},$$

where C_{ij} is the elevation coefficient of stratum i in province j , P_{ij} , the population of the towns of stratum i in province j , p_{ij} , the population of the towns of stratum i in province j that have answered the questionnaire, L_{ij} , the number of licenses granted in stratum i in province j , l_{ij} , the number of licenses of stratum i in province j with questionnaires. This expansion coefficient uses the first factor P_{ij}/p_{ij} to correct the refusal to answer, and L_{ij}/l_{ij} to correct the non-completion of questionnaires. In order to obtain the final results, questionnaires of each stratum-province are added up, and the resulting figure is multiplied by the coefficient. The size of the sample (i.e. the minimum number of towns that should be received from each stratum (n)), will depend on the total number of towns (N), the desired confidence level (K), the variability of the licenses granted (s), and the absolute error assumed for these licenses (e).

The formula used is the following:

$$n = N^2 K^2 S^2 / (e^2 + NK^2 S^2).$$

5 RESULTS

The evolution of the number of housing units in Spain has undergone a spectacular increase in the last decade. During 1980–1997 an average of 287,000 houses were built each year [23]. From 1998, the number of houses constructed soared to over 400,000 a year (see Fig. 4).

There is currently a great risk of environmental degradation due to population increase, resource consumption, industrial activity, etc. This situation causes a series of problems such as acid rain or the hole in the ozone layer. Some of these problems are

directly related to substances sent into the atmosphere as a consequence of fossil fuel combustion or CFCs from air conditioning and cooling systems. Various authors suggest the use of renewable energies as a possible solution for such problems [24].

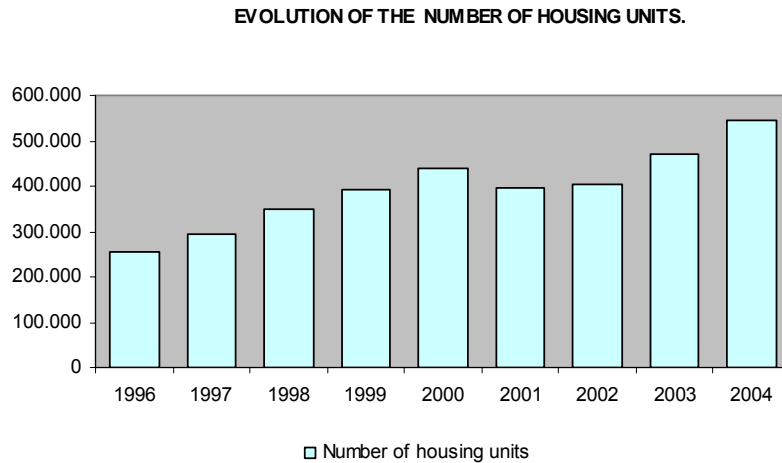


Fig. 4. Number of houses constructed in Spain. Data obtained from the *Ministerio de Fomento*.

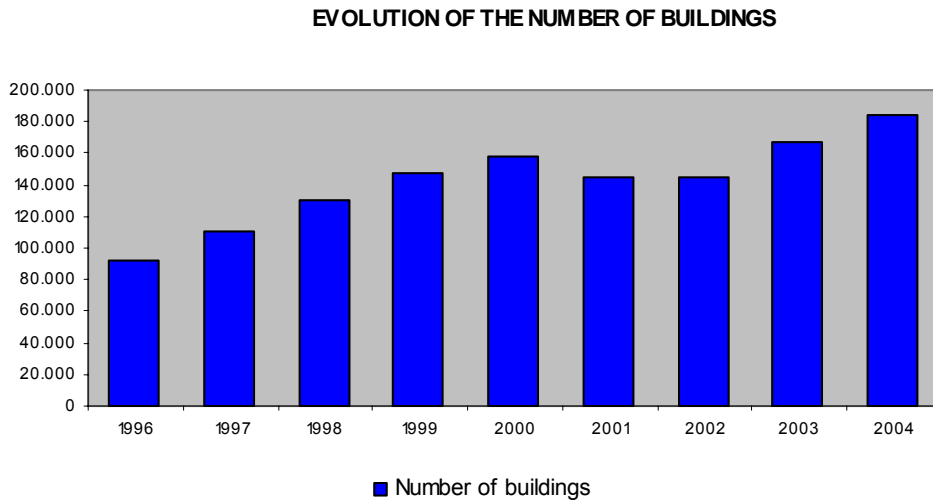


Fig. 5. Number of buildings. Data provided by the *Ministerio de Fomento*.

On the basis of the data obtained, we show the evolution of the number of buildings constructed in Spain, which has followed a progression similar to the number of housing units (see Fig. 5). This is due to the fact that the proportion of different types of houses (one-family houses, semi-detached house, and housing complex) is remarkably similar over this time period within the national context.

During this period, it is surprising what little use has been made of renewable energies in the construction sector. The data collected shows the number of buildings and the different types of energies employed: electricity, natural gas, liquid petroleum gas (LPG), and solar energy (see Fig. 6).

During the past decade, the total number of buildings with solar energy systems only reached 2.5%. Solar energy systems began appearing in new houses in 1996, and is now becoming increasingly more frequent (see Fig. 7). In 2004 the number of houses with this type of energy was 23,249 in contrast to 256 houses with this energy system in 1996.

If we compare annual variations of the different types of energy installed in buildings, we obtain the percentage of buildings per year that use a specific energy source (see Figs. 7, 8).

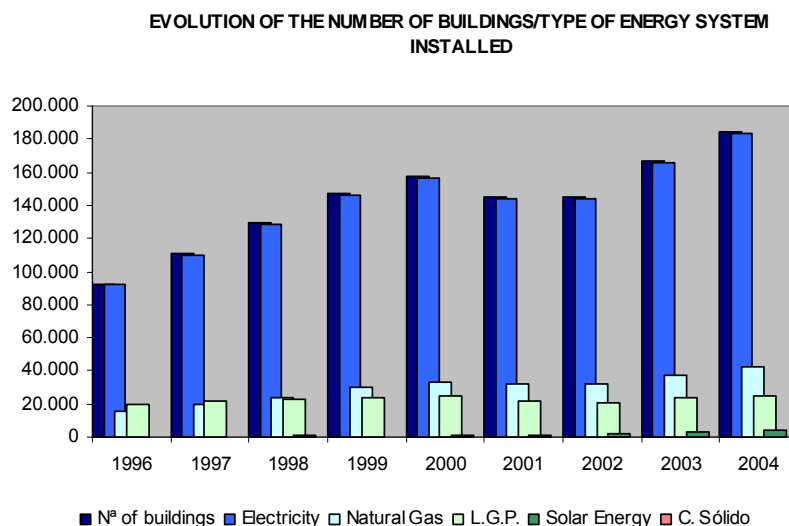


Fig. 6. Evolution of the number of buildings/type of energy system installed. Data obtained from the *Ministerio de Fomento*.

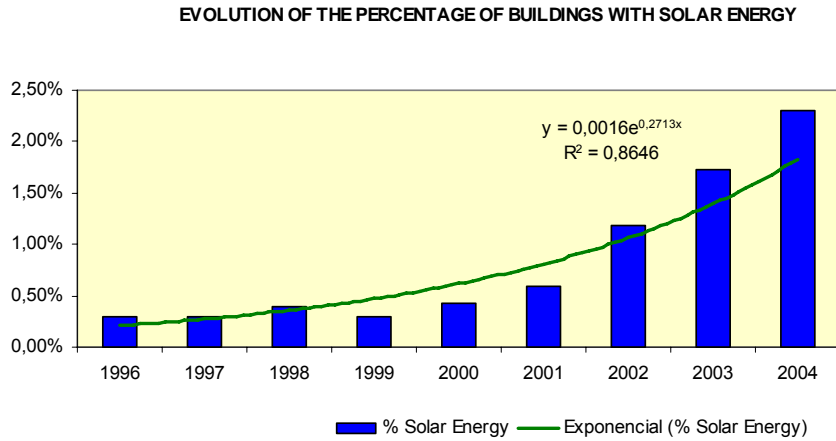


Fig. 7. Percentage (%) of buildings with solar energy.

The graph shows that there has been a relative decrease in the number of buildings with energy systems fuelled by LPG. In contrast, there has been an important increase in the number of buildings that have installed natural gas and solar energy. The installation of systems using solid and liquid fuel remains constant.

The tendency curve over the last four years shows the progressive implementation of solar energy systems in residential buildings. As reflected in the graph, the number of buildings with this technology went from 0.3% to 2.4% in four years, which means a constant annual increase of 0.53 (see Fig. 9).

6 CONCLUSIONS

Spain is presently experiencing a spectacular construction boom. The number of new houses built reaches new records each year. However, despite the fact that the country has an annual average of 2515 h of sunlight, relatively little use has been made so far of the possibilities offered by solar energy systems in buildings.

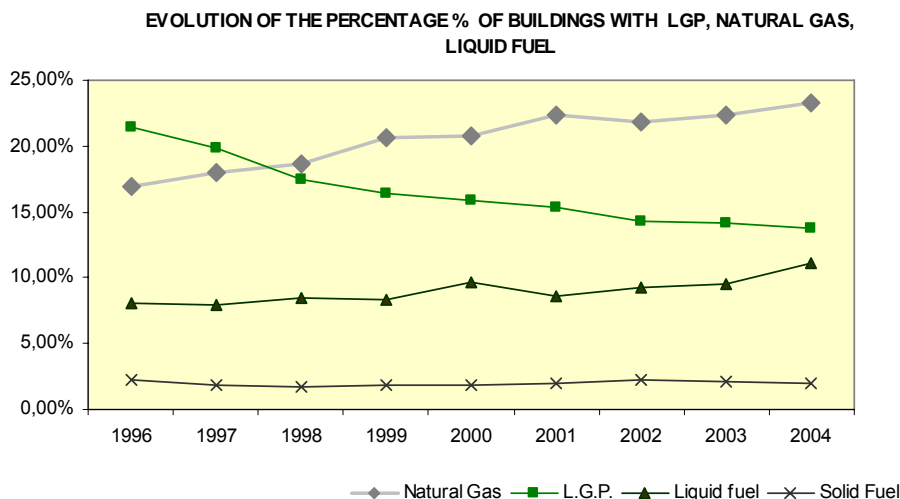


Fig. 8. Percentage (%) of buildings with different types of energy installed.

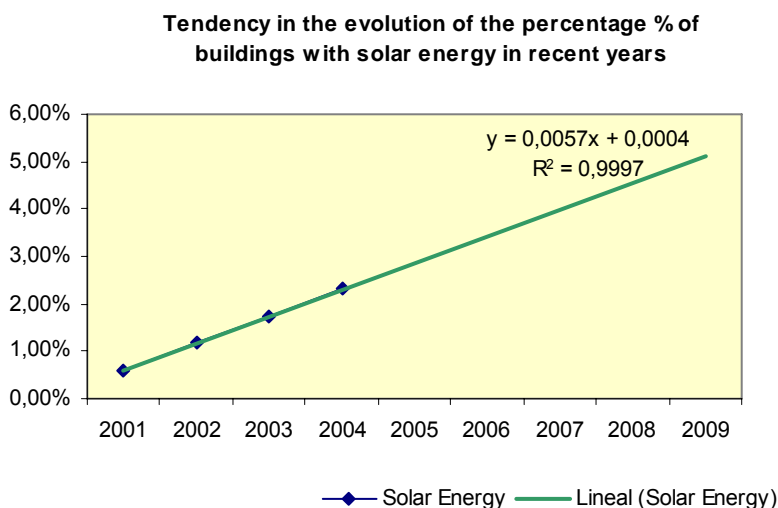


Fig. 9. Presence of solar energy in the construction sector.

In our opinion, the authorities have wasted too many years, and have thus lost an historic opportunity to foment and encourage the use of solar energy. Even though solar energy systems are gradually becoming more frequent in contrast to fossil fuel systems, whose growth rate was very low and even decreased in some cases, there is still much to be done.

The data collected in our study shows that although the use of solar energy is gradually on the upswing, recourse to this energy source is still infrequent. This signifies the urgent need for specific legal measures and government actions that will subsidize and/or require the use of this technology in order to encourage its use in new buildings.

REFERENCES

- [1] Photovoltaic Barometer, EurObserver; April 2005.
- [2] Halliday S. Sustainable construction. UK: Butterworth-Heinemann; 2005.
- [3] Martinez G, Serrano MM, Rubio MC, Menendez A. An overview of renewable energy in Spain. The small hydro-power case. *Renew Sustain Energy Rev* 2005;9:521–34.
- [4] Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana empresa. Ministerio de Economía. Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004–2012. Sector Edificación; 2003.
- [5] Jäger-Waldau A, Ossenbrik H. Progress of electricity from biomass, wind and photovoltaics in European Union. *Renew Sustain Energy Rev* 2004;8:57–82.
- [6] www.esi.unav.es. Escuela Superior de Ingenieros. Campus Tecnológico, University of Navarra, Spain.
- [7] www.censolar.es. Centros de Estudio de la Energía Solar.
- [8] Cañas I, Martín S. Recovery of Spanish vernacular construction as a modelo f bioclimatic architecture. *Build Environ* 2004;39:477–95.
- [9] Greenpeace. Guía solar. Como disponer de energía solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica; 2005.
- [10] Orden de 5 abril de 2000, por el que se hacen públicas las normas reguladoras de la concesión de ayudas del Programa Andaluz de promoción de instalaciones de energías renovables (PROSOL) para el periodo 2000–2006. BOJA, 11 May, 2000.
- [11] European Union. Green paper: towards a European strategy for the security of energy supply. 2000. p. 769.
- [12] European Union. White paper for a community strategy and action plan. Energy for the future: renewable sources of energy; 2000.
- [13] Ackermann T, Andersson G, Söder L. Overview of government and market driven programs for the promotion of renewable power generation. *Renew Energy* 2001;22(1–3):97–204.
- [14] European Directive 2002/91/EC on the Energy Performance of Buildings.
- [15] Ramos A, Hontoria E, Moreno B, Zamorano M. Solar energy in Andalusia (Spain): present state and prospects for the future. *Renew Sustain Energy Rev* 2005;1–14, in press, doi:10.1016/j.rser.2004.12.009.

[16] Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. BOE no. 266, 6 November, 1999. p. 38925–34.

[17] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Ahorro de energía, November, 2003.

[18] Plan de Fomento de las Energías Renovables, 2000–2010.

[19] REAL DECRETO 1218/2002, de 22 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprobó el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios. BOE no. 289, 3 December, 2002.

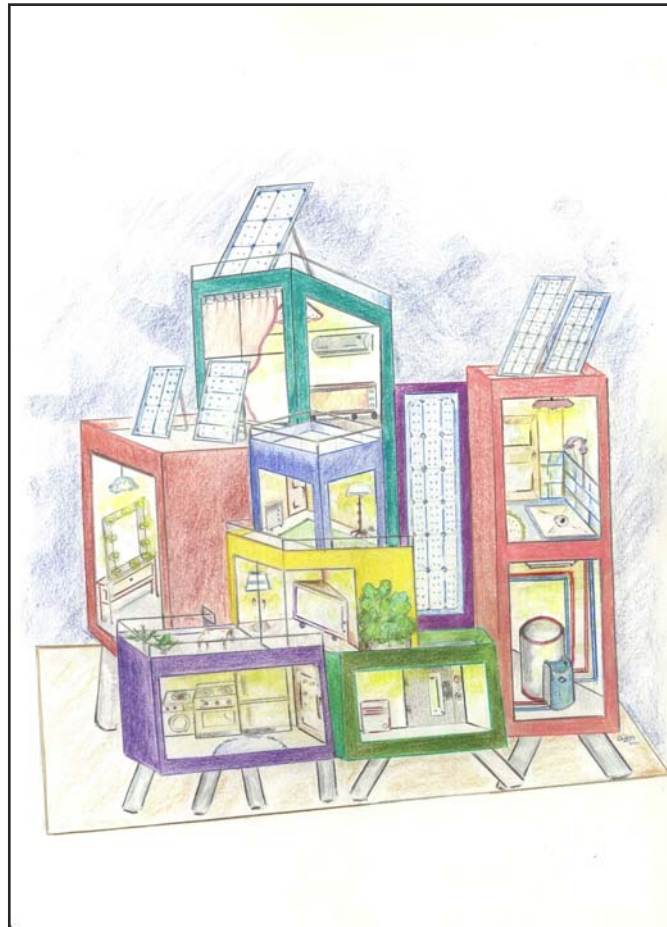
[20] REAL DECRETO 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBECT-79. Condiciones térmicas en los edificios.

[21] Documento de Bases para la Revisión del RITE. Version 10/10/2003 (Document passed by the permanent subcommittee of the Advisory Committee on heating systems in buildings), Ministerio de Economía, Ministerio de Fomento.

[22] REAL DECRETO 1476/2004, de 18 de julio por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Fomento. BOE no. 148, 19 July, 2004.

[23] García-Montalvo J, Mas M. La vivienda y el sector de la construcción en España, Editorial CAM; 2000.

[24] Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renew Sustain Energy Rev* 2000;4:57–75.



Capítulo III: Modelos de Descomposición para la Irradiancia Horaria y la Temperatura

INTER-RELATIONSHIP BETWEEN MEAN-DAILY IRRADIATION AND TEMPERATURE, AND DECOMPOSITION MODELS FOR HOURLY IRRADIATION AND TEMPERATURE

E J Gago**, S Etxebarria*, Y Tham*, Y Aldali* and T Muneer*

*School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh Napier University, UK

** Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain

Abstract

Terrestrial temperature records have existed for centuries. These records are available for very many locations. Temperature is indeed the most widely measured meteorological parameter. In contrast, solar radiation being a parameter of secondary importance and also in view of the excessive measurement cost and the associated due care, it is recorded very infrequently. This article presents evaluation of a new type of model for mean-daily and hourly solar radiation based on temperature. The proposed model is of a very simple constitution and does not require any secondary meteorological parameters as required by other group of models that are available in literature. Furthermore, hourly temperature models are also presented that only require mean-daily temperature data.

A comparison was undertaken regarding the performance of the presently proposed- and previous models. It was found that the present models are able to provide reliable irradiation and hourly temperature estimates with a good accuracy.

Keywords: Solar radiation, solar energy, solar radiation regression models

1 INTRODUCTION

Solar radiation and daylight are essential to life on earth. Solar radiation affects the earth's weather processes which determine the natural environment. Its presence at the earth's surface is necessary for the provision of food for mankind. Thus it is important to be able to understand the physics of solar radiation and in particular to determine the amount of energy intercepted by the earth's surface. The understanding of the climatological study of radiation is however comparatively new. Until 2010 there were only three stations in northwest Europe with irradiation records exceeding an 85-year period. In the UK it was only in the 1950s that the Meteorological Office installed Kipp solarimeters. In contrast, however, temperature has been recorded the world over at very many locations and for a much longer period, e.g. the oldest records for temperature for Central England have existed since 1659! In India, to give another example, the number of sites with temperature records is 161, but only 18 stations measure irradiation. Likewise, respectively, in Malaysia and Spain there exist 41 and 113 stations that measure temperature, but only 9 and 33 stations record irradiation. Table 1 provides information on the start dates for temperature records for England. It has also been pointed out by Thorton and Running [1] and Rivington *et al* [2] that even in the most developed countries such as the USA and Britain the landmass area covered by solar radiation network is $< 1\%$. Globally this figure is much worse. Solar irradiation availability of arbitrary surfaces is a prerequisite in many sciences. For example, agricultural meteorology, photobiology, animal husbandry, daylighting, comfort air-conditioning, building sciences and solar energy utilization, all require this information. In agricultural meteorology, the importance of net radiation in determining crop evaporation is well documented. It has been suggested that in the annual enthalpy of evaporation from short grass is equal to the annual net radiation. A similar case occurs on a daily basis. Net radiation is also required in estimating the heating coefficient of a field, which is a key index for soil germination temperature. The effects of solar radiation are also of interest in the breeding of cattle and other livestock. It is usually the major factor limiting the distribution of stock in the tropics. The heat load on an animal is the result of solar irradiation and in some cases, its magnitude could be several times the animal's normal heat production.

Year	Parameter recorded
1659	Monthly-mean temperature
1772	Daily-mean temperature
1878	Daily- and monthly-mean, maximum and minimum temperature

Table 1. Start dates for temperature measurement for Central England.

Month	Air temperature (°C)	Daily solar radiation - horizontal (kW·h/m ² /d)
January	2.4	2.03
February	4.0	2.96
March	7.9	4.29
April	10.7	5.11
May	15.8	5.95
June	21.6	7.09
July	24.8	7.20
August	24.0	6.34
September	19.3	4.87
October	13.3	3.13
November	7.1	2.13
December	3.6	1.70

Table 2. Monthly-mean solar radiation and temperature for Madrid (40.38 N, 3.78 W). Source: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca>.

For most of the above applications monthly averaged or daily solar radiation data is adequate. The worldwide use of energy is rising by 2.5% a year, most of which is attributable to the accelerated consumption in the developed and now developing countries. It has been estimated that from a sustainability viewpoint, the developed countries will have to cut their use of energy by a factor of 10 within a generation. Proponents of solar energy have gone to the extent that they are calling for a complete substitution of conventional sources of energy with renewables. Their thesis is that the use of fossil fuels for energy production, even in minor quantities would merely postpone the collapse of the global environment. The past three decades have seen a boom in the construction of energy efficient buildings which use solar architectural features to maximise the exploitation of daylight, solar heat, solar-driven ventilation and solar PV electricity. These applications require hourly solar radiation and temperature data. In most areas of the world, especially in the developing countries, solar radiation measurements are not easily available due to the excessive cost and effort that is

involved. Air temperatures, on the contrary, are routinely measured at most meteorological stations. As will be shown in the Section 2, NASA provides a useful resource in terms of satellite observed data for monthly irradiation and temperature. There is, however, a need to break down the daily data into the respective hourly components, as there is a significant swing of hourly temperature within any given day.

Day	Tmean	Tmax	Tmin
1	17.8	23.2	12.0
2	17.5	23.3	10.0
3	11.1	15.7	8.0
4	9.1	13.5	3.0
5	10.8	17.4	1.0
6	12.5	18.3	2.0
7	12.6	19.3	7.0
8	11.9	17.0	7.0
9	13.4	17.0	10.0
10	12.9	17.0	9.0
11	12.7	17.4	6.4
12	11.7	16.6	9.0
13	9.3	14.4	6.0
14	9.9	14.0	4.5
15	11.4	16.8	5.6
16	14.7	21.3	5.8
17	18.0	25.2	6.8
18	20.7	27.5	10.5
19	22.0	28.2	11.6
20	20.0	26.4	12.0
21	22.4	28.6	13.0
22	23.4	29.7	14.5
23	23.1	29.7	15.0
24	22.1	28.6	15.0
25	19.3	24.4	14.6
26	19.6	24.3	13.0
27	19.8	24.0	13.5
28	18.1	23.0	12.4
29	21.3	27.3	11.0
30	25.0	30.5	14.0
31	26.5	34.0	16.0

Table 3. Sample of the TUTIEMPO data set for Madrid (40.38 N, 3.78 W) for May 2010. Source: www.TuTiempo.net.

The initial research related to solar radiation carried out by Angstrom [3] and others was concerned with the relationship between irradiation and the sunshine duration. Since then research in this field has come a long way. Today, a considerable amount of information is available on mathematical models that relate solar radiation to other meteorological parameters such as temperature, cloud-cover, rain amount, humidity and

even visibility. However, as pointed out above, the parameter that has the largest measurement network is the ambient temperature. The aim of this work is to investigate the inter-relationship between:

- mean-daily solar radiation and mean, maximum and minimum temperature;
- daily mean, maximum and minimum temperature; and
- hourly temperature and the corresponding mean-daily maximum and minimum temperature.

2 PRESENTLY AVAILABLE INFORMATION

There are two reliable sources that provide information on the two of the most basic meteorological parameters: monthly mean temperature and solar radiation. These sources are the NASA website <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca> and TUTIEMPO that is maintained by <http://www.tutiempo.net/en/>. NASA has produced a grid map of the world with information available for any given latitude and longitude. The solar radiation data is an estimate that has been produced from satellite-based scans of terrestrial cloud-cover. Typical tabulated information that may be downloaded from this source is shown in Table 2. Note that NASA does not provide the mean-daily maximum and minimum temperature. TUTIEMPO on the other hand provides daily mean, maximum and minimum temperature data for any given location. The data is based on measurements carried out by a wide network of meteorological stations and hence this latter data are more reliable. One of the subtasks of this work is also to check the reliability of the NASA temperature records by comparing them against the TUTIEMPO set. Table 3 presents a sample of the TUTIEMPO data set. Note that the NASA data is available on a mean-monthly basis, whereas the latter data are downloadable on a day-by-day basis. Thus by extension of the present work, one may obtain irradiation estimates for daily irradiation using the TUTIEMPO data. The present article deals with mean-monthly estimates.

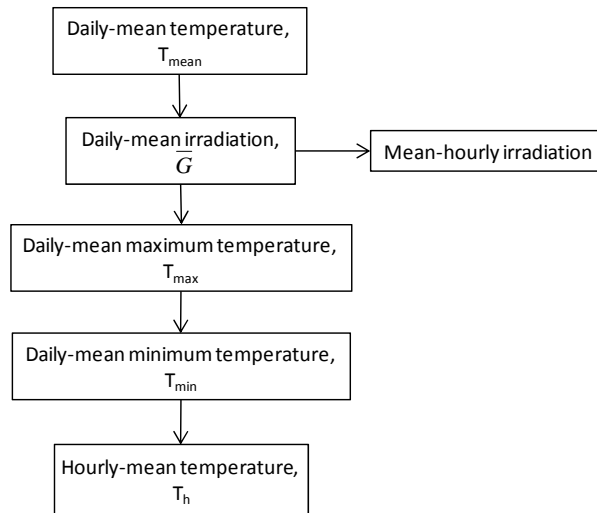


Figure 1. Flow diagram for obtaining hourly solar irradiation and temperature from mean-daily temperature.

This section is concluded by pointing out two things that qualify this study, i.e. (i) NASA data is based on satellite observations that represent inferred values of irradiation. In contrast, TuTiempo provides ground-*measured* data for temperature. Hence, if reliable regressions are available between irradiation and mean temperature then the latter data may be used to obtain more realistic estimates of irradiation. (ii) TuTiempo provides mean-minimum and maximum temperatures. Those can be used to decompose daily to hourly temperatures.

3 PREVIOUS WORK

As mentioned above solar radiation can be estimated by means of empirical relations using other available meteorological observations such as (a) mean-daily sunshine duration, (b) cloud-cover, (c) ambient temperature along with precipitation and/or humidity or (d) ambient temperature as the sole regressor. An exhaustive review of the above methods is available in standard references [4-6]. In this article, effort has been concentrated on models that exclusively deal with ambient temperature as the sole predictor or regressor and as such models dealing with other meteorological parameters are not dealt here. The theme of the present work stems from the logic that temperature records have existed for a very long time and also the measurement network is indeed very wide. Hence an irradiation model of the type that is presently proposed would be of benefit, particularly for those in the developing countries where there is a dearth of measured irradiation data.

Location	Latitude	Longitude	Altitude
Accra	5.60	-0.16	68
Georgetown	6.50	-58.25	29
Con Son	8.68	106.58	9
Juan Santamaria	9.98	-84.21	920
Barcelona. V	10.11	-64.68	7
Cartagena	10.45	-75.51	1
Caracas	10.60	-66.98	43
Babanusa	11.33	27.81	453
Phnom-Penh	11.55	104.85	10
Madras	13.00	80.18	10
Bangkok	13.66	100.56	4
San Salvador	13.70	-89.11	616
La Esperanza	14.31	-88.16	1,100
Guatemala	14.58	-90.51	1,489
Sanaa	15.51	44.20	2,206
Abbs	16.08	43.16	2,000
Timbuktu	16.71	-3.00	263
Acapulco	16.83	-99.93	28
Mexico	19.43	-99.10	2,238
Akola	20.70	77.03	282

0-20

Location	Latitude	Longitude	Altitude
Makkah	21.43	39.83	310
Aswan	23.96	32.78	200
Kufra	24.21	23.30	417
Riyadh	24.70	46.71	635
Manama	26.26	50.65	2
Asyut	27.05	31.01	226
I-n-Salah	27.23	2.46	269
Cairo	30.13	31.40	64
Tripoli	32.66	13.15	80
Palmyra	34.55	38.30	408
Aleppo	36.18	37.21	393
Tunis	36.83	10.23	3
Faro	37.01	-7.96	7
Seville	37.41	-5.90	34
Izmir	38.26	27.15	125
Alicante	38.28	-0.55	43
Philadelphia	39.86	-75.23	6
Ankara	39.95	32.88	891
Madrid	40.38	-3.78	690
Istanbul	40.96	28.81	48

20-40

Location	Latitude	Longitude	Altitude	
Barcelona	41.28	2.06	4	40-60
Rome	41.95	12.50	18	
Sofia	42.65	23.38	586	
Sapporo	43.06	141.33	26	
Varna	43.20	27.91	41	
San Sebastian	43.35	-1.80	5	
Cannes	43.53	6.95	3	
Toulouse	43.63	1.36	152	
Florence	43.80	11.20	40	
Bologna	44.53	11.30	36	
Milan	45.43	9.28	107	
Timisoara	45.76	21.25	86	
Odessa	46.43	30.76	42	
Quebec	46.80	-71.38	70	
Graz	47.00	15.43	340	
Budapest	47.43	19.26	151	
London	51.51	-0.11	5	
Moscow	55.75	37.63	156	
Edinburgh	55.95	-3.35	41	
Petersburg	59.96	30.30	4	

Table 4. Locations selected for the present monthly-mean database. Note that 20 locations have been selected for each of the three latitude bands: 0-20, 20-40 and 40-60 degree N.

Latitude	Cities	January-June						July-December					
		Months	G _{NASA}	T _{max-Ti/Tempo}	T _{mean-NASA}	T _{mean-Ti/Tempo}	T _{min-Ti/Tempo}	Months	G _{NASA}	T _{max-Ti/Tempo}	T _{mean-NASA}	T _{mean-Ti/Tempo}	T _{min-Ti/Tempo}
		January	6.0	30.4	26.7	27.0	24.3	July	5.9	32.3	26.5	26.9	26.4
February	6.3	30.4	27.4	27.0	24.6	August	5.9	32.4	26.4	29.0	26.7		
March	6.5	30.1	27.7	26.8	24.5	September	5.3	32.5	26.1	29.3	26.9		
April	6.2	31.0	26.8	27.9	25.5	October	5.0	32.4	25.9	29.0	26.7		
May	5.7	31.4	26.4	28.4	26.3	November	5.0	31.9	26.0	28.7	26.4		
June	5.7	31.5	26.6	28.6	26.1	December	5.4	31.8	26.0	28.2	25.5		
January	5.4	30.2	24.4	26.7	23.9	July	5.8	33.1	25.0	29.0	26.1		
February	5.8	29.5	24.8	26.2	23.6	August	5.9	33.6	25.2	29.6	26.7		
March	6.2	30.4	25.3	26.7	24.0	September	5.8	34.8	25.4	30.3	27.2		
April	5.8	31.3	25.7	27.8	24.8	October	5.4	33.2	25.3	29.4	26.3		
May	5.5	32.7	25.6	28.7	26.1	November	5.0	32.2	25.1	28.3	25.3		
June	5.5	33.6	25.2	29.1	26.1	December	5.0	30.8	24.7	27.0	24.2		
January	5.7	34.8	23.6	29.1	21.0	July	5.7	33.4	25.1	29.6	24.3		
February	6.3	38.1	25.6	31.3	21.7	August	5.5	33.3	24.9	29.8	25.4		
March	6.7	37.8	28.5	31.7	21.9	September	5.9	33.4	26.0	28.7	24.2		
April	7.0	42.1	29.7	36.7	29.8	October	5.8	35.3	27.7	30.7	25.3		
May	6.6	40.1	28.3	35.3	27.4	November	5.8	35.5	27.3	30.4	23.6		
June	6.2	37.6	26.5	32.5	27.3	December	5.5	33.9	24.4	27.5	9.0		
January	4.9	30.3	26.1	25.1	20.8	July	4.7	37.6	29.5	31.9	27.1		
February	5.9	32.4	27.0	26.6	21.6	August	4.8	35.5	29.4	29.6	25.5		
March	6.6	34.1	27.5	28.5	23.7	September	5.0	35.7	28.5	30.2	25.3		
April	6.7	36.6	27.0	30.8	26.4	October	4.4	34.7	27.0	29.7	25.0		
May	6.1	38.6	26.8	32.1	27.1	November	4.1	30.2	26.1	26.5	23.7		
June	5.2	39.3	26.4	32.3	27.8	December	4.2	28.9	25.5	25.1	22.1		
January	4.5	33.2	21.3	25.8	20.6	July	7.0	44.5	30.9	36.3	29.8		
February	5.3	34.4	21.7	26.8	21.2	August	6.5	43.6	30.7	35.7	30.2		
March	6.2	35.7	23.5	27.6	21.6	September	6.2	43.5	30.9	34.9	28.8		
April	6.9	40.2	26.3	31.9	24.6	October	5.6	40.8	28.7	31.7	25.6		
May	7.2	42.6	29.5	33.9	27.8	November	4.6	35.9	25.4	28.4	23.3		
June	7.1	45.4	30.9	37.0	31.0	December	4.2	33.0	22.6	25.4	20.5		
January	3.6	20.0	16.6	16.0	12.6	July	7.3	38.9	35.1	35.6	32.5		
February	4.4	23.4	19.3	19.2	15.2	August	7.0	39.5	35.2	35.3	32.1		
March	5.1	24.7	21.5	21.0	17.8	September	6.5	37.2	33.1	33.3	30.3		
April	6.0	29.9	25.8	25.6	22.0	October	5.3	33.4	29.8	29.7	26.5		
May	7.0	36.9	30.8	31.9	28.1	November	4.0	28.7	25.4	25.8	23.3		
June	7.7	40.0	33.6	35.3	31.1	December	3.3	22.5	21.1	20.2	17.8		
January	3.5	22.0	13.5	13.7	6.2	July	8.0	38.3	30.4	31.7	24.4		
February	4.7	23.6	14.4	15.2	7.1	August	7.5	36.6	30.2	29.9	22.6		
March	6.0	25.0	18.1	17.2	9.2	September	6.8	35.7	28.3	28.5	20.9		
April	7.0	32.1	23.2	24.0	15.5	October	5.2	33.3	24.4	25.6	18.4		
May	7.5	33.4	27.0	26.3	18.3	November	3.8	25.5	19.5	18.1	11.3		
June	8.2	38.2	29.1	30.7	22.3	December	3.1	23.2	15.0	14.9	7.9		
January	3.8	21.0	12.0	13.4	6.7	July	7.5	46.1	35.9	38.9	31.6		
February	4.9	24.4	14.9	17.0	9.8	August	7.0	44.9	35.3	37.4	30.2		
March	5.9	29.5	19.4	22.0	15.0	September	5.8	39.3	31.9	31.8	24.0		
April	6.6	33.0	24.1	24.6	19.9	October	4.8	35.9	25.9	28.4	20.6		
May	7.1	39.5	29.2	31.9	24.0	November	3.9	28.5	19.0	20.7	12.9		
June	7.3	44.1	33.9	36.8	28.9	December	3.5	26.0	13.5	16.8	8.6		
January	1.7	10.3	4.8	7.4	4.1	July	7.3	30.6	24.1	26.0	21.9		
February	2.5	9.7	5.0	7.0	4.5	August	6.4	29.7	23.9	25.0	20.8		
March	3.7	11.6	7.6	8.5	5.1	September	5.0	25.1	20.8	21.0	16.8		
April	4.8	16.4	12.8	12.0	8.3	October	3.1	21.6	15.0	16.2	14.4		
May	6.3	23.0	17.8	18.4	13.6	November	1.9	15.8	10.4	12.8	8.6		
June	7.2	28.3	22.0	23.4	18.8	December	1.4	13.3	6.1	10.4	6.7		
January	2.1	12.7	9.4	8.6	4.6	July	6.8	28.3	22.9	24.7	21.9		
February	3.1	13.7	9.7	9.4	5.4	August	5.8	30.1	23.2	25.6	22.4		
March	4.3	15.4	11.3	11.8	7.6	September	4.6	25.8	20.8	21.8	18.3		
April	5.3	17.9	13.0	13.9	10.0	October	3.1	22.9	17.7	18.6	14.7		
May	6.0	22.4	16.3	18.3	14.7	November	2.1	19.0	13.2	14.3	10.0		
June	6.7	26.4	20.2	22.2	18.6	December	1.8	13.9	10.6	10.1	6.1		
January	1.8	3.8	-2.1	-1.2	-6.2	July	6.2	29.2	21.3	22.3	14.4		
February	2.5	5.6	-0.7	0.7	-3.8	August	5.5	28.8	21.1	21.7	14.7		
March	3.5	11.6	3.6	5.7	0.2	September	4.2	24.0	16.6	17.2	10.9		
April	4.2	19.1	9.3	11.9	4.8	October	2.8	17.9	10.7	12.0	6.3		
May	5.1	24.0	14.7	17.1	9.6	November	1.8	14.3	4.1	7.2	10		
June	6.0	27.0	18.8	20.0	12.1	December	1.4	7.8	-1.0	2.6	-1.9		
January	1.3	1.4	-4.3	-1.4	-5.3	July	4.9	23.0	16.6	19.7	16.8		
February	2.2	0.9	-4.1	-2.2	-6.0	August	4.5	25.3	20.1	21.4	18.3		
March	3.6	4.9	-0.7	1.5	-2.2	September	3.9	22.2	16.6	17.8	13.1		
April	4.8	12.5	4.9	7.8	2.6	October	2.6	16.6	11.1	12.4	7.9		
May	5.5	19.2	10.0	13.9	9.0	November	1.4	8.3	4.5	5.1	1.4		
June	5.5	21.7	14.8	17.5	14.1	December	1.0	2.2	-1.4	-0.7	-4.1		
January	1.6	7.4	1.4	2.3	-1.8	July	6.1	30.4	24.2	24.0	17.7		
February	2.4	8.4	2.3	3.8	0.0	August	5.4	28.6	23.8	22.0	15.3		
March	3.3	11.6	6.4	6.4	1.7	September	4.2	25.1	19.8	18.5	12.6		
April	4.3	16.2	11.7	10.4	4.6	October	2.7	19.4	14.5	14.1	9.0		
May	5.5	22.9	17.2	16.3	9.4	November	1.7	15.6	7.7	9.9	5.6		
June	6.0	27.7	21.7	21.1	13.9	December	1.3	9.5	2.5	4.9	1.0		
January	1.6	12.3	6.1	9.0	4.6	July	6.3	25.1	21.3	21.3	17.3		
February	2.3	12.5	6.7	9.4	5.0	August	5.5	25.4	21.4	21.6	18.1		
March	3.7	14.9	9.2	11.6	7.0	September	4.3	22.8	18.7	19.2	15.7		
April	4.7	18.7	11.2	12.5	8.6	October	2.8	21.4	15.0	16.6	12.5		
May	5.7	19.6	15.5	15.8	12.5	November	1.7	17.9	9.9	14.1	9.7		
June	6.2	24.1	19.2	20.0	15.9	December	1.3	12.7	7.3	9.6	6.0		

Table 5. Sample of data used in the present work.

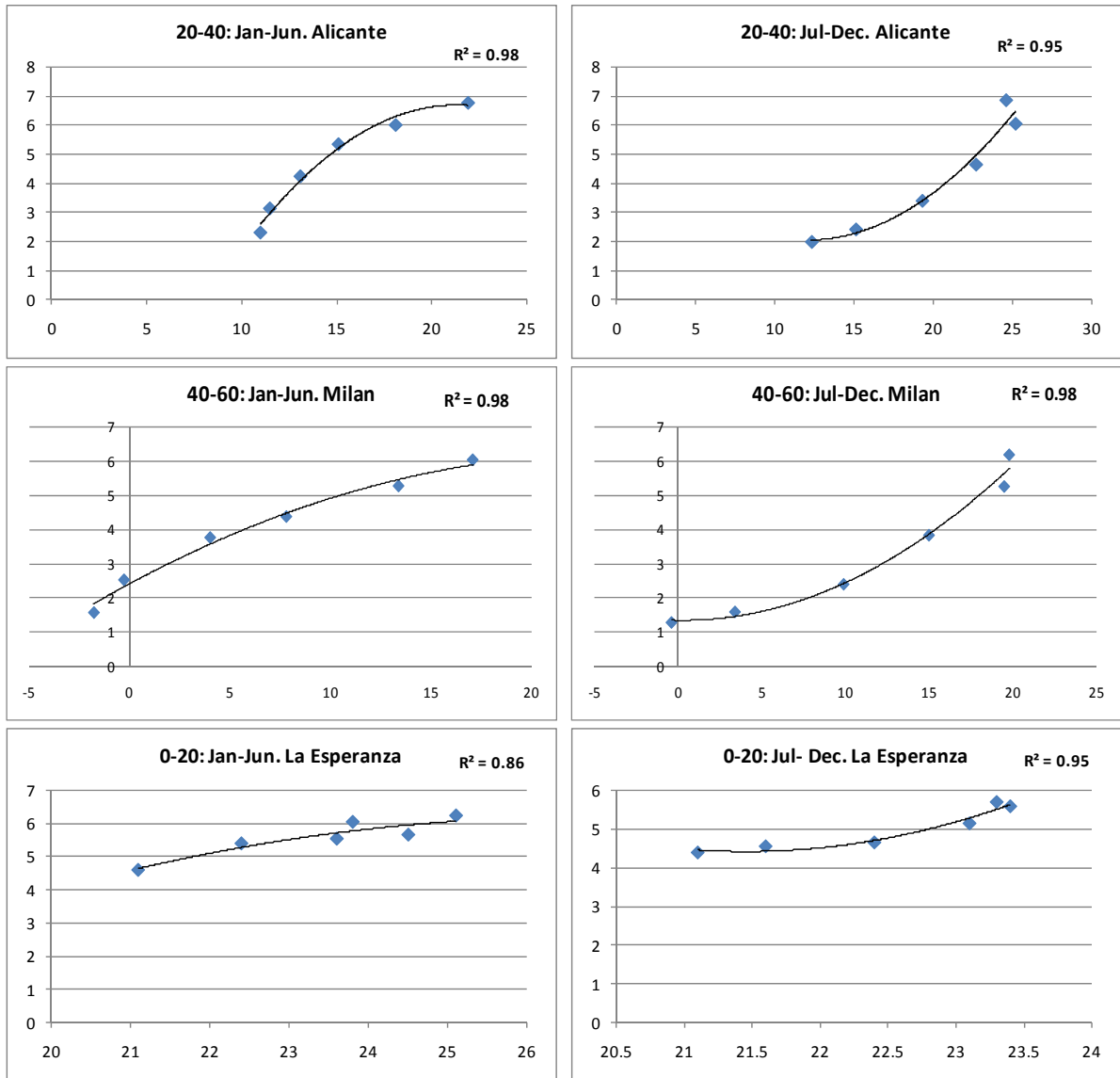


Figure 2a. Regression between mean-daily irradiation (\bar{G}) and temperature (T_{mean}) for three locations. x-axis: T_{mean} , y-axis: \bar{G} .

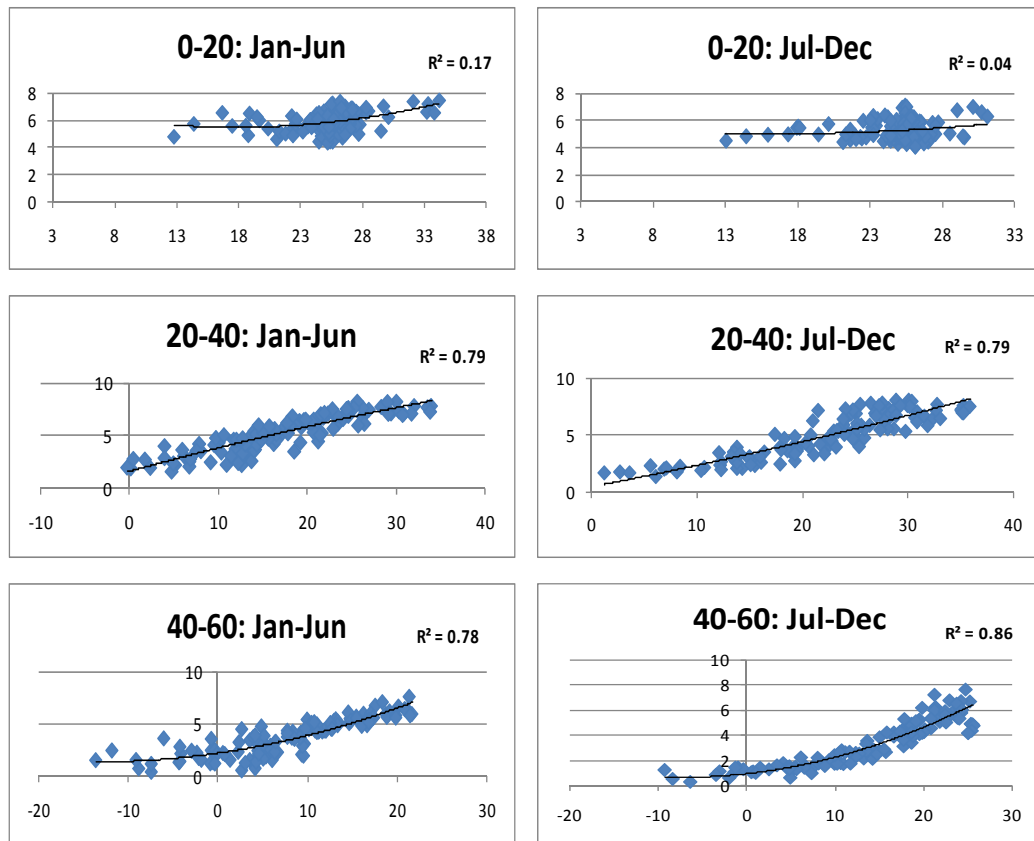


Figure 2b Regression between mean-daily irradiation (\overline{G}) and temperature (T_{mean}): all locations. x-axis: T_{mean} , y-axis: \overline{G} .

Even for the sparse irradiation network there is the challenge of careful maintenance of solarimeters that is required on a day-to-day basis, particularly the due care that is associated with diffuse radiation measurement. In this respect, a discussion on the lack of care of shade-ring adjustment and the corresponding errors has been enumerated by Muneer [6].

As pointed out above solar radiation affects the earth's weather processes. After cooling of the land mass during the night sensible heating resulting from irradiation absorption effects is responsible for ambient temperature variations, so it is possible to obtain a relationship between temperature and solar radiation. The landmark work in this respect was carried out by Campbell [7]. Using this argument, Bristow and Campbell [8] suggested a relationship for global solar radiation as a function of irradiation and the difference between maximum and minimum temperature.

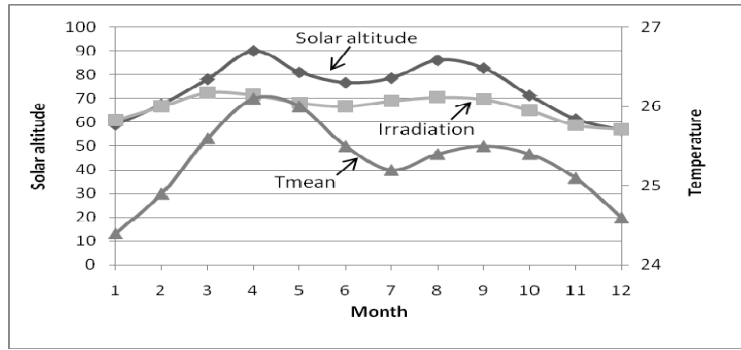


Figure 3a. Solar altitudes at noon, irradiation ($\times 10$) and T_{mean} at 10° latitude.

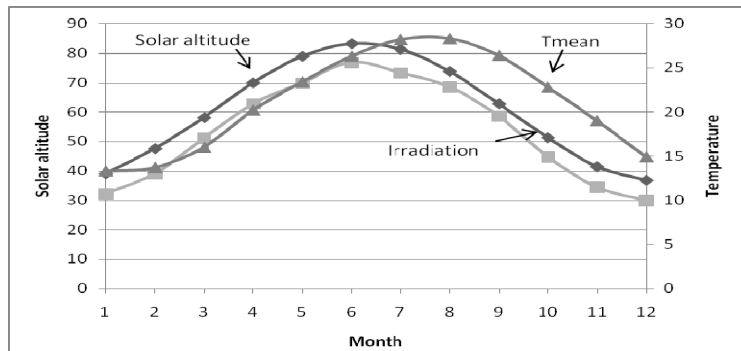


Figure 3b. Solar altitudes at noon, irradiation ($\times 10$) and T_{mean} at 30° latitude.

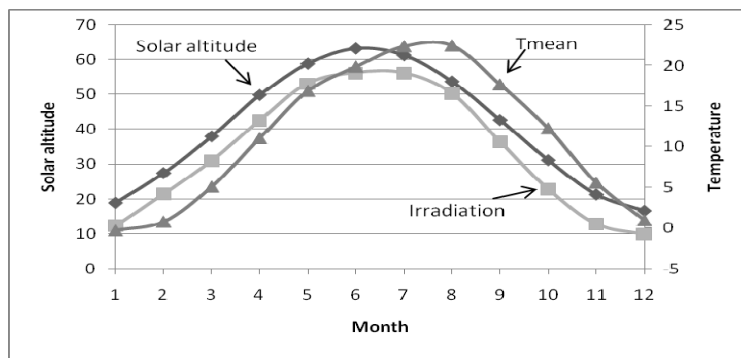


Figure 3c. Solar altitudes at noon, irradiation ($\times 10$) and T_{mean} at 50° latitude.

Hargreaves and Samani [9] suggested that solar radiation can be estimated from the above-mentioned difference between maximum and minimum air temperatures, and introduced an empirical coefficient K_r . Hargreaves [10] recommended the value of K_r to be 0.16 for interior regions and 0.19 for coastal regions. Annandale *et al* [11] introduced a correction factor for empirical coefficient to account for effects of reduced atmospheric thickness on solar radiation. Allen [12] obtained K_r as a function of the location altitude to take account of the volumetric heat capacity of the atmosphere (see Eq. 1).

Station	ME	RMSE (%)
Ahmedabad	0.89	6.4
Amritsar	0.92	7.9
Bhopal	0.73	12.7
Hyderabad	0.78	8.6
Jaipur	0.31	16.8
Kodaikanal	0.77	10.1
Nagpur	0.93	4.9
Okha	0.39	13.2
Pune	0.89	6.0
Shillong	0.71	9.9
Present works		
Sanaa	-8.19	19.2
Kufra	0.74	11.5
Budapest	0.92	13.9

Table 6. Comparison between the findings of Bandyopadhyay *et al* [24] using Eq. 1 and the presently developed model.

Allen [13] suggested the use of a self-calibrating model to estimate mean monthly global solar radiation following the work of Hargreaves and Samani [9]. Samani [14] developed an empirical relationship between K_r and the difference between air temperature extremes. Meza and Varas [15] evaluated the behaviour of models of Allen [13] and Bristow and Campbell [8] and inter-compared their results.

Using data from 40 stations covering contrasting climates, Thornton and Running [1] present a reformulation of the Bristow and Campbell model for daily solar radiation, based on daily observations of temperature, humidity and precipitation.

Liu and Scott [16], evaluated the accuracy and applicability of several models for estimating daily value of solar radiation across Australia for different situations, i.e. using the work of McCaskill [17-18] when only rainfall data were available, the work of Bristow and Campbell [8], Richardson [19] and Hargreaves and Riley [20] when only temperature data were available, and the work of De Jong and Stewart [21] and Hunt *et al* [22] when data for rainfall and temperature were available.

Zhoy *et al* [23] validated and compared the above models to predict monthly average daily global radiation on a horizontal surface based on data from 69 meteorological stations in China. Their work was then extended to select the model with

the highest accuracy that was then deployed to obtain a geographical distribution of solar radiation across China.

In their landmark work, Bandyopadhyay *et al* [24] estimated solar radiation by using nearly all of the above models that deal with temperature as the sole predictor and reported on the relative accuracy of those models. The work of Bandyopadhyay *et al* [24] was based on data from for 29 stations that were distributed throughout India.

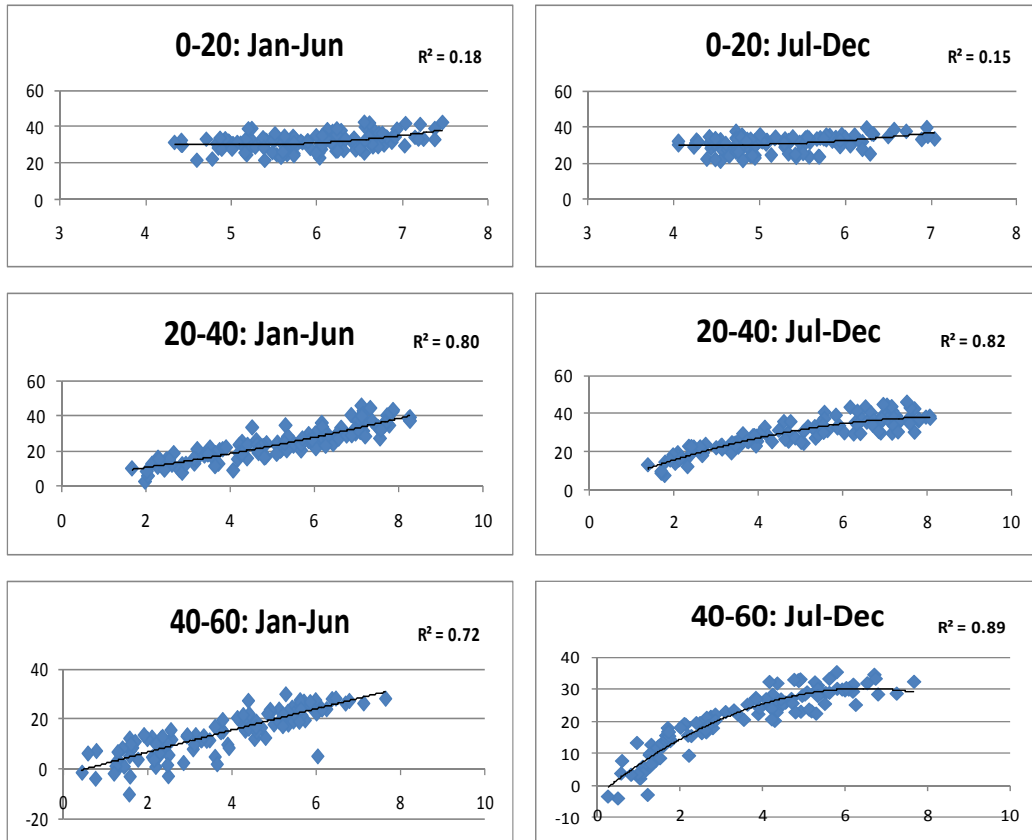


Figure 4. Regression between mean-daily irradiation (\bar{G}) and maximum temperature (T_{\max}): all locations. x-axis: \bar{G} , y-axis: T_{\max} .

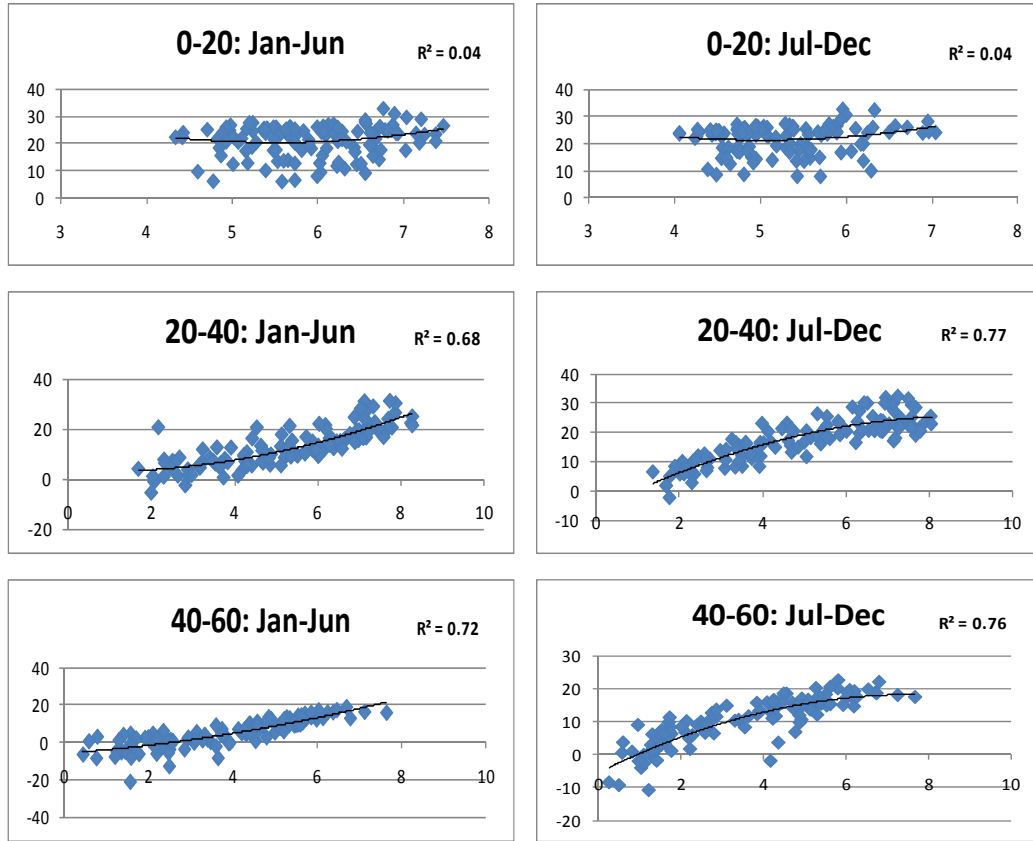


Figure 5. Regression between mean-daily irradiation (\overline{G}) and minimum temperature (T_{\min}): all locations.
x-axis: \overline{G} , y-axis: T_{\min} .

The methods compared were Hargreaves [10], Annandale [11], Allen [12-13], Samani [14], and Bristow and Campbell [8]. The estimated solar radiation values were then compared with measured solar radiation (or solar radiation estimated from measured sunshine hours with locally calibrated Angstrom coefficients), to check the suitability of these methods under Indian conditions. The conclusion drawn by Bandyopadhyay *et al* [24] was that the original Hargreaves [10] method performed overall best for Indian locations. The methods due to Allen [12], Samani [14] and Bristow and Campbell [8] were found to be inferior with the latter being the poorest of the lot. The Hargreaves [10] may be summarised thus,

$$\overline{G} = K_r (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \overline{E} \quad (1)$$

where \overline{G} is the monthly-mean daily extraterrestrial irradiation (kWh/m^2).

4 PRESENTLY PROPOSED MODELS

The present work is developed around the philosophy that for a great many locations around the world, the only parameter that may be available is the mean ambient temperature. Furthermore, the model is simple in its constitution. It has been constructed with the ease of use in mind. Presently, three types of models are proposed that respectively deal with (i) mean-daily irradiation, (ii) mean-hourly irradiation, and (iii) hourly temperature. These are presented in the subsequent sections. Figure 1 shows the information-flow diagram for the present computational scheme.

4.1 Models for mean-daily irradiation

Table 4 presents a list of all locations that have been selected for the present monthly-mean database. Note that 20 locations have been selected for each of the three latitude bands: 0-20, 20-40 and 40-60 degree N. The temporal split was created in two broad categories, i.e. the heating period represented by the January-June months and the cooling by the July-December period. For the southern hemisphere the split would obviously be reversed. The present study, being the first of its kind, is being restricted to the northern hemisphere, and an extension may easily be undertaken for the southern part of the globe as pointed out above.

Data was extracted from two sources, i.e. the NASA- and the TuTiempo websites. The former website provides information on \bar{G} and T_{mean} . However, to obtain hourly temperatures, one needs mean-daily T_{min} and T_{max} . Hence, the latter data were obtained from the TuTiempo website. A sample of the pooled data is shown in Table 5. The next step was to obtain regressions between \bar{G} and T_{mean} , the logic being that T_{mean} is available much more widely in terms of spatial and temporal coverage as pointed out in Section 1.

Location	Latitude	$\bar{G} - T_{\text{mean}}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Accra	5.60	0.80	0.91
Georgetown	6.50	0.07	0.56
Con Son	8.68	0.71	0.66
Juan Santamaria	9.98	0.51	0.20
Barcelona. V	10.11	0.75	0.69
Cartagena	10.45	0.86	0.93
Caracas	10.60	0.25	0.35
Babanusa	11.33	0.95	0.81
Phnom-Penh	11.55	0.46	0.87
Madras	13.00	0.95	0.77
Bangkok	13.66	0.49	0.94
San Salvador	13.70	0.60	0.98
La Esperanza	14.31	0.86	0.95
Guatemala	14.58	0.46	0.77
Sanaa	15.51	0.99	0.91
Abbs	16.08	0.99	0.85
Timbuktu	16.71	0.99	0.77
Acapulco	16.83	0.60	0.83
Mexico	19.43	0.73	0.86
Akola	20.70	0.79	0.00

0-20

Location	Latitude	$\bar{G} - T_{\text{mean}}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Makkah	21.43	0.97	0.94
Aswan	23.96	0.96	0.98
Kufra	24.21	0.96	0.98
Riyadh	24.70	0.99	0.99
Manama	26.26	0.98	0.99
Asyut	27.05	0.97	1.00
I-n-Salah	27.23	1.00	0.99
Cairo	30.13	0.98	0.99
Tripoli	32.66	0.98	0.92
Palmyra	34.55	0.99	0.99
Aleppo	36.18	0.99	0.99
Tunis	36.83	0.97	0.96
Faro	37.01	0.99	0.99
Seville	37.41	0.99	0.99
Izmir	38.26	0.98	0.99
Alicante	38.28	0.98	0.95
Philadelphia	39.86	0.99	1.00
Ankara	39.95	0.97	0.99
Madrid	40.38	0.99	0.99
Istanbul	40.96	0.98	0.99

20-40

Location	Latitude	$\bar{G} - T_{\text{mean}}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Barcelona	41.28	0.96	0.96
Rome	41.95	0.97	0.97
Sofia	42.65	0.96	0.99
Sapporo	43.06	0.97	0.97
Varna	43.20	0.99	0.99
San Sebastian	43.35	0.99	0.98
Cannes	43.53	0.98	0.97
Toulouse	43.63	0.99	0.99
Florence	43.80	0.99	0.98
Bologna	44.53	0.99	0.98
Milan	45.43	0.98	0.98
Timisoara	45.76	0.99	0.99
Odessa	46.43	0.99	0.99
Quebec	46.80	0.98	1.00
Graz	47.00	0.99	0.99
Budapest	47.43	0.99	0.99
London	51.51	0.99	0.99
Moscow	55.75	0.96	1.00
Edinburgh	55.95	0.99	0.99
Petersburg	59.96	0.98	1.00

40-60

 Table 7. Regression between mean-daily irradiation (\bar{G}) and temperature (T_{mean}): al locations.

Location	Latitude	$T_{\text{max}} - \bar{G}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Accra	5.60	0.95	0.86
Georgetown	6.50	0.09	0.38
Con Son	8.68	0.47	0.32
Juan Santamaria	9.98	0.23	0.44
Barcelona. V	10.11	0.28	0.17
Cartagena	10.45	0.78	0.13
Caracas	10.60	0.17	0.78
Babanusa	11.33	0.83	0.36
Phnom-Penh	11.55	0.47	0.65
Madras	13.00	0.16	0.77
Bangkok	13.66	0.70	0.16
San Salvador	13.70	0.91	0.68
La Esperanza	14.31	0.51	0.57
Guatemala	14.58	0.44	0.73
Sanaa	15.51	0.92	0.59
Abbs	16.08	0.91	0.86
Timbaktu	16.71	0.96	0.81
Acapulco	16.83	0.46	0.80
Mexico	19.43	0.73	0.78
Akola	20.70	0.77	0.52

0-20

Location	Latitude	$T_{\max} - \bar{G}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Makkah	21.43	0.93	1.00
Aswan	23.96	0.98	0.98
Kufra	24.21	0.94	0.98
Riyadh	24.70	0.99	0.99
Manama	26.26	0.99	0.99
Asyut	27.05	0.98	0.99
I-n-Salah	27.23	0.98	0.99
Cairo	30.13	1.00	0.97
Tripoli	32.66	0.99	0.99
Palmyra	34.55	1.00	0.98
Aleppo	36.18	0.99	0.98
Tunis	36.83	0.99	0.99
Faro	37.01	0.97	0.97
Seville	37.41	0.99	0.95
Izmir	38.26	0.99	0.99
Alicante	38.28	0.99	0.96
Philadelphia	39.86	0.99	0.97
Ankara	39.95	0.98	0.96
Madrid	40.38	0.97	0.97
Istanbul	40.96	1.00	0.99

20-40

Location	Latitude	$T_{\max} - \bar{G}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Barcelona	41.28	0.99	0.96
Rome	41.95	0.98	0.96
Sofia	42.65	0.98	0.97
Sapporo	43.06	1.00	0.98
Varna	43.20	1.00	0.98
San Sebastian	43.35	0.98	0.93
Cannes	43.53	0.98	0.99
Toulouse	43.63	0.98	0.98
Florence	43.80	0.97	0.98
Bologna	44.53	0.99	0.98
Milan	45.43	0.99	0.99
Timisoara	45.76	0.96	0.98
Odessa	46.43	0.98	0.98
Quebec	46.80	0.99	0.92
Graz	47.00	0.99	0.98
Budapest	47.43	0.96	0.99
London	51.51	0.98	0.97
Moscow	55.75	1.00	0.97
Edinburgh	55.95	0.97	0.96
Petersburg	59.96	1.00	0.98

40-60

Table 8. Regression between mean-daily irradiation (\bar{G}) and maximum temperature (T_{\max}): all locations.

Location	Latitude	$T_{\min} - \bar{G}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Accra	5.60	0.72	0.85
Georgetown	6.50	0.63	0.21
Con Son	8.68	0.64	0.07
Juan Santamaria	9.98	0.69	0.90
Barcelona. V	10.11	0.17	0.46
Cartagena	10.45	0.69	0.15
Caracas	10.60	0.18	0.83
Babanusa	11.33	0.39	0.18
Phnom-Penh	11.55	0.31	0.86
Madras	13.00	0.11	0.55
Bangkok	13.66	0.20	0.01
San Salvador	13.70	0.22	0.75
La Esperanza	14.31	0.28	0.57
Guatemala	14.58	0.09	0.90
Sanaa	15.51	0.96	0.55
Abbs	16.08	0.90	0.81
Timbuktu	16.71	0.88	0.97
Acapulco	16.83	0.26	0.66
Mexico	19.43	0.34	0.66
Akola	20.70	0.24	0.31

0-20

Location	Latitude	$T_{\min} - \bar{G}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Makkah	21.43	0.85	0.97
Aswan	23.96	0.99	0.99
Kufra	24.21	0.95	1.00
Riyadh	24.7	0.99	0.98
Manama	26.26	0.99	0.98
Asyut	27.05	0.99	0.99
I-n-Salah	27.23	0.94	0.99
Cairo	30.13	0.99	0.98
Tripoli	32.66	0.99	0.99
Palmyra	34.55	1.00	0.98
Aleppo	36.18	0.99	0.98
Tunis	36.83	0.99	1.00
Faro	37.01	0.95	0.98
Seville	37.41	0.96	0.98
Izmir	38.26	0.98	0.99
Alicante	38.28	0.99	0.99
Philadelphia	39.86	1.00	0.94
Ankara	39.95	0.98	0.96
Madrid	40.38	0.97	0.98
Istanbul	40.96	1.00	0.98

20-40

Location	Latitude	$T_{\min} - \bar{G}$	
		January-June	July-December
		R^2	R^2
Barcelona	41.28	0.99	0.98
Rome	41.95	0.99	0.98
Sofia	42.65	0.99	1.00
Sapporo	43.06	0.96	0.98
Varna	43.2	0.99	0.97
San Sebastian	43.35	0.99	0.98
Cannes	43.53	0.98	0.97
Toulouse	43.63	1.00	0.94
Florence	43.8	0.95	0.98
Bologna	44.53	0.98	0.94
Milan	45.43	0.98	0.97
Timisoara	45.76	0.99	0.98
Odessa	46.43	0.97	0.96
Quebec	46.8	0.99	0.94
Graz	47	1.00	0.98
Budapest	47.43	0.98	0.98
London	51.51	0.98	0.94
Moscow	55.75	0.97	0.92
Edinburgh	55.95	0.98	0.97
Petersburg	59.96	1.00	0.93

40-60

Table 9. Regression between mean-daily irradiation (\bar{G}) and minimum temperature (T_{\min}): all locations.

Latitude Range	January-June		July-December	
	Model	R^2	Model	R^2
0-20	$\bar{G} = 7.52 - 0.23 * T_{mean} + 0.01 * T_{mean}^2$	0.17	$\bar{G} = 5.837 - 0.102 * T_{mean} + 0.003 * T_{mean}^2$	0.04
20-40	$\bar{G} = 1.636 + 0.232 * T_{mean} - 0.001 * T_{mean}^2$	0.79	$\bar{G} = 0.511 + 0.175 * T_{mean} + 0.001 * T_{mean}^2$	0.79
40-60	$\bar{G} = 2.211 + 0.123 * T_{mean} + 0.005 * T_{mean}^2$	0.78	$\bar{G} = 0.955 + 0.078 * T_{mean} + 0.005 * T_{mean}^2$	0.86

Latitude Range	January-June		July-December	
	Model	R^2	Model	R^2
0-20	$T_{max} = 67.61 - 14.81 * \bar{G} + 1.45 * \bar{G}^2$	0.18	$T_{max} = 50.70 - 9.39 * \bar{G} + 1.06 * \bar{G}^2$	0.15
20-40	$T_{max} = 4.19 + 2.83 * \bar{G} + 0.18 * \bar{G}^2$	0.8	$T_{max} = 0.15 + 8.80 * \bar{G} - 0.50 * \bar{G}^2$	0.82
40-60	$T_{max} = -2.47 + 4.66 * \bar{G} - 0.04 * \bar{G}^2$	0.72	$T_{max} = -3.06 + 10.30 * \bar{G} - 0.80 * \bar{G}^2$	0.89

Latitude Range	January-June		July-December	
	Model	R ²	Model	R ²
0-20	$T_{\min} = 59.33 - 14.17 * \bar{G} + 1.29 * \bar{G}^2$	0.04	$T_{\min} = 2.89 - 0.36 * \bar{G} + 0.39 * \bar{G}^2$	0.04
20-40	$T_{\min} = 52.48 - 12.45 * \bar{G} + 1.24 * \bar{G}^2$	0.68	$T_{\min} = -6.52 + 7.17 * \bar{G} - 0.40 * \bar{G}^2$	0.77
40-60	$T_{\min} = -5.89 + 1.66 * \bar{G} + 0.25 * \bar{G}^2$	0.72	$T_{\min} = -5.45 + 6.19 * \bar{G} - 0.40 * \bar{G}^2$	0.76

Table 10. Models for mean-daily irradiation (\bar{G}) based on mean temperature (T_{mean}), mean- maximum temperature (T_{max}) based on daily irradiation (\bar{G}) and mean-minimum temperature (T_{min}) based on daily irradiation (\bar{G}): all locations.

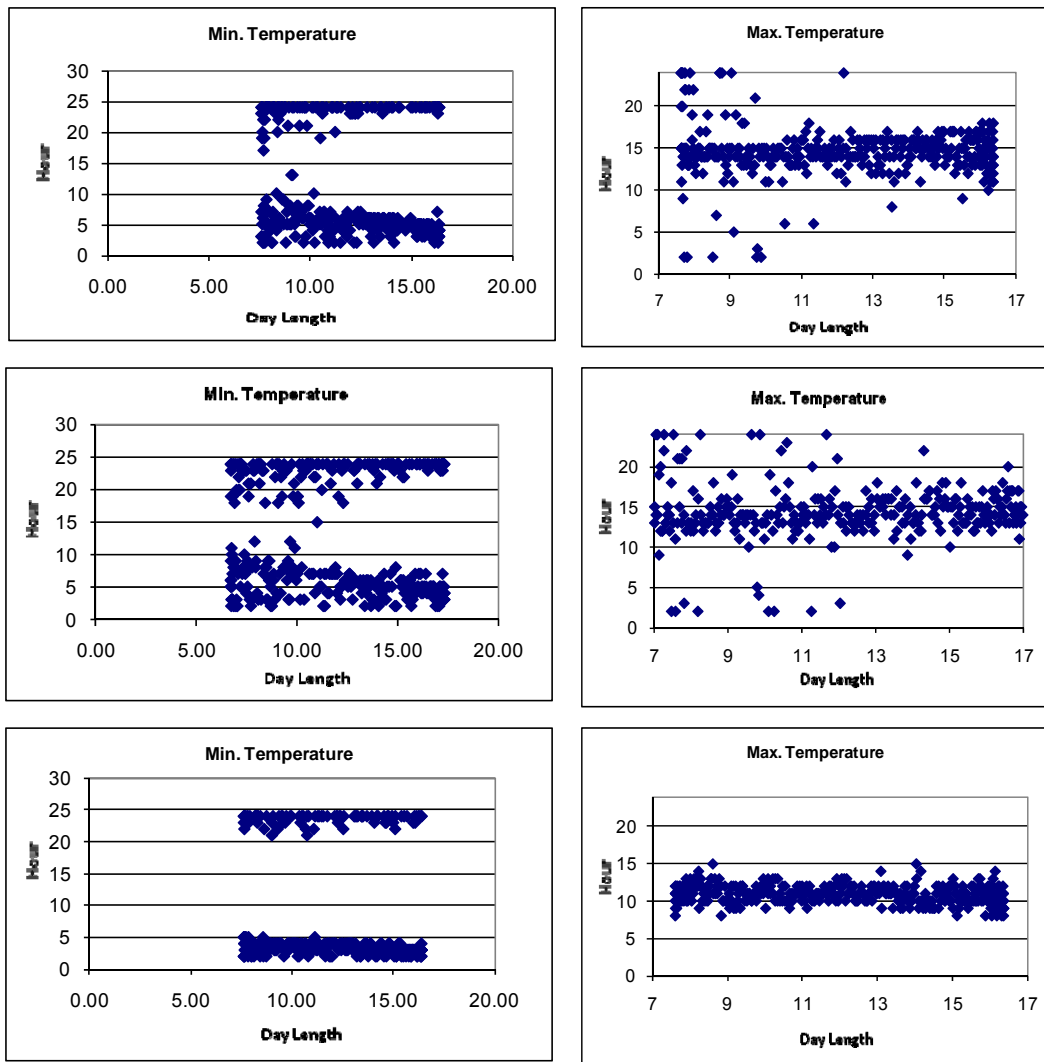


Figure 6. Time of occurrence of the (a) minimum and (b) maximum temperature.

Figures 2a and b respectively, show regressions between \bar{G} and T_{mean} for individual and grouped locations. Two points are worth mentioning. First, for any given location there is a strong correlation between the two parameters under discussion and, secondly, Usos de la energía solar fotovoltaica como fuente para el suministro de energía eléctrica en el sector residencial

the high values of R^2 are restricted to latitudes above 20° . The much more weaker correlations for the near-equatorial band has also been reported by Swartman and Ogunlade [25] and Bandyopadhyay *et al* [24]. The former study has, respectively, attempted regressions between \bar{G} and precipitable water and between \bar{G} and daily temperature range. However, the important point to note is that the T_{mean} itself or indeed the daily temperature range is dictated by the much more uniform movement of the sun within the tropics. This point is demonstrated via Figure 3 that shows the narrow range of noon solar altitude for the $0\text{-}20^\circ$ latitude band. Note that for the other two latitude bands 20° to 40° and the 40° to 60° , there is a close concordance between T_{mean} and \bar{G} with noon altitude.

The present sets of models were also compared in terms of their accuracy to those reported by Bandyopadhyay *et al* [24]. The latter team has used the following statistical parameters to evaluate the model's accuracy. Equations for Modelling Efficiency (ME) and root-mean square error (RMSE), used by the latter work of reference, are provided in the following equations.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - \bar{x}_o)^2 - \sum_{i=1}^n (x_{p,i} - x_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - \bar{x}_o)^2} \quad (2)$$

$$RMSE(\%) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (x_{p,i} - x_{o,i})^2 / n \right)^{0.5}}{\bar{x}_o} \times 100 \quad (3)$$

where $x_{o,i}$ is the measure variable, \bar{x}_o the average of the measured variable and $x_{p,i}$ the computed variable.

Table 6 compares the findings of Bandyopadhyay *et al* [24] using Equation. 1 and the presently developed model.

Refer to Figure 1 that shows the presently-proposed computational chain for obtaining hourly temperatures. The next step is to obtain regression models between T_{max} and \bar{G} , and between T_{min} and \bar{G} . Figures 4 and 5 respectively present those findings.

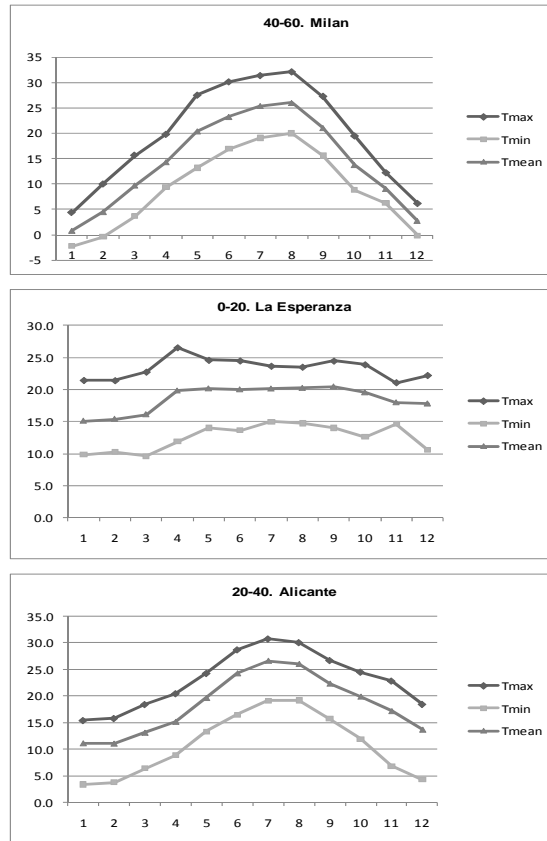


Figure 7 Inter-relationship between daily maximum, minimum and mean temperature for three locations.

Once again the strong correlation between the variables under discussion is apparent. Furthermore, we note that, as found above, a much weaker correlation exists for the near-equatorial band. Tables 7-9 provide the R^2 values for the regressions under discussion, for all locations. The above discussion is thus further reinforced. It is therefore recommended that the presently proposed relationship be used, with confidence, for locations above 20° N latitude.

Table 10 (a-c) provides the proposed models that relate \bar{G} to T_{mean} , T_{max} to \bar{G} , and T_{min} to \bar{G} . Note that there is a weaker correlation between T_{min} and \bar{G} . This may be explained as follows. Whereas during the daytime the sun's irradiation is the strongest contributor to the rise of temperature, after sunset, during nocturnal hours a number of factors determine the rate of heat loss from the landmass, i.e. direction and speed of wind, and duration and amount of precipitation (rain or snow). Thus a weaker correlation exists between T_{min} and \bar{G} . This point is demonstrated in a greater detail via Figure 6(a-b). The time of occurrence for T_{max} is much more well defined than T_{min} . The time of occurrence for T_{max} and T_{min} is important information as it enables one to obtain

hourly temperatures for the 24-h period. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) [26] has provided the latter procedure and that will be the subject of discussion in Section 4.3.

Cities	Latitude	$T_{\text{computed}} - T_{\text{observed}}$			
		January-June		July-December	
		Slope	R^2	Slope	R^2
Cartagena	0-20	1.16	0.97	0.99	0.95
I-n-Salah	20-40	1.06	1.00	1.03	1.00
Sofia	40-60	1.06	1.00	1.07	1.00

Table 11 Regression between daily-mean minimum temperature: computed and measured values for three locations.

To provide a better procedure to obtain T_{min} an attempt was made to relate the latter parameter to T_{mean} and T_{max} . Figure 7 shows plots for three international locations. The point to note here is that T_{mean} seems to be a close average of T_{min} and T_{max} . On the latter basis, T_{min} may thus be obtained as follows:

$$T_{\text{min}} = 2 T_{\text{mean}} - T_{\text{max}} \quad (4)$$

Using Equation 4, T_{min} was computed for three of the present locations and then compared with its measured value. Table 11 shows that using this procedure, T_{min} may be obtained with satisfactory accuracy.

Table 12 shows the correspondence between the T_{mean} values from the two sources – NASA and TuTiempo. Once again we note that there is a much weaker correspondence for locations near the equatorial belt. The primary reason for this may be attributed to the poor quality of measured temperature records for developing countries. A number of studies have alluded to this point. The correspondence at latitudes north of 20° seems to be quite strong though and hence the T_{mean} data may be used inter-changeably.

Location	Latitude	$T_{\text{mean-TuTiempo}} - T_{\text{mean-NASA}}$	
		Slope	R ²
Accra	5.60	0.61	0.90
Georgetown	6.50	0.39	0.47
Con Son	8.68	0.51	0.79
Juan Santamaria	9.98	0.90	0.36
Barcelona. V	10.11	0.48	0.33
Cartagena	10.45	-0.52	0.65
Caracas	10.60	0.15	0.27
Babanusa	11.33	0.56	0.65
Phnom-Penh	11.55	0.35	0.35
Madras	13.00	0.63	0.90
Bangkok	13.66	0.59	0.49
San Salvador	13.70	0.65	0.51
La Esperanza	14.31	0.34	0.30
Guatemala	14.58	0.43	0.31
Sanaa	15.51	0.78	0.74
Abbs	16.08	0.73	0.69
Timbuktu	16.71	0.76	0.89
Acapulco	16.83	0.23	0.31
Mexico	19.43	1.09	0.91
Akola	20.70	0.88	0.91

0-20

Location	Latitude	$T_{\text{mean-TuTiempo}} - T_{\text{mean-NASA}}$	
		Slope	R ²
Makkah	21.43	1.09	0.94
Aswan	23.96	1.06	0.98
Kufra	24.21	0.97	0.97
Riyadh	24.7	1.07	0.99
Manama	26.26	1.12	0.99
Asyut	27.05	0.94	0.98
I-n-Salah	27.23	0.99	0.99
Cairo	30.13	0.93	0.97
Tripoli	32.66	0.80	0.96
Palmyra	34.55	1.01	0.98
Aleppo	36.18	0.95	0.98
Tunis	36.83	0.89	0.98
Faro	37.01	1.00	0.97
Seville	37.41	0.99	0.98
Izmir	38.26	1.03	0.99
Alicante	38.28	0.91	0.97
Philadelphia	39.86	0.98	0.98
Ankara	39.95	0.96	0.97
Madrid	40.38	1.01	0.99
Istanbul	40.96	0.92	0.97

20-40

Location	Latitude	$T_{\text{mean-TuTiempo}} - T_{\text{mean-NASA}}$	
		Slope	R ²
Barcelona	41.28	1.17	0.99
Rome	41.95	1.20	0.95
Sofia	42.65	1.05	0.99
Sapporo	43.06	0.98	0.99
Varna	43.20	1.13	0.99
San Sebastian	43.35	1.21	0.98
Cannes	43.53	1.08	0.98
Toulouse	43.63	1.07	0.99
Florence	43.80	0.92	0.98
Bologna	44.53	0.85	0.98
Milan	45.43	1.12	0.99
Timisoara	45.76	1.01	0.98
Odessa	46.43	1.06	0.99
Quebec	46.80	1.06	0.97
Graz	47.00	1.03	0.98
Budapest	47.43	0.98	0.98
London	51.51	0.91	0.95
Moscow	55.75	1.14	0.98
Edinburgh	55.95	0.97	0.95
Petersburg	59.96	1.09	0.98

40-60

Table 12. Regression between monthly-mean temperature (T_{mean}) data from the two sources - NASA and TUTIEMPO.

4.2 Models for mean-hourly irradiation

To provide a model to decompose averaged daily to averaged hourly values, Liu and Jordan [27] built on an earlier work by Whillier [28] to develop a set of regression curves, which represent the ratio of hourly to daily global solar irradiation at a series of time intervals from solar noon. This approach was validated by Collares-Pereira and Rabl [29] who obtained the following equation using a least-square fit as follows:

$$r_G = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega - \omega_s \sin \omega_s} \quad (5)$$

where r_G is the ratio of hourly to daily radiation, a and b the site-specific coefficients, ω the hour angle (°) and ω_s the sunset hour angle (°).

In Equation (5), $a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047)$, $b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047)$.

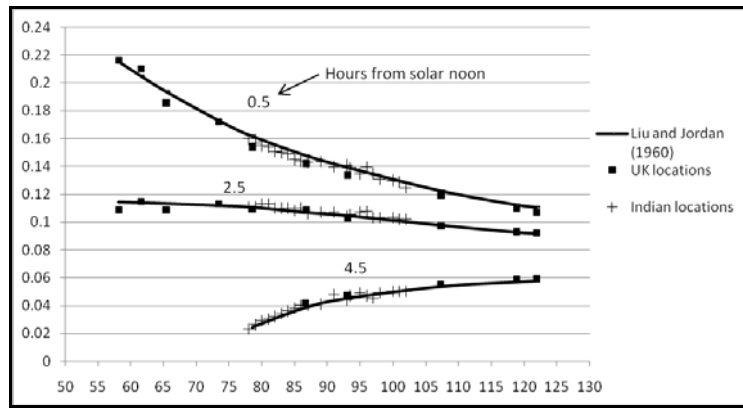


Figure 8. Ratio of hourly to daily global irradiation for different hours of the day versus sunset hour angle.

Hour	Z	Hour	Z
1	0.12	13	0.95
2	0.08	14	1.00
3	0.05	15	1.00
4	0.02	16	0.94
5	0.00	17	0.86
6	0.02	18	0.76
7	0.09	19	0.61
8	0.26	20	0.50
9	0.45	21	0.41
10	0.62	22	0.32
11	0.77	23	0.25
12	0.87	24	0.18

Table 13. ASHRAE model for diurnal temperature swing.

Location	Year	Slope	R ²	MBE (°C)	RMSE (°C)
Abu Dhabi	1997	0.99	0.77	-0.1	3.7
London	1990	0.97	0.93	-0.4	1.6
Edinburgh	1990	0.97	0.86	-0.3	1.7

Table 14. Performance of ASHRAE model for three international locations.

All of the above studies were undertaken using data from US locations. However, the above model's validity was also checked for Indian locations by Hawas and Muneer [30] who compared measurements from 13 Indian locations and found a general agreement for the r_G model. In an extended study, Tham *et al* [31] used long-term hourly irradiation data from 16 locations in UK to evaluate the above r_G model. The

findings of the above two studies, for India and the UK, are summarised Figure 8 which shows a remarkable concordance between the r_G model and data from the latter two countries. Tham *et al.* has also reported on the statistical evaluation of the r_G model. The errors in computing hourly from the mean-daily irradiation, for mainland UK locations, were found to be normally distributed around zero, with 39% points lying in the $\pm 10\%$ range, and 67% of the data in the $\pm 20\%$ range.

4.3 Models for hourly temperatura

Accurate hourly data are required in very many applications. To meet this need, a simple model to estimate hourly temperature from daily records has been provided by the ASHRAE [32]. A compute program to decompose daily to hourly temperature has been provided by Muneer *et al.* [33]. That code is also available in Muneer's book [6]. The daily maximum temperature that is achieved at a given location is dependent on the prevailing solar radiation, cloud-cover and wind profile. The earliest available models suggest a sinusoidal profile between the daily maximum and minimum temperatures. However, more recent work of Hedrick [34] and Thevenard [35], ASHRAE [26] has further updated the latter model. Table 13 gives the hourly temperature profile, expressed in terms of a presently defined Z-parameter (ratio of hourly temperature elevation to daily range $\{=(T_h-T_{\min})/(T_{\max}-T_{\min})\}$, dimensionless). ASHRAE [26] has suggested that this profile is a representative of both dry-bulb and wet-bulb temperature variation on typical design days. The tabulated information provided by ASHRAE [26] has been cross-checked using averaged hourly data from 58 Turkish locations [36] and hourly data from three international locations, i.e. Edinburgh, London and Abu Dhabi. Table 14 includes that information.

Data from the above three international locations were then used to evaluate the ASHRAE model. Figure 9 and Table 14 present the evaluation that used four statistical indicators. These indicators are the slope of the best-fit regression line between the computed and measured values, coefficient of determination value (R^2) for the above best-fit line, mean bias error (MBE) and (RMSE).

The slope of the best-fit line shows that the model performs well for all locations in this study. The R^2 indicator for Abu Dhabi showed that the model slightly underperforms in terms of data scatter. For the remaining stations, the R^2 values lie in the range 0.86-0.93, showing that the model performs well. The highest value of MBE is -

0.4 °C for Edinburgh and the lowest is -0.1°C at Abu Dhabi. This shows a good agreement with the slope of the best-fit line where Abu Dhabi has the best value near to the desire value of 1. The RMSE value for Abu Dhabi is the highest with the value of 3.7°C and the lowest value of 1.6 °C was found for London.

Furthermore, a comparison between the ASHRAE temperature model and the mean-hourly temperature record for locations within the UK and Turkey was carried out. It is evident that the UK temperature trend very closely follows the ASHRAE model. A slight upward shift of temperatures was observed for Turkey for the ante meridiem hours. Figure 10 shows that comparison.

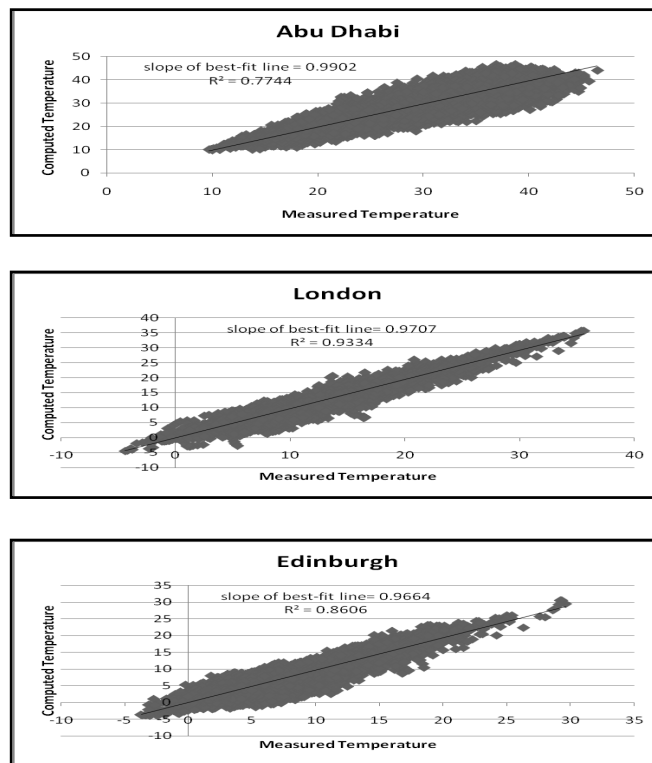


Figure 9. Presently obtained, yearly-averaged Z-parameter for three international locations.

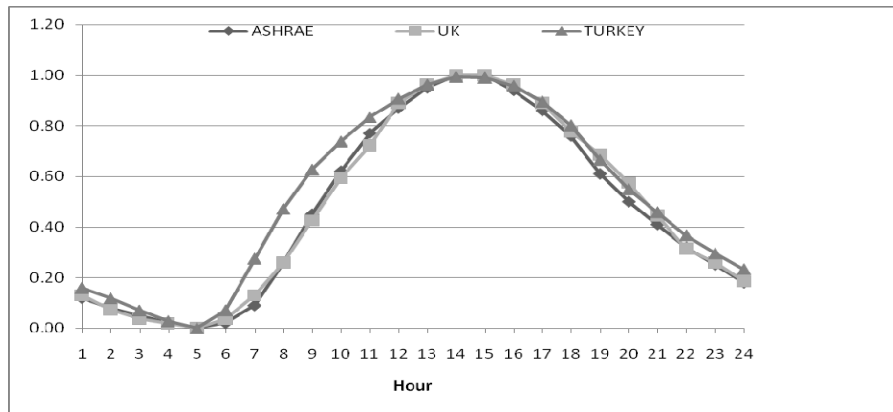


Figure 10. Comparison of mean-hourly temperature trend.

5 CONCLUSIONS

World-wide there is many more temperature measuring meteorological stations that those that measure solar radiation. Presently, a case has been made for the development of temperature-based mathematical models to obtain mean-daily irradiation. In contrast to the classical models that use daily temperature range, use was made of mean-daily temperature as the basic regressor. The accuracy of predicting mean-daily irradiation was evaluated using two statistical indicators – ME and RMSE. The latter have been defined via Equations (2 and 3). It was found that the ME lay between 0.7 to -8.2 and the RMSE between 12 and 34%.

Furthermore, a procedure to decompose daily to hourly temperatures was also evaluated. It was found that the procedure, although originally developed using data from North American locations, produces reliable estimates of hourly temperature with a low MBE range that varied from -0.1 to -0.4°C and the RMSE range that varied between 1.6°C and 3.7°C for three international locations. A review of models that decompose mean-daily irradiation to hourly data sets was also presented. It was found that this latter variable may be obtained with an accuracy figure of $\pm 20\text{W/m}^2$ for over 50% of the time.

Finally, there are large body of existing data on the above parameters measured across the world in recent years. These data may be used or further validation of the proposed model for different geographic areas, climatic zones and seasons. The presently proposed statistical metrics may then be used to evaluate further accuracy enhancement that may thus be achieved.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

The lead author (EJG) is thankful to the Spanish Ministry of Education and to Granada University for providing financial assistance for this work. The authors also wish to thank Edinburgh Napier University, Transport Research Institute (TRI), for providing all necessary facilities.

REFERENCES

[1] Thornton PE, Running SW. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agric Meteorol* 1999;93:211–28.

[2] Rivington M, Matthews KB, Bunchan K. A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. In: *Proceedings of the Integrated assessment and decision support, 1st Biennial Meeting of International Environmental Modelling and Software Society, Vol. 3, June 24–27 2002.* 193–8.

[3] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. *QJR Meteorol Soc* 1924;50:121–5.

[4] Muneer T, Saluja G. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces. *Energy Convers Manage* 1985;25:443.

[5] Colliver D. In Parker B.F. (ed.) *Solar Energy in Agriculture.* Energy in World Agriculture. Elsevier, 1991.

[6] Muneer T. *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd edn. Elsevier, 2004.

[7] Campbell G. *An Introduction to Environmental Biophysics.* Springer, 1977.

[8] Bristow K, Campbell G. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric Meteorol* 1984;31:159–66.

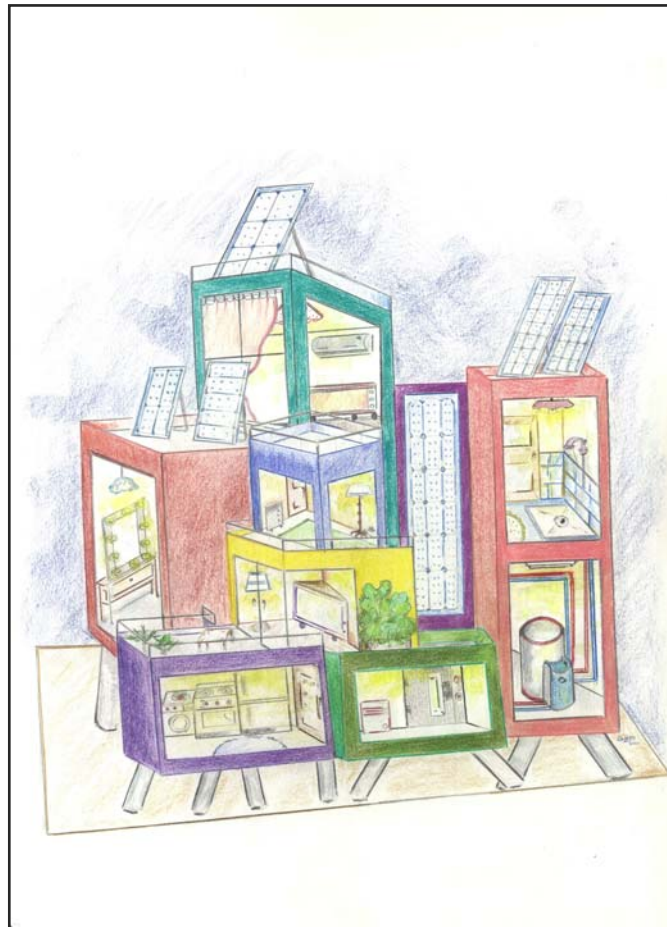
[9] Hargreaves G, Samani Z. Estimating potential evapotranspiration. *J Irrig Drain Eng ASCE* 1982;180:225–30.

[10] Hargreaves G. Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Dept. Paper, Department of Biology and Irrigation Engineering, Utah State University. 1994.

[11] Annandale JG, Jovanovic NZ, Benade N, et al. Software for missing data error analysis of Penman–Monteith reference evapotranspiration. *Irrig Sci* 2002;21:57–67.

- [12] Allen R. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1995.
- [13] Allen R. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *J Hydrol Eng* 1997;2:56–67.
- [14] Samani Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *J Irrig Drain Eng ASCE* 2000;126:265–7.
- [15] Meza F, Varas E. Estimation of mean monthly solar radiation as a function of temperature. *Agric Meteorol* 2000;100:231–41.
- [16] Liu DL, Scott BJ. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agric Meteorol* 2001;106:41–59.
- [17] McCaskill MR. An efficient method for generation of full climatological records from daily rainfall. *Aust J Agrc Res* 1990;41:595–602.
- [18] McCaskill MR. Prediction of solar radiation from rain information using regionally stable coefficients. *Agric Meteorol* 1990;51:247–55.
- [19] Richardson CW. Weather simulation for crop management models. *Trans ASEA* 1985;28:1602–6.
- [20] Hargreaves G, Riley J. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. *J Irrig Drain Eng ASCE* 1985;111:265–75.
- [21] De Jong R, Stewart DW. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in Western Canada. *Can J Plant Sci* 1993;73:509–18.
- [22] Hunt LA, Kuchar L, Swanton CJ. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agric Meteorol* 1998;91:293–300.
- [23] Zhoy J, Wu Y, Yan G. General formula for estimation of monthly average daily global radiation in China. *Energy Convers Manage* 2005;46:257–68.
- [24] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghuwanshi NS, et al. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. *Agric Meteorol* 2008;148:1707–18.
- [25] Swartman R, Ogunlade O. Solar radiation estimates from common parameters. In *Proceedings of Solar Energy Conference*, Vol. 4, 1967. 20–2.
- [26] ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [27] Liu B, Jordan R. The inter-relationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 1960;4:1.

- [28] Whillier A. The determination of hourly values of total radiation from daily summations. *Archiv Meteorol Geophys Bioclimatol* 1956;7(Series B):197.
- [29] Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 1979;22:155.
- [30] Hawas M, Muneer T. Study of diffuse and global radiation characteristics in India. *Energy Convers Manage* 1984;24:143.
- [31] Tham Y, Muneer T, Davison B. Estimation of hourly averaged solar irradiation: evaluation of models. *Build Serv Eng Res Technol* 2010;31:9.
- [32] ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1997.
- [33] Muneer T, Abodahab N, Weir G, et al. *Windows in Buildings*. Elsevier, 2000.
- [34] Hedrick R. Generation of hourly design-day weather data (RP-1363). ASHRAE Research Project, Final Report. 2009.
- [35] Thevenard D. Updating the ASHRAE climatic data for design and standards (RP-1453). ASHRAE Research Project, Final Report. 2009.
- [36] Coskun C, Oktay Z, Dincer I. A novel approach to cooling degree-hour calculation: an application for 58 cities in Turkey. In 5th International Ege Energy Symposium, 27–30 June 2010, Pamukkale University.



Capítulo IV: Capacidad Energética Solar Fotovoltaica

ANALYSIS OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CAPACITY OF RESIDENTIAL ROOFTOPS IN ANDALUSIA (SPAIN)

J. Ordóñez, E. Jadraque, J. Alegre, G. Martínez

Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain

Abstract

Fossil fuel energy resources are becoming increasingly scarce. Given the negative environmental impacts (e.g. greenhouse gas emissions) that accompany their use, it is hardly surprising that the development of renewable energies has become a major priority in the world today. Andalusia, with a mean solar radiation of 4.75 kWh/m² per day and a surface area of 87,597 km², is the region in Europe with the highest solar energy potential. This research study determined the solar energy potential in Andalusia for grid-connected photovoltaic systems installed on residential rooftops. A methodology was developed for this purpose, which first involved a description of building characteristics, followed by the calculation of the useful roof surface area where photovoltaic arrays could be installed. In the next phase of the study, the mean solar irradiation characteristics were defined as well as the technical parameters of the photovoltaic systems. All of these factors allowed us to estimate the amount of electricity that could be potentially generated per year by solar panels. © 2010 Published by Elsevier Ltd.

Keywords: Renewable energy, Solar energy, Edification, Photovoltaic solar energy

1 INTRODUCTION

The analysis of the current energy production model and its comparison with the evolution of energy consumption clearly reflects the limited nature of conventional energy resources as well as the progressive deterioration of the environment, stemming from this kind of energy model [1, 2]. The dramatic increase in energy consumption in the European Union in recent years has brought with it a dependence on external energy sources that could reach 80% in 2020 if countermeasures are not rapidly taken. Fortunately, there is now a growing social awareness of the negative environmental impacts of fossil fuel energy as well as the environmental problems related to the use of nuclear energy. This new social conscience of environmental problems and possible solutions will have a direct effect on how energy challenges are met in the future. This will doubtlessly signify a reduction in fossil fuel energy consumption as well as an increase in the production of renewable energies or energies generated from natural resources. This new energy model should be based on energy sources that are sustainable from an environmental perspective and safe with little or no risk of accidents. Such sources should also be in large supply so as to ensure their long-term availability [3]. The increased use and advancement of renewable energies offer a viable solution for environmental problems caused by other energy sources [2]. For this reason, current European policies are focused on the development and use of renewable energy [6]. The residential sector, whose energy consumption in Europe is 30.2% of the total, is clearly in a position to initiate actions conducive to energy sustainability [3]. One possible solution, which is now an essential component of the energy policies of most countries, is the production of solar energy by means of building integrated photovoltaic systems, connected to the grid [4, 5]. The region of Andalusia is located in southern Spain, and has a total surface area of 87,597 km². With an average solar radiation of 4.75 kWh/m² per day [6, 7], it is the region in Europe with the highest solar energy potential for the production of this type of renewable energy [8, 9]. Furthermore, the large volume of residential building construction in recent years and the deficit of conventional energy sources justify any initiatives conducive to the construction of self-sustainable residential buildings that are capable of producing their own energy for illumination, HVAC, electrical appliances, etc. The installation of building-integrated photovoltaic systems is a viable option for the achievement of energy sustainability. The

objective of this research study was to calculate the energy capacity of grid-connected photovoltaic arrays that could be mounted on building roofs. For this purpose, we used statistical construction data as well as digital urban maps obtained from Google EarthTM to measure the useful roof surface area of a representative sample of buildings of the total population. Among the factors considered were: building type, orientation, roof tilt angle, location, shading, as well as other competing uses, such as air conditioning and heating installations, elevator shafts, roof terraces, or penthouses [10]. We were thus able to estimate the electrical energy potential by calculating the useful roof surface area of the buildings and by dimensioning the type of photovoltaic solar array to be mounted on the roofs. This study compares the technical potential of rooftop photovoltaic solar energy in Andalusia with the total energy consumption in the residential sector. The final section of the article presents the conclusions that can be derived from this study.

2 CONTEXT AND JUSTIFICATION

In recent years, an enormous effort has been made to develop models that explain how energy consumption is distributed in residential dwellings. Such models have analyzed this problem with a wide variety of different methods that range from econometric analyses to individual studies of residential building types, which were then extrapolated to the total set of buildings [11]. Moreover, many research studies have tried to estimate the solar energy potential in relation to the total roof surface area as well as the total surface area of the geographic area targeted in the study [4]. In this sense, Spain is in a position to play a key role in the implementation of renewable energy technology in Europe [6] due to its surface area, investments in large solar energy plants, and numerous research projects funded by public and private organisms. The objective of this research study was to calculate the solar energy potential of building rooftops, based on the dimensioning and design of photovoltaic arrays that could be mounted on these surfaces. For this purpose, we developed a model that was subsequently applied and validated in the geographic region of Andalusia (Spain).

3 METHODOLOGY

Our aim was to estimate the energy capacity of photovoltaic solar energy systems that could be installed on the rooftops of residential buildings in Andalusia. In order to achieve this research goal, we carried out the following actions (see [Fig. 1](#)):

- The building sector was described in terms of construction statistics published by the Spanish Ministry of Development. This analysis provided us with the gross roof surface area for each building type. This information was obtained for each of the eight provinces in the region of Andalusia.
- We selected a representative sample of buildings, and statistically analyzed their roof surface area. This allowed us to contrast the results of this sample with those obtained in the previous analysis.
- The geometric characteristics of three building types (i.e. detached and semi-detached houses, town houses and row houses, and high-rise buildings) were defined. This made it possible to obtain the useful roof surface where photovoltaic arrays could be installed.
- The photovoltaic solar array was then designed, and the energy generation potential was calculated for each of the eight provinces in Andalusia.

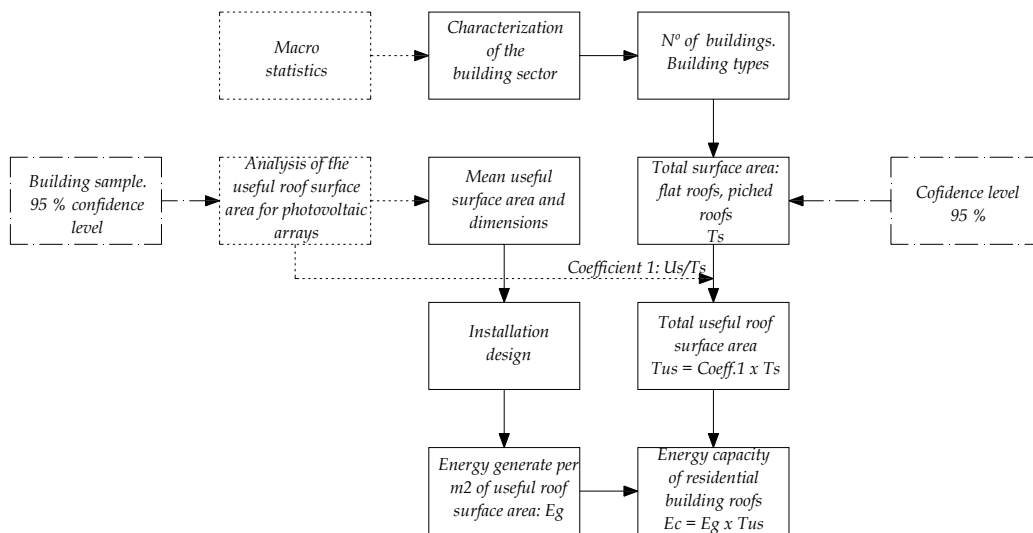


Fig. 1. Methodology.

The following sections describe the research phases in which the building types were characterized and the rooftop surface area obtained.

3.1 Building characterization. Total roof surface area

The statistical data used for this study refers to 2000–2007, and was compiled by the Spanish Government, more specifically, the General Directorate of Economic Programming, a subsection of the Secretary of State for Infrastructure, which is part of

the Ministry of Development. This information was obtained by means of a datacollection questionnaire, based on building licenses granted by city governments. These data are collected on a monthly basis by the Ministry of Development for all of Spain. The “no response” answer in a certain number of questionnaires was dealt with by stratifying city governments, according to province. This was done by calculating the expansion coefficients, based on the population of the municipalities and the number of licenses granted. The formula used was the following:

$$C_{ij} = P_{ij}/p_{ij} \cdot L_{ij}/l_{ij}$$

where C_{ij} is the elevation coefficient of stratum i in province j . P_{ij} is the population of the municipalities of stratum i in province j . p_{ij} is the population of the municipalities of stratum i in province j , who have answered the questionnaire. L_{ij} is the number of licenses granted in stratum i of province j . l_{ij} is the number of licenses with a questionnaire of stratum i in province j .

This expansion coefficient used the first factor P_{ij}/p_{ij} to correct the *no response* answer and L_{ij}/l_{ij} to correct the non-completion of the questionnaire. The final results were obtained by adding the questionnaires of each stratum-province and multiplying this figure by the expansion coefficient. The size of the sample, namely, the minimum number of municipalities received from each stratum (n), depended on the total number of municipalities (N), the desired confidence level (K), the variability of the building licenses granted (s), and the absolute error assumed for these licenses (e). The formula used was the following:

$$n = N^2 K^2 S^2 / (e^2 + N K^2 S^2)$$

Our study targeted all buildings with a residential function. Buildings were classified in three categories: (1) detached and/or semi-detached houses; (2) town houses or row houses; (3) high-rise apartment buildings. Based on statistical data collected for 2000–2007, we obtained the mean roof surface area for each building type (see example in Table 1).

BUILDING TYPOLOGY. 2007													
Province	Nº. Buildings (Unit)				Total Roof Surface Area (m ²)				Mean Roof Surface Area/Building (m ² /Unit)				
	0-2	3	4-5	6 or more	0-2	3	4-5	6 or more	0-2	3	4-5	6 or more	
Almería	1,540	774	351	292	220,873.0	252,667.4	180,916.9	80,536.9	143.4	326.4	515.4	275.8	
Cádiz	482	157	53	0	78,337.2	74,518.9	32,499.1	0.0	162.4	474.6	613.2	0.0	
Córdoba	1,261	366	89	0	273,456.0	84,565.6	31,204.9	0.0	216.9	231.1	350.6	0.0	
Granada	2,606	2,012	462	41	493,417.1	312,823.9	191,840.1	14,551.8	189.4	155.5	415.2	354.9	
Huelva	979	145	65	22	259,241.0	41,873.2	29,982.0	14,213.1	264.8	288.8	461.3	646.1	
Jaén	286	656	386	45	36,416.2	143,946.1	132,386.3	3,315.5	127.5	219.4	343.0	73.7	
Málaga	1,468	1,047	347	92	201,822.7	385,129.4	204,186.3	47,791.4	137.5	367.8	588.4	519.5	
Seville	1,730	641	78	47	225,315.7	98,788.6	26,239.0	43,623.3	130.3	154.1	336.4	928.2	
Total	10,352	5,798	1,831	539	1,788,878.9	1,394,313.1	829,254.7	204,032.1	171.5	277.2	452.9	349.8	
Total buildings (UD)				18,520	Total surface area (m²)				4,216,478.7				

Table 1. Mean roof surface area for high-rise apartment buildings in 2007.

The calculation of the number of buildings and their total roof surface area allowed us to obtain the mean roof surface area for each building type and each year studied. This operation was repeated for each year and building type in order to obtain the surface area for each province in Andalusia. For the rest of the building types and years, we obtained the mean roof surface areas of each building type for new housing constructed in 2000–2007. These figures were used to estimate the roof surface area of the total number of buildings (Table 2).

Year	Nº. Buildings (UD)				Mean Roof Surface Area (m ² /building)		
	Detached Houses	Townhouses	High-rise Buildings	Total	Detached Houses	Townhouses	High-rise Buildings
2000	105	423	686	1,214	235.42	188.61	186.61
2001	140	559	738	1,437	210.74	173.48	181.56
2002	260	1,152	951	2,363	182.66	154.36	188.22
2003	265	755	1,206	2,226	209.99	198.87	197.51
2004	408	1,151	1,505	3,064	201.37	182.49	183.94
2005	499	993	1,725	3,217	221.62	204.89	175.40
2006	355	877	2,053	3,285	233.83	272.60	227.33
2007	195	581	1,716	2,492	370.22	257.67	226.84
				Weighted Mean	226.87	201.36	199.86

Table 2. Mean roof surface area, according to building type (Province of Córdoba) in 2007.

Table 3 shows the data obtained for all of the provinces in Andalusia. It includes the mean roof surface area for each building type, which was used to obtain rooftop energy capacity. The total number of residential buildings in Andalusia is approximately 1,400,000. To obtain this information, we updated the housing census of 2001 by including information from the final building completion certificates, annually published by the Ministry of Development.

Province	Total N° of Buildings(UD)	Building Types (UD)			Flat-Roof Buildings (UD)			Pitched Roof Buildings (UD)		
		Detached House	Town-house	High-rise Building	Detached House	Town-house	High-rise Building	Detached House	Town-house	High-rise Building
Almería	90,134	12,180	26,997	50,957	7,554	16,744	31,605	4,626	10,253	19,352
Cádiz	155,625	17,962	52,349	85,314	8,322	24,254	39,526	9,640	28,096	45,788
Córdoba	132,643	29,941	54,933	47,769	12,481	22,899	19,912	17,460	32,035	27,857
Granada	147,522	33,299	61,095	53,127	7,698	14,124	12,282	25,601	46,971	40,845
Huelva	100,765	8,982	44,525	47,258	3,240	16,061	17,047	5,742	28,464	30,211
Jaén	127,655	15,852	68,639	43,164	2,526	10,939	6,879	13,326	57,701	36,285
Málaga	286,532	64,329	89,363	132,841	18,794	26,108	38,810	45,535	63,255	94,030
Seville	357,996	55,271	159,095	143,631	30,284	87,172	78,699	24,986	71,923	64,932
Total	1,398,871	237,814	556,996	604,061	90,899	218,300	244,760	146,915	338,697	359,301

Table 3. Characterization of the total number of residential buildings in Andalusia according to roof type.

We extrapolated the characterization of the sample for 2000– 2007 to the total population. This allowed us to obtain the number of buildings, according to building type (detached house, town house, or high-rise building) and roof type (flat or pitched). Table 4 shows the roof surface area of the total number of residential buildings in Andalusia.

Province	Total Flat Roof Surface Area (m ²)			Total Pitched Roof Surface Area (m ²)			Total (thousands of m ²)
	Detached House	Town-house	High-rise Building	Detached House	Town-house	High-rise Building	
Almería	1,563,352.41	3,095,629.80	7,542,885.95	957,257.63	1,895,487.68	4,618,590.84	19,673.20
Cádiz	2,100,249.63	4,178,612.16	8,963,327.45	2,432,965.67	4,840,576.94	10,383,274.28	32,899.01
Córdoba	2,831,505.55	4,610,890.91	3,979,771.24	3,961,158.62	6,450,444.81	5,567,534.61	27,401.31
Granada	1,481,976.63	2,209,545.57	2,357,910.11	4,928,473.86	7,348,083.18	7,841,485.53	26,167.47
Huelva	631,367.86	2,258,196.75	3,458,535.72	1,118,951.74	4,002,125.11	6,129,444.94	17,598.62
Jaén	443,449.89	1,683,831.08	1,131,443.70	2,339,157.46	8,882,054.35	5,968,261.68	20,448.20
Málaga	4,834,293.29	4,311,052.34	9,745,234.92	11,712,635.70	10,444,915.62	23,610,976.71	64,659.11
Seville	5,211,443.61	12,795,433.17	13,050,049.46	4,299,815.55	10,557,152.01	10,767,228.75	56,681.12
Total	19,097,638.89	35,143,191.77	50,229,158.54	31,750,416.22	54,420,839.70	74,886,797.32	265,528.04

Table 4. Roof surface area of the total number of buildings in Andalucía.

3.2 Useful roof surface area

The available roof surface area was obtained by selecting a representative sample of the population under study, namely the residential buildings in Andalusia. This was calculated from urban maps obtained from Google EarthTM. These maps were exported and scaled with the AutoCAD[®] software application.

This allowed us to obtain data, such as the roof surface area, the surface area of elements that could interfere with the photovoltaic system, the shaded area, and the surface occupied by other installations, such as HVAC, elevator shafts, antennas, etc. (Figs. 2 and 3).



Figures 2 and 3. Calculation of the useful roof surface area, free of obstacles and shading.

Source: Google Earth™.

The size of the sample was determined by random stratified sampling since the population under study had been previously divided into subpopulations (homogeneous strata for the characteristic being studied). An unrestricted random sample was independently selected for each stratum. An estimator was obtained for each stratum, which was calculated as an adequate weighting of the estimates. The stratified sampling technique used was proportionate allocation based on the fact that the size of each stratum of the sample was proportional to its size within the population [12].

$$n = \frac{\sum \frac{W_h^2 * s_h^2}{w_h}}{V + \frac{1}{N} * \sum W_h * s_h^2}$$

where n is the size of the sample; N is the total number of units; W_h is the weighting of the stratum (N_h/N); w_h is the weight that stratum h has in the sample (n_h/n); n_h is the number of sample units for each stratum; V is the anticipated variance, based on the margin of error (d^2/t^2); d is the chosen margin of error ($\bar{y} - \bar{Y}$); t is the

confidence coefficient (1.96 to the 95 % confidence level for a normal distribution (0,1)); s_h^2 is the estimated variance of each stratum h ($\frac{1}{n_h - 1} * \sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \bar{y}_h)^2$).

The margin of error in the sample was 10%. Since the true variance of the population of each stratum h was unknown, we selected a small sample from the population of each stratum, and called it the pilot sample. Subsequently, we estimated the population variance in each of these samples for each building type. Finally, we applied the formula to estimate the size of the sample, and multiplied the sample size by each W_h , thus obtaining the population size of each stratum (Table 5).

Typology	$N_h = n_h$	$W_h = w_h$	s_h^2	n
Detached and semi-detached houses	196,691	0.14	2,065.62	111
Townhouses and row houses	476,889	0.34	561.32	269
High-rise buildings	725,291	0.52	38,692.27	409
N	1,398,871	1		789

Table 5. Sample size, according to stratum.

This analysis allowed us to verify the previous data. For example, in the case of detached and semi-detached houses in Andalusia, the mean roof surface at a confidence level of 95% occurred within interval ($\eta \pm 1.96 \cdot \sigma / \sqrt{(p-n)/(p-1)}$) and was 215.79 m². The mean value, calculated by the previously described statistical analysis, was found to be 210.33 m², which was also within this interval. The comparison of data obtained with these two methods confirmed their goodness of fit.

Once the reliability of the data was confirmed by the previously described graphs, we determined the mean percentage of the useful surface area after eliminating the area occupied by elements interfering with the photovoltaic array. Table 6 shows the coefficient values that represent the gross surface area necessary to install the photovoltaic solar system.

	Detached and semi-detached houses		Townhouses or row houses		High-rise buildings	
	Flat roof	Pitched roof	Flat roof	Pitched roof	Flat roof	Pitched roof
Coeff. Su/ST	0.740	0.974	0.796	0.983	0.654	0.789

Table 6. Relation coefficient to obtain the useful roof surface area, free of obstacles.

3.3 Installation design

Figure 8 shows the diagram of a roof-mounted photovoltaic system connected to the grid. It is composed of the following elements: (i) photovoltaic module; (ii) inverter/power conditioner; (iii) meters; (iv) connection to a conventional electrical grid (Fig.4).

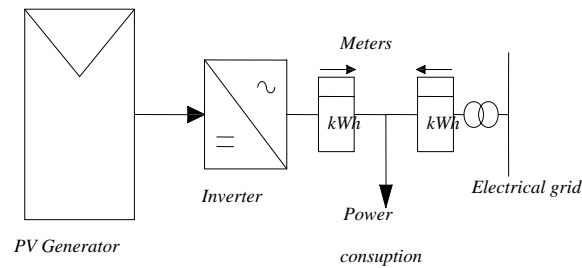


Figure 4. Diagram of a grid-connected photovoltaic solar system.

The expression used to estimate the energy (kWh/day) generated by the system is the following [13]:

$$E_p = G_{dm}(\alpha, \beta) \cdot P_{mp} \cdot PR / G_{CEM}$$

where $G_{dm}(\alpha, \beta)$ is the annual and monthly mean value of the daily irradiation on the solar generator in kWh./m²día; P_{mp} is the peak generator power; G_{CEM} is 1 kWh/m²; PR is the performance ratio.

To estimate the influence that the choice of photovoltaic panel can have on the final result, we calculated the energy for two installations with different types of panel. The photovoltaic panel chosen for the installation design was manufactured by ISOFOTON. This company has its factory in Andalusia and its production in MW was 4.5% of the total world market for photovoltaic cells in 2004.

3.3.1 Installation type 1

The first installation type was composed of *IS-170* photovoltaic modules manufactured by ISO FOTON, which had the following characteristics at standard test conditions:

- Dimensions: 790 ± 5 mm x 1600 ± 5 mm x 40 ± 2 mm.
- Maximum power rating: 170 W $\pm 3\%$ W.
- Open circuit voltage: 44.4 V.
- TONC (800 W/m², 20 °C, AM 1.5, 1 m/s) 47 °C.

3.3.2 Installation type 2

The second installation type was composed of *IS-220* photovoltaic modules also manufactured by ISO FOTON, which had the following characteristics at standard test conditions:

- Dimensions: 1047 ± 5 mm x 1600 ± 5 mm x 40 ± 2 mm.
- Maximum power rating: 220 W $\pm 3\%$ W.
- Open circuit voltage: 47.9 V.
- TONC (800 W/m², 20 °C, AM 1.5, 1 m/s) 47 °C.

Once the modules were defined, we obtained the elevations and layout of the photovoltaic array for the previously defined mean roof area surfaces. Our purpose was to determine the energy produced by the solar energy installation per unit of useful roof surface area (see Figures 5, 6-7).

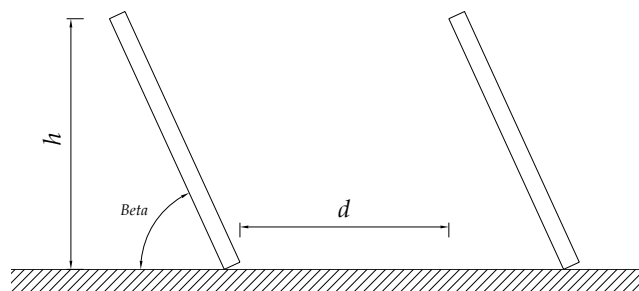


Figure 5. - Distance between solar panels

The distance between photovoltaic modules were calculated by means of the following expression:

$$d = h/\tan (61^{\circ}-\lambda)$$

In the case of a flat roof, a perimeter space with a width of 1 m was considered necessary for maintenance work. We then calculated the number of solar panels that could be installed for the orientations shown in Figure 6 (flat roofs) and Figure 7 (pitched roofs).

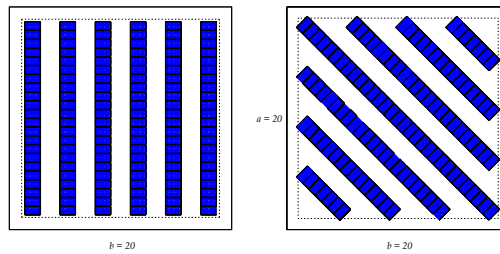


Figure 6. Theoretical siting of the photovoltaic modules for two orientations.
Flat roofs. IS-170 Modules.

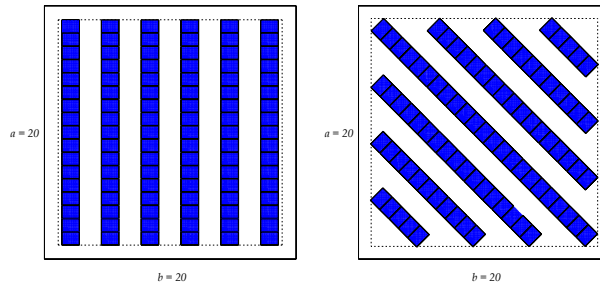


Figure 7. Theoretical siting of photovoltaic modules for two orientations.
Flat roofs. IS-220 Modules.

For pitched roofs, our initial hypothesis was that the photovoltaic system would be installed on the roof façade receiving the largest amount of solar irradiation, and thus, the most energy. The array of solar panels would be attached to one of the roof sides. The mean roof tilt angle obtained from the analysis of a set of projects was found to be 16.708°. For the purpose of calculating the mean radiation, the S-E orientation was

considered to be the most representative, and the solar panels would be mounted on the side of the roof that was most favorable to this orientation (see Figure 8).

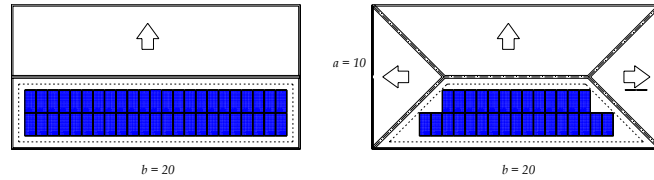


Figure 8.- Theoretical siting of IS-170 photovoltaic modules for two types of pitched roof

After obtaining the useful surface area for the location of photovoltaic arrays and defining the roof layout, we calculated the photovoltaic solar energy potentially generated. To calculate losses from shading, the shadows produced by various construction elements (e.g. chimneys, elevator shafts, etc.) were studied by using the AutoCAD[®] software program (see figure 9).

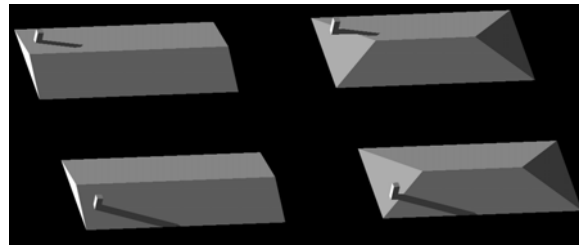


Figure 9.- Shadow projection for different days and times. Pitched roof and chimney.

The percentage of solar irradiation loss from shading was obtained by the representing the profile of the obstacle on the roof in the context of a band of the sun's trajectories during the year. As an example, figure 10 shows an elevator shaft located on the roof of a building.

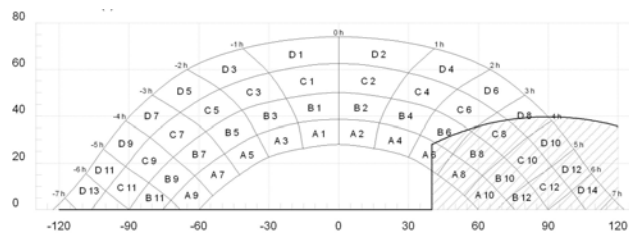


Figure 10.- Percentage of solar irradiation loss from shading for an elevator shaft located on a building roof: 17.47%.

The criterion followed in this study, which is based on the *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red* [14] [Technical Specifications for Grid-Connected Installations] was to eliminate roof surfaces with a solar irradiation loss from shading greater than 10%.

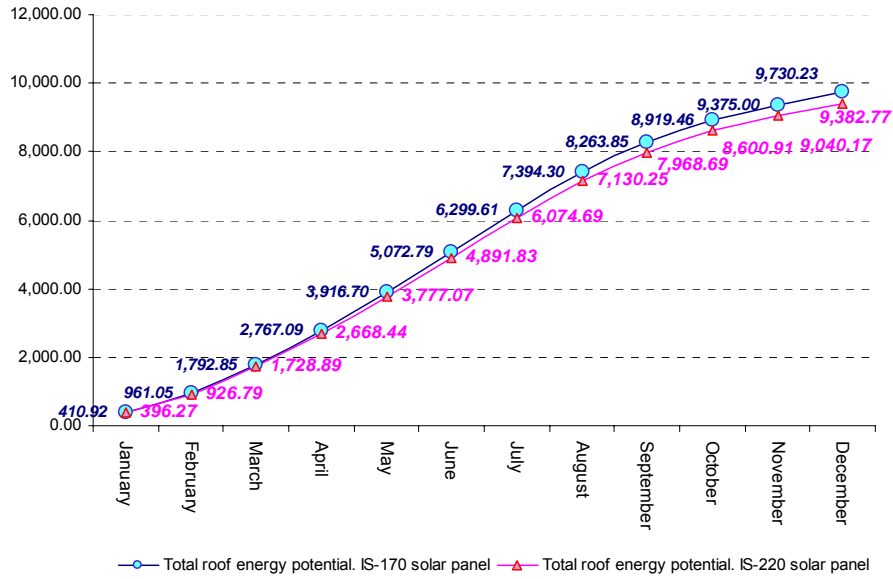
4 RESULTS

The roof surface area for all residential buildings in Andalusia was found to be 265.52 Km²: 104.47 for buildings with flat roofs and 161.05 Km² for buildings with pitched roofs. The useful rooftop surface area, where a photovoltaic array could be mounted was 218.52 Km², which comes to 82.29% of the total. The surface occupied by a photovoltaic array of IS-170 solar panels for each roof type is shown in Table 7.

<i>FLAT ROOF</i>			<i>PITCHED ROOF</i>		
Detached Houses	Town-houses	High-rise Buildings	Detached Houses	Town-houses	High-rise Buildings
54.97%	53.72%	51.83%	21.12%	20.19%	16.83%

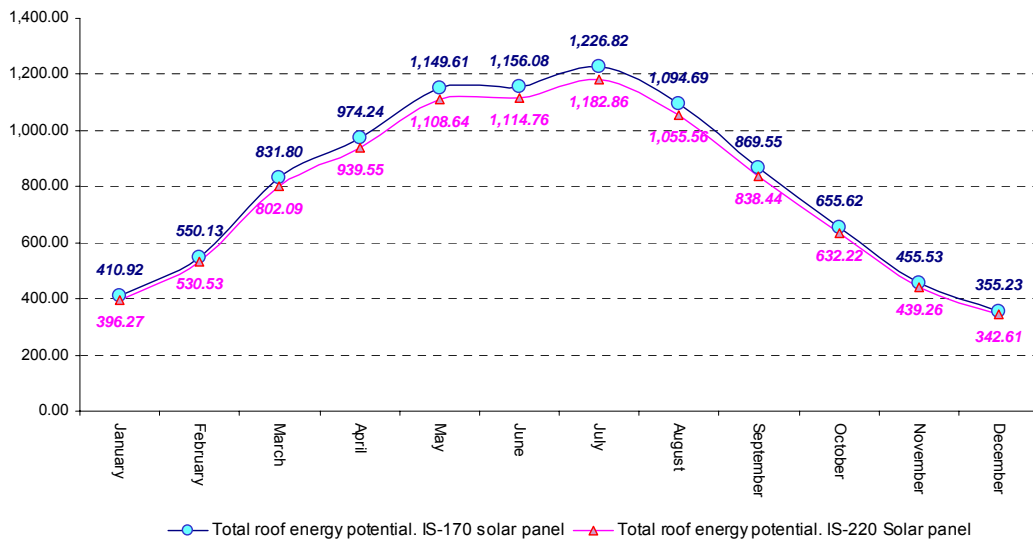
Table 7. Percentage of roof surface area occupied by Installation type 2

For a photovoltaic array of IS-220 solar panels, the occupation coefficient for flat roofs has the same value. For pitched roofs, the value is also very similar. For example, in the case of high-rise buildings, this value is 16.44 % for flat roofs as compared to 16.83 % for pitched roofs. The energy generation potential was estimated to be a total of 9,73 GWh for a photovoltaic array of IS-170 solar panels, and 9,38 GWh for an array of IS-220 solar panels (see Graph 1). The maximum photovoltaic potential for rooftop surfaces of residential buildings in Andalusia was thus calculated at 10,8 GWh/year.



Graph 1. Total energy (GWh) generated by each solar panel type. Monthly accumulation.

The monthly distribution is represented on Graph 2.



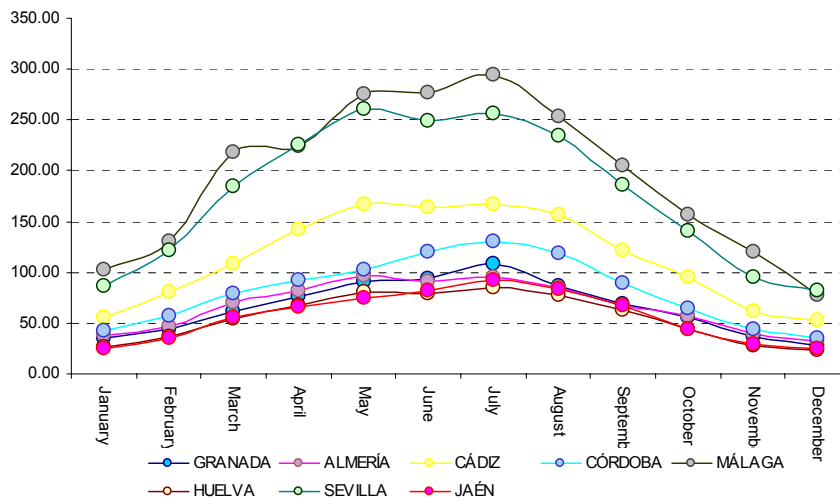
Graph 2. Total energy (GWh/month) generated monthly by each solar panel type

The energy capacity for each roof type and m² of roof surface area for each province as well as the hypotheses of this research study are defined by the following ratios in Table 8:

	<i>NET COEFFICIENTS</i>		<i>GROSS COEFFICIENTS</i>	
	FLAT ROOF	PITCHED ROOF	FLAT ROOF	PITCHED ROOF
PROVINCE	kWh/m²·year	kWh/m² year	kW/m²·year	kWh/m²·year
Almería	69.51	40.13	46.26	31.54
Cádiz	75.34	43.50	50.20	34.40
Córdoba	63.89	36.39	43.05	30.20
Granada	57.66	33.28	38.79	27.42
Huelva	70.53	40.71	47.02	32.39
Jaén	65.23	37.65	43.83	31.08
Málaga	68.78	39.71	46.08	32.01
Sevilla	64.48	37.22	43.26	30.38

Table 8. Ratios referring to the energy generation capacity per m² of roof-top surface area

The energy distribution for each Andalusian province is represented in Graph 3.



Graph 3. Photovoltaic solar energy. Monthly production (GWh/month)

As previously mentioned, the total energy accumulated month by month during the year for the total number of buildings was approximately 9.5 GWh/year. Of this amount, 5.0 GWh (51.5% of the total) could be generated by buildings with pitched roofs, and 4.5 GWh (48.5 % of the total) could be generated by buildings with flat roofs.

5 CONCLUSIONS

In 2006, the energy consumption for uses related to the residential housing sector in Andalusia was 12,320 GW/year. The photovoltaic solar energy capacity for residential building rooftops in Andalusia if photovoltaic arrays were installed on all of them was calculated at 9.73 GW/year for a total roof surface of 265.52 Km².

This would satisfy 78.89% of all energy needs, and would signify an external energy dependence of only 21.02%. Even this figure could be vastly improved if energy efficiency was increased and energy consumption was reduced. This seems to indicate that energy sustainability of residential dwellings in Andalusia is totally viable if the measures proposed in this study are taken.

This research clearly shows the importance of the design of roof-mounted elements when it comes to optimizing energy production.

REFERENCES

- [1] Xiaowu W, Ben H. Energy analysis of domestic-scale solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2005;639–45.
- [2] Jefferson Michael. Sustainable energy development: performance and prospects. *Renewable Energy* 2006;31:571–82.
- [3] Jäger-Waldau Arnulf. Photovoltaics and renewable energies in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007;11:1414–37.
- [4] Celik A. Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid connected photovoltaic-house. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2006;10:370–87.
- [5] Bojic M, Blagojevic M. Photovoltaic electricity production of a grid-connected urban house in Serbia. *Energy Policy* 2006;34:941–2948.
- [6] Arán Carrión J, Espín Estrella A, Aznar Dols F, Ramos Ridaio A. The electricity production capacity of photovoltaic power plants and the selection of solar energy sites in Andalusia (Spain). *Renewable Energy* 2008;33:545–52.
- [7] Ordóñez García Javier, Gago Eulalia Jadraque, Bayo Javier Alegre, Montes Germán Martínez. The use of solar energy in the building construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007;11:2166–78.

[8] Ramos Ridaó Ángel, García Ernesto Hontoria, Escobar Begoña Moreno, Montserrat Zamorano Toro. Solar energy in Andalusia (Spain): present state and prospects for the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007;11:148–61.

[9] Sidrach-de-Cardona M, Mora López Ll. Evaluation of a grid-connected photovoltaic system in southern Spain. *Renewable Energy* 1998;15:527–30.

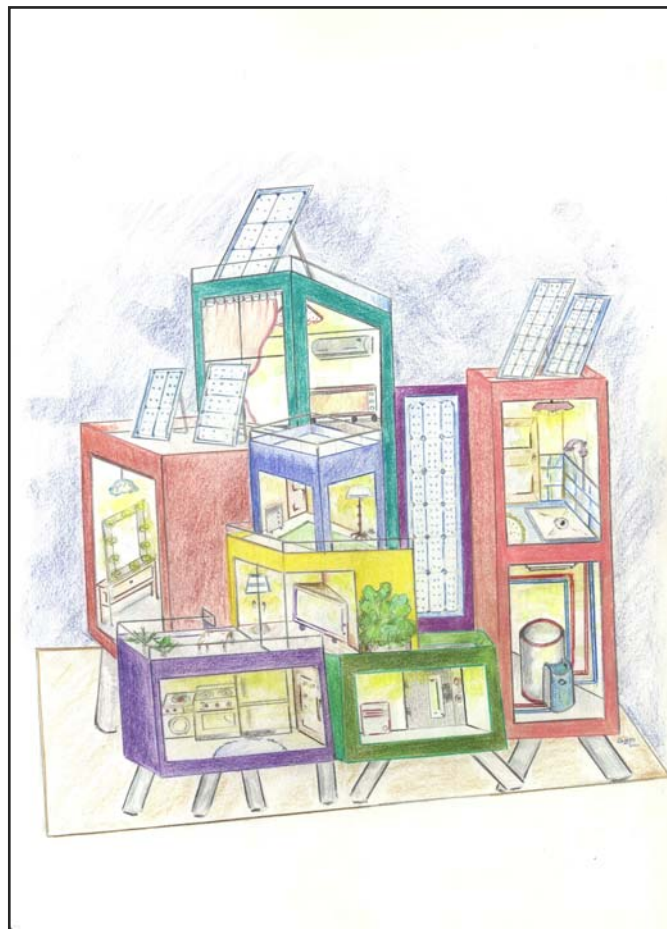
[10] Izquierdo Salvador, RodriguesMarcos, Fueyo Norberto. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy* 2008;82:929–39.

[11] Lukas G. Swan, V. Ismet Ugursal. Modelling of end-use energy consumption in the residential sector. A review of modelling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009,13:1819–1835.

[12] William G. Cochran. Professor of Statistics. Harvard University. *Sampling Techniques*. C.E.C.S.A. April 1975.

[13] Méndez J, Cuervo R. *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: FC Editorial; 2008, ISBN-3: 978-84-96743-45-8.

[14] IADE. *Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones conectadas a Red*; 2002.



Capítulo V: Modelo Energético

DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL FOR THE RESIDENTIAL SECTOR: ELECTRICITY CONSUMPTION IN ANDALUSIA (SPAIN)

E. Jadraque, A. Espín, J. Ordóñez

Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain

Abstract

Electrical energy consumption in the residential sector has soared over the years. This is largely due to the growing number of residential housing units. The development of models allows us to estimate and predict the evolution and behavior of electricity consumption in this sector as well as its end-uses. The data thus obtained are extremely useful for the elaboration of energy-saving measures that can enhance energy efficiency. In June 2008 the Spanish government approved a set of guidelines in the document titled, *Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia* [Spanish Strategy for Climate Change and Clean Energy]. Its main objective was to replace conventional incandescent light bulbs with energy-saving light bulbs in the residential sector. This process would be carried out over a three-year period. This article describes the design, development, and application of a model capable of calculating electricity consumption for lighting in the residential housing sector. These results were reinforced by data from questionnaires administered to a representative sample of households. Finally, this energy model was applied to Andalusia. This allowed us to obtain the savings in electricity consumption for lighting when the objectives in the Spanish strategy for energy conservation had been achieved. © 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Lighting, Edification, Energy consumption, Energy model.

1 INTRODUCTION

In Spain the residential sector is responsible for 10% (10,793 ktep) of the total energy consumption [1] in the country. A residential building can be defined as any structure, in which at least 50% of its useful surface is continuously inhabited by people, regardless of whether the building fulfills a secondary function, and whether the inhabitants of the building live there either temporarily or permanently [2].

From 2000 to 2006, the number of housing units increased by 90.35%, reaching a total of 23,859,014 in 2006 [3]. Not surprisingly, this growth was accompanied by a corresponding increase in electricity consumption in the residential housing sector. For example, in Andalusia, the distribution of electricity consumption in 2006 (35,342 GWh) was the following: residential sector, 34.9% (12,320 GWh); service sector, 33.4% (11,807 GWh); industrial sector, 26.5% (9,367 GWh); primary sector, 4.1% (1,455 GWh); and transportation sector, 1% (393 GWh) [4]. The importance of electricity consumption in the residential sector justifies the development of models capable of calculating different end-uses (HVAC, appliances, lighting, water heating, plumbing, etc.), which depend on electricity. In fact, several such models have been developed and proposed [5-9].

Energy efficiency in residential housing units is currently a priority in national and international energy policies [10,11]. The document titled *La Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España* [Strategy for Energy Conservation and Efficiency in Spain] [1], proposed a series of guidelines until 2010 for the reduction of energy consumption for lighting in buildings. For example, one of these guidelines was the replacement of conventional incandescent light bulbs with energy-saving light bulbs. In June 2008, the Spanish government enacted the strategic measures proposed in *Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia* [Spanish Strategy for Climate Change and Clean Energy]. Its main objective is the progressive replacement in a three-year period of conventional incandescent light bulbs with energy-saving light bulbs in the residential sector [12]. The following sections describe a model which was used to obtain the electric energy consumption for lighting in the residential sector in Andalusia with a view to evaluating the energy-saving measures implemented by the Spanish government.

2 OUTLINE THE MODEL

The model developed in this research study (see Figure 1) was used to calculate the electricity consumption for lighting as the product of the total nominal power used in households in accordance with the hours of energy consumption. The total nominal power was calculated by determination of the local median illumination, which allowed us to obtain the number and type of luminaires or lamps needed to provide the desired average level of illuminance. This calculation took into account both the direct as well as the reflected luminous flux, taking into account a series of factors like the type of housing unit, illumination units, and light source characteristics. The data regarding the types of light source (incandescent, fluorescent, halogen, low energy consumption) were obtained by questionnaires administered to a representative sample of the population.

The hours of electricity consumption were estimated by taking into account the hours of daylight, activity of the household occupants, results of the questionnaire, and the consumption models of other authors. We then contrasted the results of our model with the consumption obtained from the statistical analysis of the questionnaire data and with the consumption values obtained by other authors.

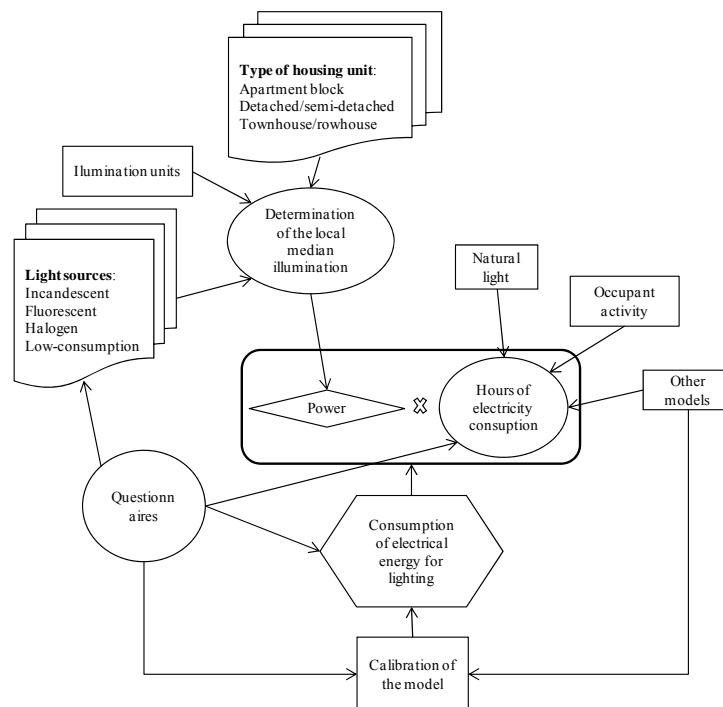


Figure. 1. Structure of the model.

3 CALCULATING ELECTRICAL POWER BY DETERMINATION OF THE LUMINOUS FLUX

3.1 Units and systems of illumination

An illumination unit is regarded as one or more luminaires connected to a switch. The number of illumination units installed, specific illumination, technologies used, and electrical power values vary from one house to another, depending on the choice of the users. For the calculation of these parameters, the model estimates by determination of the luminous flux the minimum number of luminaires necessary for each space or room in the household, which guarantee a mean level of illumination [13] that permits the optimal performance of activities by household members.

Luminous flux (Φ) can be defined as the quantity of light emitted in all directions by a source of visible light per time unit [14]. It is the function of the surface area of the space (S), illuminance level (E_m), use coefficients of the space (f_u), and the conservation of the lamps and luminaires (f_c). Its unit of measurement is the lumen, which is given by the following expression [15]:

$$\Phi = \frac{E_m * S}{f_u * f_c}$$

The luminous flux depends on the power (W) and performance of the lamp-luminaire (η) chosen to light the room, and is represented by the formula below [15]:

$$\Phi = \eta * W$$

In this way it was possible to obtain the power needed for lighting, which, when multiplied by the number of hours that these luminaires were switched on, gave the electricity consumption. In order to know the types of light source used in each household (e.g. incandescent, halogen, fluorescent, low-energy consumption, etc.), these data were extracted from questionnaires administered to households in 2009.

Before this data collection process, the questionnaire was first piloted to a representative sample of randomly selected households with a view to detecting errors

or inconsistencies. These pilot results were not included in the data set presented in this study. The questionnaire included information pertaining to the light sources, such as the number and type of light bulbs used in the house as well as the number of hours that they were turned on.

For each type of housing unit (apartment block, detached/semi-detached houses, and row houses/townhouses), a percentage was obtained that indicated the use of light bulb types (incandescent, halogen, fluorescent, low energy consumption, and others) in each housing category (see Table 1).

	Apartment block	Detached/ Semi-detached housing units	Row houses/Townhouses
Incandescent	38	29	31
Halogen	28	6	49
Fluorescent	7	3	2
Low energy consumption	27	61	18
Others	0	1	0

Table 1. Percentages of types of light bulbs for different housing profiles.

4 CHARACTERIZATION OF RESIDENTIAL HOUSING UNITS

In 2006 Andalusia had a total of 4,163,281 housing units [3], which amounted to 17.5% of all housing in Spain [16]. Andalusia is also the leading region in Spain in the construction of new homes. In fact, 20.7% of all new housing units in 2006 were built in this region [17]. Statistical data were collected for 2004-2006 to characterize the housing units in Andalusia. This information was obtained from the *Dirección General de Programación Económica* [Directorate General of Economic Programming], an agency of the *Secretaría de Estado de Infraestructuras* [State Department for Infrastructure], which is a subsection of the *Ministry of Fomento* [Ministry of Public Works] in Spain. In Spain the *Ministerio de Fomento* collects data on a monthly basis for the whole country. The treatment of the response, “no answer given”, on certain questionnaires was handled by stratifying city halls in provinces by calculating expansion coefficients based on the city population and the number of licenses granted. The formula used was the following:

$$C_{ij} = \frac{A_{ij}}{a_{ij}} \times \frac{B_{ij}}{b_{ij}}$$

where C_{ij} is the elevation coefficient of stratum i in province j , A_{ij} is the population of towns of stratum i in province j , a_{ij} is the population of towns of stratum i in province j , who answered the questionnaire, B_{ij} is the number of licenses granted in stratum i in province j , b_{ij} is the number of licenses of stratum i in province j with a questionnaire.

This expansion coefficient uses the first factor A_{ij}/a_{ij} to correct the refusal to answer, and B_{ij}/b_{ij} to correct the non-completion of questionnaires. In order to obtain the final results, questionnaires of each stratum-province were added, and the resulting figure was multiplied by the coefficient. The size of the sample (i.e. the minimum number of towns that should be received from each stratum (n)), depends on the total number of towns (N), the desired confidence level (K), the variability of the licenses granted (s), and the absolute error assumed for these licenses (e) [18]. The formula used was the following:

$$n = \frac{N^2 * K^2 * S^2}{(e^2 + N * K^2 * S^2)}$$

The study focused on buildings with a mainly residential use. After the statistical treatment of data from 2004, 2005, and 2006, we then analyzed a series of building-design parameters, such as building type, surface, number of rooms, etc. Three categories were defined, which were representative of different residential building types (i.e. detached/semi-detached, row house/townhouse, and apartment block), and which define the sample (see Table 2).

Housing unit types	N° of housing units
Detached/Semi detached houses	333,516
Row houses/ Townhouses	788,768
Apartment blocks	3,040,997
TOTAL	4,163,281

Table 2. Type and number of residential housing units in Andalusia (based on data from the *Ministerio de Vivienda* and the *Ministerio de Fomento*).

This allowed us to obtain the mean design parameters to define three basic residential housing types.

(a) *Apartment block*: The typical apartment building has a ground floor as well as two upper floors. The mean number of rooms per dwelling in the sample is two bedrooms, living-dining room, half bath, full bathroom, and kitchen.

(b) *Detached/semi-detached housing unit profile*: This building has a ground floor as well as an upper floor. The mean number of rooms for the sample was the following: three bedrooms, living-dining room, half-bath, full bathroom, and kitchen [17].

(c) *Row houses/Townhouses*: This housing unit profile has a ground floor and upper floor. The average number of rooms per dwelling is three bedrooms, living-dining room, half bath, full bathroom, and kitchen [17].

We then obtained the number of occupied housing units of the total number of houses, which are potential sources of electricity consumption. The statistical data was obtained from the Spanish Ministry of Housing (see Table 3) [19].

Housing unit types	N° of occupied housing units
Detached/Semi detached houses	281,488
Row houses/ Townhouses	665,720
Apartments	2,566,601
TOTAL	3,513,809

Table 3. Final distribution of housing unit types based on data from the Spanish Ministry of Housing and the Spanish Ministry of Public Works.

5 NUMBER OF LUMINAIRES AND NOMINAL POWER

The number of luminaires and the nominal power of the installation (Table 4) were obtained on the basis of the following: (i) the different types of light source (Table 1); (ii) the building characterization that defines the ground plan of each housing unit profile; (iii) the luminous flux necessary in each room or living space of the dwelling, obtained with the previously mentioned formulas.

Housing unit types	Total number of luminaires	Total nominal power
Detached/Semi detached houses	47	1,896.00
Row houses/ Townhouses	40	2,400.00
Apartments	122	6,470.00

Table 4. Total number of luminaires, and total nominal power.

6 NATURAL LIGHT

Human perception of the level of natural light within a building is a key factor in determining the use of electrical light [20-22]. Our model is based on a series of hypotheses pertaining to the hourly consumption of electricity in each housing unit, depending on the season of the year. For this purpose, January, February, March, November, and December were considered to be winter months, whereas April, May, June, July, August, September, and October were regarded as summer months. For this classification, we took into account the time changes at the beginning of the spring and fall since this modifies the electrical light necessary to carry out daily activities in the buildings, and thus, their electrical consumption [23].

7 HOUSEHOLD PROFILES

The number and activity of the people living in the house is another key factor in determining the electricity consumption in lighting [21,24-26]. Current social tendencies such as retirement age, age structure, welfare system, vacation periods and social life are fundamental when analyzing energy consumption in family households [27,28]. The presence in the home of family members affects energy consumption. Retirees are not the only ones who spend a lot of time at home. Others who remain at home for long periods of time are couples who obtain maternity/paternity leave, not to mention those family members that work from home. Furthermore, it is also necessary to know when the residence is generally empty, and as a result, one must also take into account working days and holidays.

The population demographics in Andalusia are similar to that in Spain and other European countries, though with certain distinctive characteristics. Generally speaking, population aging is progressing rapidly in Andalusia, and there is a loss of demographic

power, stemming from declining fertility and the low birth rate [29]. This can influence electricity consumption for lighting since there are hypotheses that show that older people (age 65 or more) consume less electricity for lighting than younger age groups [25].

This research is based on a study carried out in 2006 by the *Instituto de Estadística de Andalucía* [30] [Andalusian Institute of Statistics]. Table 5 shows the values obtained for household type, average household size, and the number of households.

Profile no.	Household profile	Average household size	Number of households (per thousand)
Profile 1	Couple with children	3.95	1,391.90
Profile 2	Couple without children	2.10	438.00
Profile 3	Parent with children	2.85	250.10
Profile 4	Single-member family	1.00	448.20
Profile 5	Multi-member family	2.40	44.80
TOTAL			2,572.90

Table 5. Family structure of Andalusian households based on data from the *Instituto de Estadística de Andalucía* [Andalusian Institute of Statistics].

Based on the residential building type obtained from the questionnaires and on the characteristics of Andalusian families, we obtained the distribution of households per building type (see Table 6).

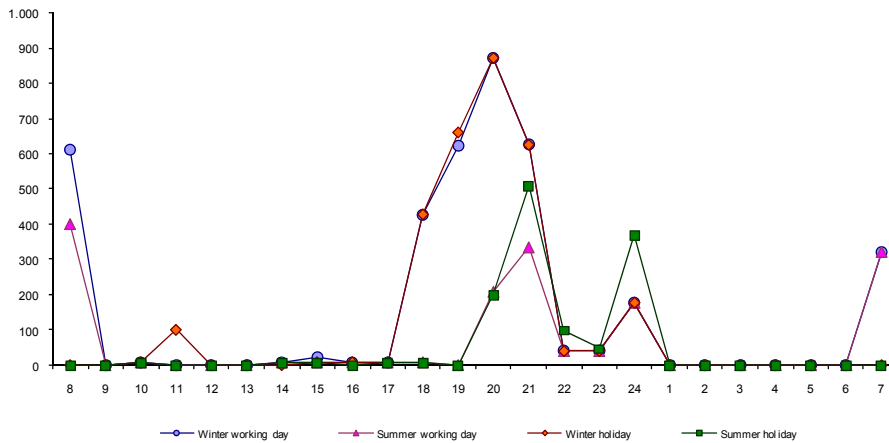
	Detached/Semi-detached house	Row house/Townhouse	Apartment block
Profile 1	111,503.64	263,707.08	1,016,689.28
Profile 2	35,087.72	82,982.76	319,929.53
Profile 3	20,035.25	47,383.53	182,681.22
Profile 4	35,904.83	84,915.23	327,379.94
Profile 5	3,588.88	8,487.73	32,723.39
TOTAL	206,120.31	487,476.34	1,874,403.35

Table 6. Number of households per residential building type based on data from the *Instituto de Estadística de Andalucía* and our questionnaire

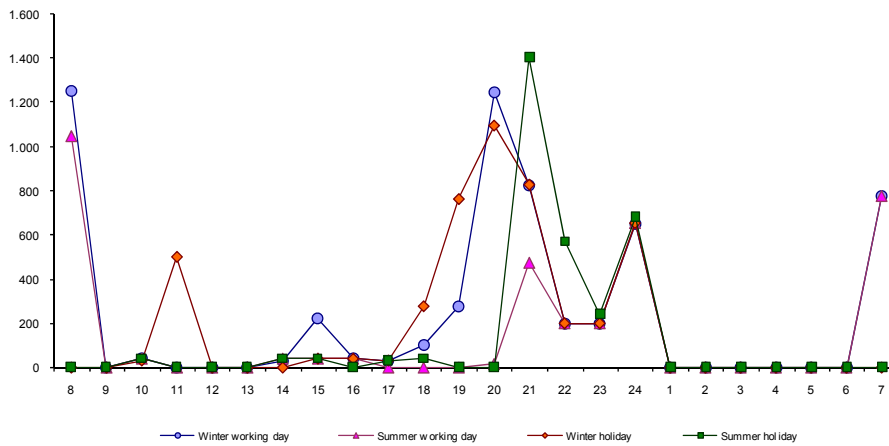
8 CALCULATION OF THE ELECTRICITY CONSUMPTION FOR LIGHTING

The electrical energy consumed for lighting was obtained as a product of the hours of consumption of the various household profiles in each of the residential building

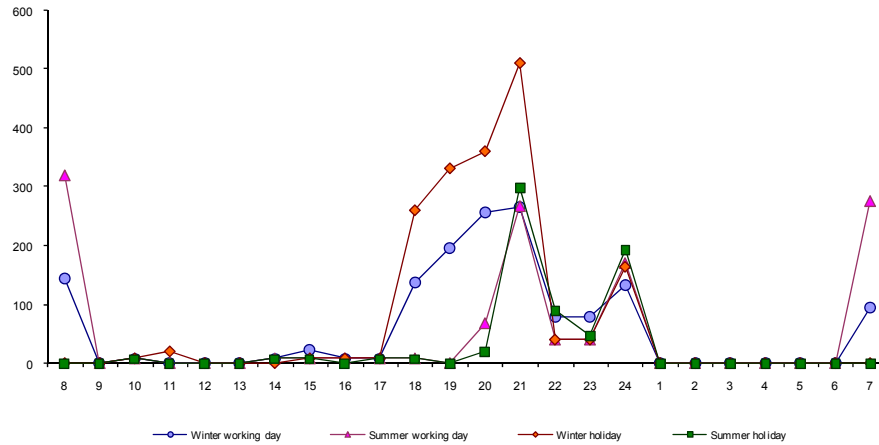
types. This was measured according to the power of the lamps used in different household activities. The number of hours during which the light sources in each room consumed energy was obtained from the questionnaire data. These data were contrasted with the data obtained with the hourly distribution of electricity consumption published by other authors [24,25,31]. By way of example, the following graphs show the hourly electrical energy consumption for lighting (Graphs 1-4).



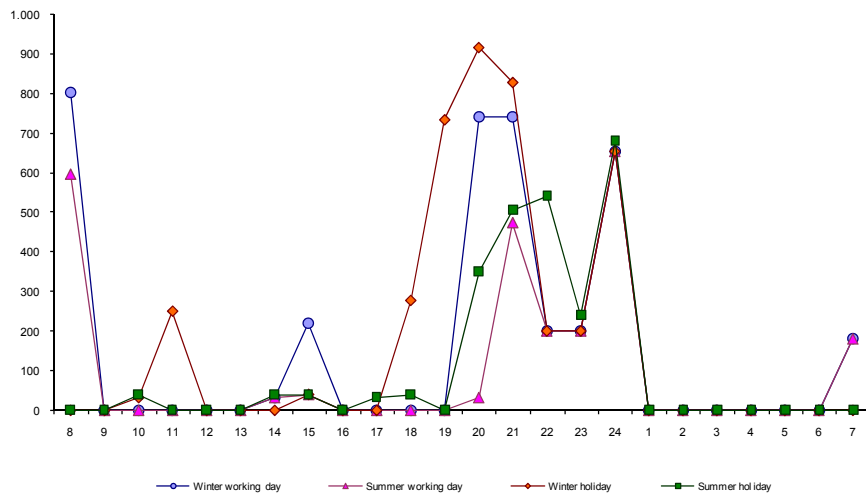
Graph 1. Electrical energy consumption for lighting for household profile 1 in a townhouse/row house (Wh).



Graph 2. Hourly electrical energy consumption for lighting for household profile 2 in an apartment block (Wh).



Graph 3. Hourly electrical energy consumption for lighting for household profile 3 in a detached/semi-detached residential unit.

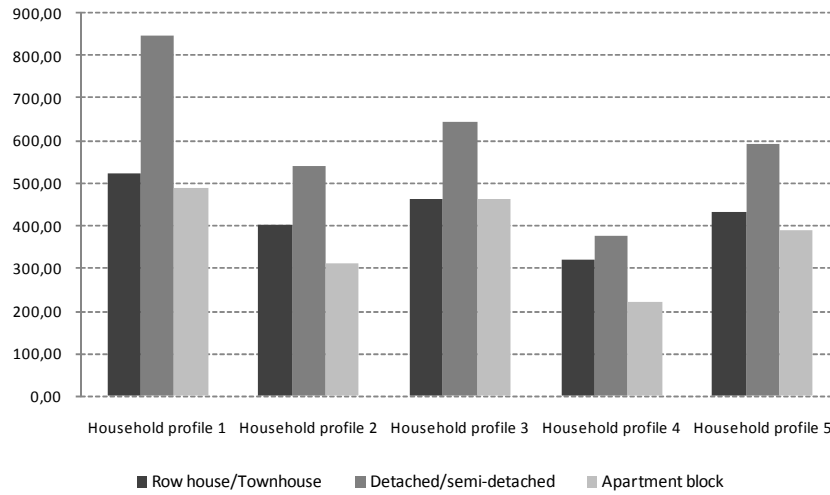


Graph 4. Electrical energy consumption for lighting for household profile 4 in an apartment block (Wh).

Electrical energy consumption for lighting can be divided into two time zones:

- *Low consumption zone*: In this time period, lighting consumption is at a minimum though there is a slight increase in the early morning of working days when activity is just beginning.
- *High consumption zone*: Lighting consumption in this zone is conditioned by the time change. There is a variation of approximately 2 h between the beginning of electricity consumption in winter and in summer. Consumption peaks appear at the times of the day when household activity is most intense. Energy consumption tends to be greater on holidays.

Graph 5 shows the annual consumption un kWh for each household profile an building type.



Graph 5. Monthly energy consumption for lighting for building profiles (kWh).

For a given year the total electrical energy (GWh) for lighting in the residential housing sector can be obtained with the following expression:

$$C_{Tij} = \left(\frac{\sum (n_L * C_{Lij} + n_F * C_{Fij})}{10^9} \right) * N_{ij}$$

where n_L is the number of working days per month, C_{Lij} is the electricity consumption for lighting per working day (Wh) for each building type (i) of each household profile (j), n_F is the number of holidays per month, C_{Fij} is the electricity consumption for lighting per holiday (Wh) for each building type (i) of each household profile (j), N_{ij} is the number of households in each profile that occupy each building type (see Table 3).

The following data were thus obtained (Table 7):

Profile	Detached/Semi-detached	Row house/Townhouse	Apartment block
Household profile 1	58.30	223.15	498.00
Household profile 2	14.12	44.72	99.33
Household profile 3	9.25	30.58	84.81
Household profile 4	11.52	32.02	72.58
Household profile 5	1.55	5.03	12.68
Total	94.75	335.49	767.40

Table 7. Annual electricity consumption for lighting per household profile and building type (GW/h).

The final total electrical energy demand in Andalusia for the year was 35,342 GWh. Of this demand, 12,320 GWh corresponded to electricity consumption in the residential sector [4]. Based on the distribution of percentages according to the light source used in each building type, our energy model indicates that electrical energy consumption for lighting (1,197.64 GWh) makes up 3.39 % of the total electrical energy demand in Andalusia and 9.72 % of the electricity demand in the residential sector in Andalusia. When this model is applied and conventional light bulbs are replaced with low energy-consumption bulbs, the model shows that electrical energy consumption for lighting will be 2.78% of the total electrical energy demand in Andalusia and 7.96% of the electricity demand in the residential sector.

9 COMPARISON OF THE MODEL WITH QUESTIONNAIRE DATA

9.1 Questionnaire

The selection of the size of the sample was performed by random stratified sampling since the population studied was previously divided into subpopulations or strata that were assumed to be homogeneous in respect to the characteristic analyzed. Within each stratum, we independently selected a random sample. We then calculated estimators for each stratum, and the population estimator was calculated as an adequate weighting of the estimates per stratum. We used the stratified proportional sampling in which the size of each stratum in the sampling is proportional to its size in the population [32].

$$n = \frac{\sum \frac{W_h^2 * s_h^2}{w_h}}{V + \frac{1}{N} * \sum W_h * s_h^2}$$

where n is the size of the sample, N is the total number of units, W_h is the weighting of the stratum (N_h/N), w_h is the weight of stratum h in the sample (n_h/n), n_h is the number of units in the sample for each stratum, V is the variance anticipated, depending on the margin of error (d^2/t^2), d is the margin of error chosen ($\bar{y} - \bar{Y}$), t is the reliability coefficient (1.96-95% confidence for a normal distribution (0,1)), s_h^2 is the estimated variance for each stratum h ($\frac{1}{n_h - 1} * \sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \bar{y}_h)^2$).

The admissible error in the sample population was set at 10%. Since the true variance of the population of each stratum h was unknown, a small population sample was selected from each stratum as a pilot sample. Subsequently, with each sample, the population variance (s_h^2) was estimated for each of the three building types. Finally, the formula was used to estimate the size of the population. Once the size of the population was estimated, it was multiplied by each W_h in order to obtain the population size of each stratum. The statistical treatment of the data collected by the questionnaire revealed that the percentage of households with some low-consumption lighting was 80% for a confidence level of 95%. In contrast, the *Encuesta Social de Hogares y Medio Ambiente en Andalucía* [Survey of Households and the Environment in Andalusia], administered in 2008, estimated that the percentage of Andalusian households with at least one low-energy lamp as a lighting source was 85.1% [33].

The calculation of the electricity consumption per household according to building type was obtained by multiplying the number of hours when the light bulb types were functioning by their power. We thus obtained the following consumption for each building type: (i) 2,032.32 kWh for apartment blocks; (ii) 297.11 kWh for row houses/town houses; (iii) 811.21 kWh for detached/semi-detached houses. Based on all of the residential housing units in Table 3, this gave a total of 1,469.37 GWh.

This consumption represents a mean consumption of 4.16 % of the total electrical energy demand in Andalusia, and 11.93 % of the electrical energy demand in the residential sector.

10 CONCLUSIONS

In conclusion, when the results obtained with our model were contrasted with the results obtained from questionnaires as well as the models of other researchers [34], this showed that energy consumption for lighting amounted to approximately 3.8% of the total electrical energy demand in Andalusia.

The model proposed in this article allowed us to estimate the electrical energy consumption for lighting in all of the residential housing units in Andalusia. Our results showed that the most energy-efficient building type, which had the lowest electricity consumption for lighting, was the apartment block, depending on the household profile (see Table 8).

Profile	Apartment block
Household profile 1	489.83
Household profile2	310.47
Household profile 3	464.28
Household profile 4	221.69
Household profile 5	387.38
Total	1,873.65

Table 8. Annual electrical energy consumption for lighting according to household and residential building type (kWh/year house)

The replacement of incandescent light bulbs with low-consumption bulbs signifies an opportunity to improve energy efficiency in the residential sector. Current government policies that encourage the progressive use of more energy-efficient lighting in rooms (living room and bedrooms) would mean, only in Andalusia, a reduction of $3.39 - 2.78 = 0.61\%$ in the total electrical energy consumption. This would signify a reduction of 18% in the electricity bill for lighting. The results of our study show the effectiveness of national policies in Spain to improve lighting efficiency in the residential building sector.

11 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Añil Construcciones y Servicios, S.A, who provided the funding for this research.

REFERENCES

[1] IDAE, Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004–2012. Plan de acción 2008–2012. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007.

[2] Ministerio de Vivienda, Estadística de la Vivienda. www.mviv.es, 2006.

[3] Ministerio de Vivienda, Estimación del Parque de Viviendas. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Estudios y Estadísticas. www.mviv.es, 2006.

[4] Agencia Andaluza de la Energía, Datos energéticos de Andalucía 2006. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía. www.agenciaandaluzadelaenergia.es, 2006.

[5] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, A. Delahunty, Domestic lighting: a high-resolution energy demand model, *Energy and Buildings* 41 (2009) 781–789.

[6] Y. Yamaguchi, Y. Shimoda, M. Mizuno, Proposal of a modelling approach considering urban form for evaluation of city level energy management, *Energy and Buildings* 39 (2007) 580–592.

[7] J. E. Seem, Pattern recognition algorithm for determining days of the week with similar energy consumption profiles, *Energy and Buildings* 37 (2005) 127–139.

[8] A. Al-Mumin, O. Khatlab, G. Sridhar, Occupants behaviour and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences, *Energy and Buildings* 35 (2003) 549–559.

[9] L. Farinaccio, R. Zmeureanu, Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses, *Energy and Buildings* 30 (1999) 245–259.

[10] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings* 40 (2008) 394–398.

[11] K. Blok, Enhanced policies for the improvement of electricity efficiencies, *Energy Policy* 33 (2005) 1635–1641.

[12] Palacio del Congreso de los Diputados, Proposición de ley de ahorro y uso eficiente de la energía, Madrid, 9 January, 2008.

[13] Norma UNE 12464-I, y las instalaciones de alumbrado interior, 2003.

[14] A. Espín Estrella, F. Aznar Dols, E.R. Manzano, A. Espín Martín, *Luminotecnia Básica para Ingenieros*, 2009, ISBN 978-84-92680-10-8.

[15] F. Martín Sánchez, *Manual Práctico de Iluminación, Principios de las Fuentes de Luz Artificial*, 2005, ISBN:84-87440-10-X. [16] Ministerio de Vivienda, *Estimación del Parque de Viviendas. Viviendas principales y no principales por comunidades autónomas y provincias, Series 2002–2006*. www.mviv.es, 2006.

[17] Ministerio de Fomento, *Construcción de Edificios 2000–2006. Licencias Municipales de Obras. Series Estadísticas*. www.fomento.es, 2006.

[18] J.O. García, E.J. Gago, J.A. Bayo, G.M.Montes, The use of solar energy in the buildings construction sector in Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 2166–2178.

[19] Ministerio de Vivienda, *Encuesta sobre Tenencia y Uso de la Vivienda de los Hogares para el año 2006*. www.mviv.es, 2006d.

[20] C.F. Reinhart, *Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds*, *Solar Energy* 77 (2004) 15–28.

[21] R. Yao, K. Steemers, A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK, *Energy and Buildings* 37 (2005) 663–671.

[22] D.R.G. Hunt, The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy, *Building and Environment* 14 (1979) 21–33.

[23] M.B.C. Aries, G.R. Newsham, Effect of daylight saving time on lighting energy use: a literature review, *Energy Policy* 36 (2008) 1858–1866.

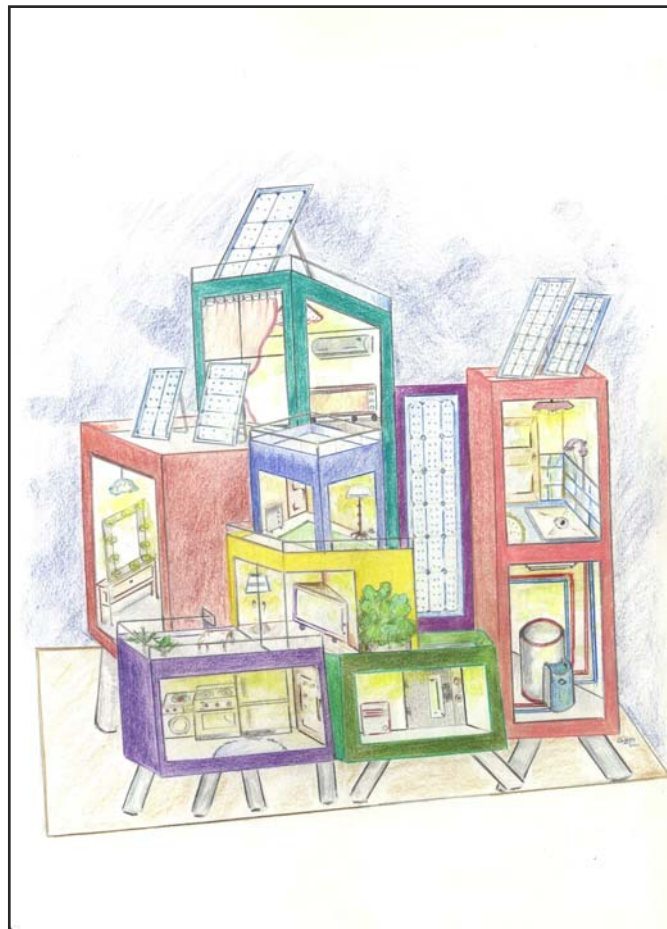
[24] A. Capasso, W. Grattieri, R. Lamedica, A. Prudenzi, A bottom-up approach to residential load modeling, *IEEE Transactions on Power Systems* 9 (2) (1994).

[25] M. Bladh, H. Krantz, Towards a bright future? Household use of electric light: a microlevel study, *Energy Policy* 36 (2008) 3521–3530.

[26] A. Wright, S. Firth, The nature of domestic electricity-loads and effects of time averaging on statistics and on-site generation calculations, *Applied Energy* 84 (2007) 389–403.

[27] A. Druckman, T. Jackson, Household energy consumption in the UK: a highly geographically and socio-economically disaggregated model, *Energy Policy* 36 (2008) 3177–3192.

- [28] M. Santamouris, K. Kapsis, D. Korres, I. Livada, C. Pavlou, M.N. Assimakopoulos, On the relation between the energy and social characteristics of the residential sector, *Energy and Buildings* 39 (2007) 893–905.
- [29] CES, Consejo Europeo y Social de Andalucía. Informe sobre la Situación Socioeconómica de Andalucía 2006, Junta de Andalucía, 2006, www.ces.es.
- [30] IEA, Instituto de Estadística de Andalucía. Consejería de Economía y Hacienda, Junta de Andalucía, 2006, www.juntadeandalucia.es.
- [31] M. Stokes, M. Rylatt, K. Lomas, A simple model of domestic lighting demand, *Energy and Buildings* 36 (2004) 103–116.
- [32] W.G. Cochran, Professor of Statistics, Harvard University, *Sampling Techniques*. C.E.C.S.A. April, 1975.
- [33] IEA, Encuesta social 2008. Hogares y medio ambiente en Andalucía. Consejería de Economía y Hacienda, Junta de Andalucía, 2008, www.juntadeandalucia.es.
- [34] D.L. Loe, Energy efficiency in lighting – considerations and possibilities, *Lighting Research Technology* 41 (2009) 209–218.



Capítulo VI: Conclusiones

CONCLUSIONES

Un aumento en las políticas encaminadas a la construcción de edificios energéticamente eficientes podría constituir un importante instrumento en los esfuerzos para aliviar la dependencia de las importaciones de energía de los países que constituyen la UE (se estima que podría alcanzar el 80% en el año 2020) y cumplir el Protocolo de Kyoto para reducir las emisiones de dióxido de carbono. Todo ello dentro de las exigencias marcadas por la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia.

Esta investigación pone de manifiesto la importancia que tiene el diseño de los elementos de la cubierta a la hora de optimizar la energía que podría generarse. En 2006, el consumo de energía destinado a satisfacer los usos relacionados con el sector de la vivienda residencial en Andalucía fue 12.320 GW/año. La capacidad energética solar fotovoltaica de las cubiertas de los edificios residenciales de Andalucía, instalando paneles fotovoltaicos en las cubiertas de todos ellos se calculó en 9,73 GW/año para una superficie de cubierta total de 265,52 Km². Esto respondería al 78,89% de todas las necesidades de energía, que significa una dependencia energética exterior de 21,02%.

El modelo energético desarrollado señala que el consumo de energía eléctrica para iluminación (1.197,64 GWh.) supone el 3,39% de la demanda total de energía eléctrica en Andalucía y el 9,72% de la demanda de energía eléctrica del sector residencial en Andalucía.

El reemplazo de las bombillas incandescentes por otras de bajo consumo representa una gran oportunidad de mejora para la eficiencia del sector residencial, reduciéndose el consumo de energía eléctrica para iluminación al 2,78% de la demanda total de energía eléctrica en Andalucía y al 7,96% de la demanda de energía eléctrica del sector residencial, lo que supondría una reducción del 0,61% en el consumo total de energía eléctrica que representaría una disminución del 18% de la factura eléctrica correspondiente al uso de iluminación.

El consumo de energía eléctrica para iluminación (1.197,64 GWh.) podría ser cubierto en su totalidad por la energía eléctrica generada utilizando paneles fotovoltaicos en las cubiertas de los edificios (aproximadamente 9.500 GWh.). El consumo de energía eléctrica para iluminación representaría un 12,6% de la capacidad energética solar fotovoltaica de las cubiertas de los edificios residenciales.

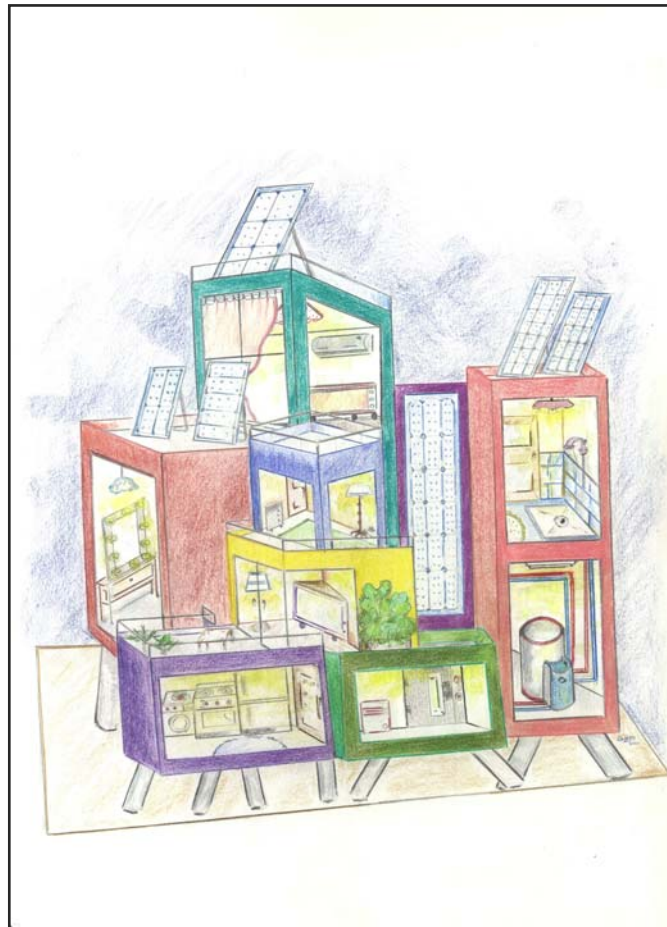
CONCLUSIONS

The increasing number of policies to foment the energy-efficient construction of buildings is an important reflection of the efforts of EU member states to reduce their dependence on imported energy (a figure that is estimated to be as high as 80% in 2020) and comply with the Kyoto Protocol to reduce carbon dioxide emissions. This is all occurring within the context of the demands set out in Directive 2010/31/EU of the European Parliament on energy efficiency.

The research presented in this PhD dissertation reveals the importance of the design of building roof elements in the optimization of potential energy. In 2006, energy consumption intended to satisfy uses related to the residential building sector in Andalusia were 12,320 GW/year. The photovoltaic solar energy capacity of residential building roofs in Andalusia (if photovoltaic panels were installed on all of them) was calculated at 9.73 GW/year for a total roof surface of 265.52 Km². This responds to 78.89% of all energy needs, which signifies an outside energy dependence of 21.02%.

The energy model developed indicates that electrical energy consumption for lighting (1,197.64 GWh) amounts to 3.39% of the total electrical energy demand in Andalusia and 9.72% of the electrical energy in the residential sector in Andalusia. The replacement of incandescent light bulbs with low-energy light bulbs is an important opportunity to improve energy efficiency in the residential sector by reducing electricity consumption for lighting uses to 2.78% of the total electrical energy demand in Andalusia and to 7.96% of the electrical energy demand of the residential sector. This would mean a reduction of 0.61% in the total consumption of electrical energy, which in turn would represent a reduction of 18% in the electricity bill for lighting uses.

Electrical energy consumption for lighting (1,197.64 GWh) could be totally covered by electrical energy generated with photovoltaic panels on building roofs (approximately 9,500 GWh). Electrical energy consumption for illumination would come to 12.6% of the photovoltaic solar energy capacity of residential building roofs.



Capítulo VII: Perspectivas de Trabajo Futuras

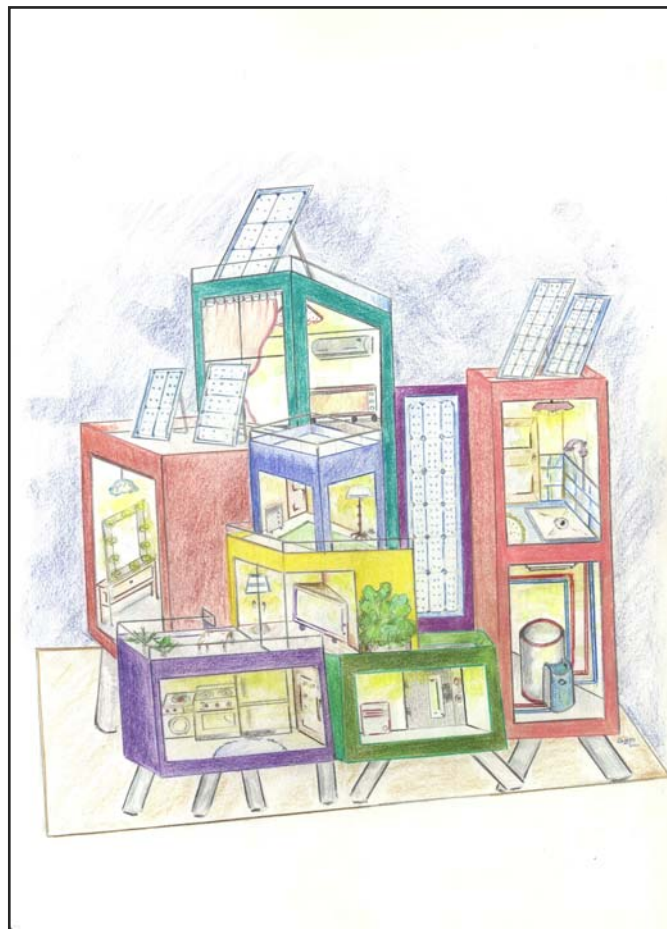
PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURAS

Se proponen como futuras líneas de investigación:

1. Completar el modelo desarrollado que permite obtener el consumo energético para el resto de los usos originados en la vivienda residencial (ACS, calefacción, aire acondicionado, electrodomésticos, etc.), que no han sido estudiados en esta tesis.

2. Estudiar el uso de otras fuentes de energía renovables que permitan además de obtener energía para autoconsumo de la vivienda residencial generar energía eléctrica y verter a la red la no consumida.

El objetivo de estas futuras líneas de investigación será conseguir la viabilidad económica de los sistemas energéticos que permitan la sostenibilidad energética de la vivienda residencial.



Anexo: Otras Publicaciones

EVALUATION OF THE ACCURACY OF MATHEMATICAL MODELS THROUGH USE OF MULTIPLE METRICS

N Caliskan*, E Jadraque^o, Y Tham** and T Muneer**

* Istanbul Technical University, Turkey

^o Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain

** School of Engineering and Built Environment, Edinburgh Napier University, Scotland, UK

Abstract

Engineering practise heavily relies on the development and use of mathematical models. In this article a number of appropriate metrics have been selected to provide an insight in the validation of models and also to obtain a ‘figure of merit’ for any given model. The latter exercise enables categorisation of models with respect to their performance if more than one model is available, or developed, for any given task. A Microsoft Excel/Visual Basic for Applications software has been expressly developed for the latter task that enables automation of the model validation work. This software product is provided on this research team’s website. The reader may download this shareware-software as an open access tool. © 2011 Published by Elsevier B.V.

Key words: mathematical modelling, automobile emissions, statistical models

Nomenclature

MAD	mean absolute deviation
MBE	mean bias error
NDMAD	non-dimensional mean absolute deviation
NDMBE	non-dimensional mean bias error
NDRMSE	non-dimensional root mean square error
r	correlation coefficient
RMSE	root mean square error
s	slope of the best-fit line
Y_c	computed value of the dependent variable
Y_m	measured or observed value of the dependent variable

Greek letter

Ψ	figure of merit
--------	-----------------

2210-6707/\$ – see front matter © 2011 Published by Elsevier B.V.

doi:10.1016/j.scs.2011.02.001

Uso de la energía solar fotovoltaica como fuente para el suministro de energía eléctrica en el sector residencial

1 INTRODUCTION

In engineering research, development of mathematical models is common practise. Of equal importance is the work related to checking the adequacy of those models. It is common practise to develop models wherein one dependent variable is regressed against one or several independent variables. Often correlation between two quantities also needs to be examined. In some of the engineering literature it has become common practise to refer regression models as ‘Correlation Equations’. Strictly speaking this is wrong usage of statistician’s language. Correlation is the degree of relationship between variables and one seeks to determine how well a linear or other model describes the relationship. On the other hand, regression is a technique of fitting linear or non-linear models between a dependent and a set of independent variables. In this brief note an attempt has been made to bring together a number of statistical metrics that ought to help researchers in their mathematical model validation work. The aim of this note is to: (i) provide a number of carefully chosen metrics to provide an insight in model’s evaluation, (ii) to obtain a ‘figure of merit’ for any given model thus enabling categorisation of models with respect to their performance if more than one model is available, or developed, for any given task, and (iii) provide an open source Microsoft Excel/Visual Basic for Applications software that enables the reader to automate the task of model validation.

2 ANALYSIS

The following statistical parameters are used in the section below to quantitatively evaluate the performance of each function presently used.

2.1 Slope of the best-fit line, s

The slope of the best-fit line, given by Eq. (1), between the computed and measured variable is desired to be as close as possible to unity. Slope values exceeding one indicate overestimation, while slope values under one indicate underestimation of the computed variable.

$$s = \frac{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_c - \bar{Y}_c)}{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)^2} \quad (1)$$

Note that Y_c is the calculated value of the dependent variable and Y_m is the measured or observed value, and \bar{Y}_m is the mean value of the measured variable.

2.2 Coefficient of determination, r^2

The coefficient of determination (r^2) is the ratio of explained variation to the total variation. r^2 lies between zero and one.

$$r^2 = \left[\frac{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_c - \bar{Y}_c)}{\sqrt{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \sum (Y_c - \bar{Y}_c)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

A high value of r^2 , thus indicating a lower unexplained variation, is desirable. r^2 is often used to judge the adequacy of a regression model, but it should not be the sole criterion for choosing a particular model. In the present context r^2 provides an indication of the order of scatter between Y_c and Y_m . Further information may be obtained in Draper and Smith (1998) and Montgomery and Peck (1992).

2.3 Root mean squared error, RMSE

The root mean squared error (RMSE) gives a value of the level of scatter that the model produces. This is an important statistical test as it highlights the readability and repeatability of the model. It provides a term-by-term comparison of the actual deviation between the predicted and the measured values. Since it is a measure of the absolute deviation, RMSE is always positive. A lower absolute value of RMSE indicates a better model. Mathematically, it is given by the following equation:

$$RMSE = \sqrt{\sum \left[\frac{(Y_c - Y_m)^2}{n} \right]} \quad (3)$$

2.4 Mean bias error, MBE

The mean bias error (MBE) provides an indication of the trend of the model, whether it has a tendency to underpredict or overpredict the modeled values. MBE can be expressed either as a percentage or as an absolute value. Nevertheless, within a data set an overestimation of one observation can cancel an underestimation of another. A MBE nearest to zero is desired. It is given by the following equation:

$$MBE = \frac{\sum(Y_c - Y_m)}{n} \quad (4)$$

2.5 Mean of absolute deviations, MAD

Another metric that is often employed in such analysis is the mean of absolute deviations, MAD and is given by,

$$MAD = \frac{\sum|Y_c - Y_m|}{n} \quad (5)$$

Unlike MBE, the MAD metric provides an insight into the scatter between Y_c and Y_m . Note that the MAD is similar to RMSE and provides a measure of absolute deviations.

2.6 Non-dimensional MBE, MAD and RMSE

The above formulae provide MBE, MAD and RMSE, which have the same physical units as the dependent variable, Y . In some instances non-dimensional MBE (NDMBE), MAD (NDMAD) and RMSE (NDRMSE) are required. These are obtained as follows,

$$NDMBE = \frac{\sum \left[\frac{(Y_c - Y_m)}{Y_m} \right]}{n} \quad (6)$$

$$NDMAD = \frac{\sum \left[\left| \frac{(Y_c - Y_m)}{Y_m} \right| \right]}{n} \quad (7)$$

$$NDRMSE = \sqrt{\frac{\sum \left[\left(\frac{(Y_c - Y_m)}{Y_m} \right)^2 \right]}{n}} \quad (8)$$

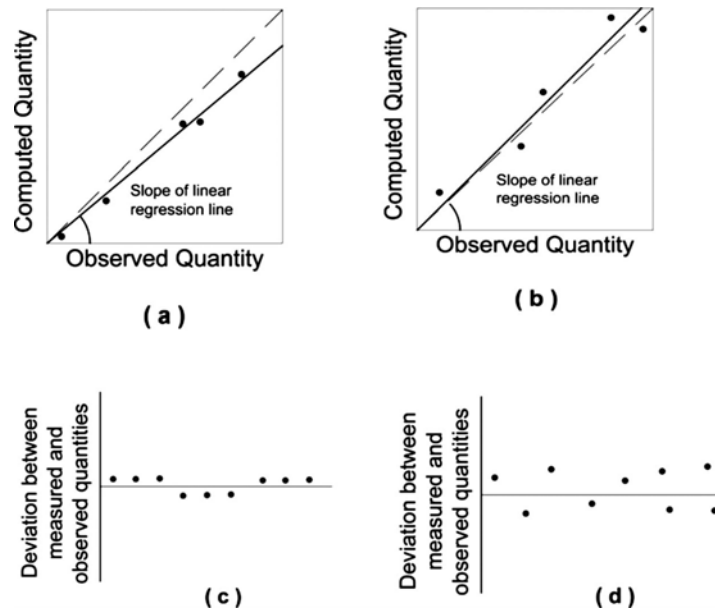


Figure 1. Basic concepts for the statistical parameters that were presently used. (a): Slope has a large deviation but with a reduced data scatter about the fitted line. (b) Slope is very close to ideal value but with an enhanced data scatter. (c) Smaller but a systematic trend of deviations. (d) An almost equal spread of positive and negative but larger deviations.

RW	VA	DA	T	WS	ES	Pollution level
6.2	2	67	314	5.4	1.2	17.2
3.3	1	66	313	5.3	1.0	18.4
3.3	1	54	301	4.1	1.0	18.7
6.2	2	55	302	4.2	1.2	17.9
3.3	1	42	289	2.9	1.0	19.2
6.2	2	43	290	3.0	1.2	19.2
3.3	1	30	277	1.7	1.0	20.5
6.2	2	31	278	1.8	1.2	21.5
7.5	3	68	315	5.5	1.4	21.6
7.5	3	56	303	4.3	1.4	23.2
7.5	3	44	291	3.1	1.4	25.5
10.5	4	69	265	5.6	1.6	28.0
7.5	3	32	279	1.9	1.4	29.7
3.3	1	18	265	0.5	1.0	33.6
6.2	2	19	266	0.6	1.2	33.1
10.5	4	57	304	4.4	1.6	30.7
10.5	4	45	292	3.2	1.6	34.6
7.5	7	60	307	4.7	1.0	38.1
7.5	3	20	267	0.7	1.4	42.4

RW	VA	DA	T	WS	ES	Pollution level
10.5	4	33	280	2.0	1.6	41.2
7.5	7	48	295	3.5	1.0	42.7
3.3	5	70	266	5.7	1.8	46.3
3.3	5	58	305	4.5	1.8	50.5
7.5	7	36	283	2.3	1.0	50.1
10.5	8	61	308	4.8	1.2	49.8
3.3	5	46	293	3.3	1.8	56.6
10.5	4	21	268	0.8	1.6	57.2
10.5	8	49	296	3.6	1.2	56.6
6.2	6	59	306	4.6	2.0	61.8
7.5	7	24	271	1.1	1.0	64.9
3.3	5	34	281	2.1	1.8	66.3
10.5	8	37	284	2.4	1.2	67.1
6.2	6	47	294	3.4	2.0	70.4
7.5	7	19	268	5.9	1.0	71.1
3.3	9	62	309	4.9	1.4	74.0
3.3	9	50	297	3.7	1.4	83.4
6.2	6	35	282	2.2	2.0	84.1
3.3	5	22	269	0.9	1.8	87.1

RW	VA	DA	T	WS	ES	Pollution level
10.5	8	25	272	1.2	1.2	86.9
6.2	10	63	310	5.0	1.6	89.9
3.3	9	38	285	2.5	1.4	97.8
10.5	8	20	269	6.0	1.2	97.2
6.2	10	51	298	3.8	1.6	102.4
6.2	6	23	270	1.0	2.0	111.1
7.5	11	64	311	5.1	1.8	113.2
6.2	10	39	286	2.6	1.6	121.2
3.3	9	26	273	1.3	1.4	123.7
6.2	6	18	267	5.8	2.0	125.5
7.5	11	52	299	3.9	1.8	129.2
10.5	12	65	312	5.2	2.0	139.8
7.5	11	40	287	2.7	1.8	153.2
6.2	10	27	274	1.4	1.6	154.4
10.5	12	53	300	4.0	2.0	159.9
10.5	12	41	288	2.8	2.0	189.7
7.5	11	28	275	1.5	1.8	194.4
10.5	12	29	276	1.6	2.0	240.0

Table 1. Automobile fleet mix and pollution level for a Scottish city. RW: Road Width (m), VA: Vehicle Age (years), DA: Driver Age (years), T: Temperature (K), WS: Wind Speed (m/s), ES: Engine Capacity (l), Pollution Level: nitrogen dioxide concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

2.7 Figure of merit, Ψ

One of the important steps in the evaluation of different functions is the interpretation of different statistical parameters, namely, slope, r^2 , MBE, MAD and RMSE. Often when two or more models are inter-compared for their relative strengths and weaknesses there may be a tie between the above-mentioned metrics. For example a model may have a lower MBE but a higher RMSE. Therefore, an overall accuracy score is highly desirable to facilitate a discrete comparison between different models. In the present article, a novel statistical tool that combines the five metrics mentioned above to produce an overall score. With the view to demonstrate this point Fig. 1(a) shows a slope that has a large deviation from the ideally sought value of 1 but a high value of r^2 , whereas in Fig. 1(b) the slope is very close to the ideal value, but a low value of r^2 is realized due to large data scatter. Therefore case (b) would be preferable over case (a). Similarly, Fig. 1(c) presents a smaller but systematic trend of deviation -notice the negative deviations in the middle range, with positive outcomes at the lower and higher ends. In the case of Fig. 1(d), an almost equal spread of positive and negative but larger deviations is noticed. Although case (d) would provide a much higher value of MBE, case (d) would, however, be preferable over case (c). Overall, it can be concluded that the slope parameter provides a much more important indication of the validity of any given model. The r^2 of the line fitted between computed and observed data, MBE, MAD and RMSE for the given model's deviation provide second order information as higher values of r^2 or lower values of MBE, MAD and RMSE do not warrant a better model. Ideally, the latter four parameters ought to be examined in conjunction with the value of slope. The following overall accuracy score is proposed with varying weighting factors of 3, 1, 1, 1 and 1 for s , r , RMSE, MBE and MAD respectively:

$$\psi = 3[s] + [r] + \left[1 - \frac{RMSE}{RMSE_{\max}} \right] + \left[1 - \frac{|MBE|}{|MBE|_{\max}} \right] + \left[1 - \frac{MAD}{MAD_{\max}} \right] \quad (9)$$

Note that s and r are dimensionless, unlike RMSE, MBE and MAD, and therefore the latter three are respectively divided by the values of $RMSE_{\max}$, $|MBE|_{\max}$ and MAD_{\max} . Ψ is a convenient *figure of merit*, by means of which it is possible to

compare the performance of any suite of models. Therefore, for a perfect fit the overall accuracy score Ψ will be 7.

Model 1:

$$K_1 * (RW)^{a_1} * (VA)^{b_1} * (DA)^{c_1} * (ES)^{d_1} * (T)^{e_1} * (WS)^{f_1}$$

K ₁	799.9660496
a ₁	-0.282693012
b ₁	0.596283499
c ₁	-0.240567364
d ₁	-0.288961898
e ₁	-0.775288994
f ₁	0.584117699

Model 2:

$$K_{21} * (RW)^{a_2} + K_{22} * (VA)^{b_2} + K_{23} * (DA)^{c_2} + K_{24} * (ES)^{d_2} + K_{25} * (T)^{e_2} + K_{26} * (WS)^{f_2}$$

K ₂₁	72.9877178
K ₂₂	0.15746905
K ₂₃	387.4612945
K ₂₄	2.092969749
K ₂₅	9.82933495
K ₂₆	-111.1774902
a ₂	-1.891875639
b ₂	2.705221091
c ₂	-0.320569166
d ₂	-10.21628577
e ₂	-0.05759274
f ₂	4.397934314

Table 2. Coefficients used in models 1 and 2.

3 EXAMPLE

The latest UK air quality objectives for protection of human health were published in July 2007. These standards demand that the inner city nitrogen dioxide hourly

mean pollution resulting from vehicular traffic and other sources does not exceed 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ for more than 18 times a year (AEA, 2010). The chief contributor to Nitrogen Dioxide (NO_2) within inner cities is the automobiles' internal combustion engine which produces nitric oxide (NO) when a rich mixture of fuel and air is used. nitric oxide (NO) is a molecule with momentous biological functions but very simple structure. It carries an unpaired electron behaving as a free radical that avidly reacts with other molecules. It has lipid solubility and disappears quickly in the presence of oxygen, with a half life of about three seconds. NO undergoes rapid oxidation to NO_2 which is the prevalent in the atmosphere. The effects of NO_2 on human health focus mainly on the respiratory system.

Data points	MAD	NDMAD	MBE	NDMBE	RMSE	NDRMSE	slope	r	ψ
56	5.459	0.096	-0.956	0.000	7.716	0.126	0.977	0.989	4.600
56	7.849	0.130	-0.685	-0.002	12.336	0.192	0.922	0.971	4.022

Table 3. Evaluation of the performance of models 1 and 2 using presently proposed scheme.

Table 1 shows data collected for one city in Scotland on the automobile fleet mix passing a city centre location during a short duration of time and the consequent NO_2 concentration. Two teams of researchers have attempted to develop mathematical models to relate the NO_2 concentration to the independent parameters that are provide in Table 1, i.e. road width, vehicle age, driver age, temperature, wind speed and engine capacity.

The formulations proposed by the above two teams are given below:

$$\text{Model1} = K_1 * (RW)^{a_1} * (VA)^{b_1} * (DA)^{c_1} * (ES)^{d_1} * (T)^{e_1} * (WS)^{f_1} \quad (\text{Model 1})$$

$$\text{Model2} = K_{21} * (RW)^{a_2} + K_{22} * (VA)^{b_2} + K_{23} * (DA)^{c_2} + K_{24} * (ES)^{d_2} + K_{25} * (T)^{e_2} + K_{26} * (WS)^{f_2} \quad (\text{Model 2})$$

Use the analysis provided in Section 2 above to evaluate the above two formulations with the view to identify the better model.

3.1 Solution

Respectively using the solver facility available in Microsoft Excel and the software expressly developed by the present authors Tables 2 and 3 may be obtained. Note that Table 2 obtained using unconstrained optimisation technique, provides the best-fit values of the coefficients shown in Models 1 and 2. Table 3 was obtained via use of the presently developed code that is available from this website: <http://www.etresh.eu/downloads.htm>.

Note that within Table 3 the MBE for Model 1 is higher, though all other metrics show a better performance. The overall score for Model 1 is higher indicating its overall better performance.

REFERENCES

- [1] Draper, N., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis*. New York: Wiley.
- [2] Montgomery, D., & Peck, E. (1992). *Introduction to linear regression analysis*. New York: Wiley.
- [3] AEA (2010) UK air quality archive: Air quality standards <http://www.airquality.co.uk/standards.php> (accessed 10.08.10).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA VIVIENDA RESIDENCIAL

Jadraque, E.; Ordoñez, J.; Alegre, J.; Martínez, G.

Abstract

Energy certification of buildings is a requirement under Directive 2002/91/EC. Regarding energy certification, partially transposing this directive into Spanish law through Royal Decree 47/2007 of January 19, which approves the basic procedure for the certification of energy efficiency of new buildings. This article analyzes and compares three models for estimating energy demand. This study aims to develop an optimization model of energy consumption in residential buildings in order to identify potential savings and implement improvement measures to enable more efficient energy consumption in each building and the identification of potential incorporate energy.

Keywords: Energy certification, Energy efficiency, Energy consumption

Resumen

La Certificación Energética de los Edificios es una exigencia derivada de la Directiva 2002/91/CE. En lo referente a la certificación energética, esta Directiva se transpone parcialmente al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. El presente artículo analiza y compara tres modelos de estimación de la demanda de energía. Este estudio tiene como finalidad el desarrollo de un modelo de optimización del consumo energético en los edificios residenciales con el fin de identificar potenciales ahorros y llevar a cabo medidas de mejora que permitan eficientizar el consumo de energía en cada edificio así como la identificación del potencial de incorporar energías.

Palabras clave: Certificación energética, Eficiencia energética, Consumo energético, Sector residencial

1 INTRODUCCIÓN

La edificación en Europa, representa más del 40 % del consumo final de energía de los Estados miembros de la Unión Europea (UE), de los cuales el uso residencial representa el 63 % del consumo total de energía. En consecuencia, un aumento en las políticas encaminadas a la construcción de edificios energéticamente eficientes podría constituir un importante instrumento en los esfuerzos para aliviar la dependencia de las importaciones de energía de los países que constituyen la UE (actualmente en torno al 48 %) y cumplir con el Protocolo de Kyoto para reducir las emisiones de dióxido de carbono [1,2]. Todo ello dentro de las exigencias marcadas por la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios [3].

Por otro lado, la insostenibilidad del actual modelo de *producción-consumo* de energía pone de manifiesto el carácter limitado de los recursos energéticos convencionales, así como la degradación del medio ambiente resultado de este modelo [4,5].

Las reservas actuales de petróleo y gas natural solo pueden cubrir el consumo de energía para los próximos 40 años en el caso del petróleo, y para 60 años en el caso del gas natural [5].

El aumento del uso y promoción de energías renovables parece una solución viable para los problemas producidos en el medio ambiente por otras fuentes de energía [2]. Por esta razón, las políticas actuales se centran en fomentar el desarrollo y uso de las energías renovables en Europa [6].

En España el sector de la edificación residencial consume el 10 % (10.793 ktep.) del consumo de energía total [7].

En el año 1998 se desarrolló la primera investigación detallada y profunda sobre la demanda eléctrica en España. Los datos de este proyecto y la descripción de los rasgos y pautas del uso de la energía eléctrica y su evolución hasta la fecha de inicio del funcionamiento del mercado de electricidad, el 1 de enero de 1998, quedaron reflejados en la publicación denominada “*Atlas de Demanda Eléctrica Española. Proyecto INDEL*” [8].

La importancia que tiene en el consumo de energía eléctrica la edificación residencial, justifica el desarrollo de modelos que permitan obtener la estructura por usos (climatización, electrodomésticos, iluminación, agua caliente sanitaria,...) de

dicho consumo. Diversos autores han desarrollado modelos que tienen este objetivo: Yamaguchi Y et al. [9], Seem JE [10], Al-Mumin A et al. [11], Farinaccio L y Zmeureanu R [12], Shimoda Y et al. [13].

2 ANÁLISIS DE TRES MODELOS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

El consumo de energía del sector residencial, por sus características, es complejo. Por ello, se necesitan modelos para evaluar el impacto de la adopción de la eficiencia energética y las tecnologías de energía renovable adecuadas para aplicaciones residenciales.

Los autores Swan LG y Ugursal VI ofrecen una revisión actualizada de las diversas técnicas de modelado del consumo de energía en el sector residencial. Esta revisión se realiza bajo dos enfoques [14]:

1. *Descendente*: Trata al sector de la vivienda como un sumidero de energía y no se refiere a los distintos usos finales. Utiliza los valores históricos de la energía total y retrocede al consumo de energía de las viviendas en función de variables de nivel superior como los indicadores macroeconómicos (PIB, desempleo, inflación...), los precios de la energía y el clima (figura 1).
2. *Ascendente*: Extrapola la estimación del consumo de energía de un conjunto representativo del sector residencial a nivel regional y nacional, y se compone de dos tecnologías: el método estadístico y el método de ingeniería. Cada método se basa en diferentes niveles de entrada de información, de simulación o técnicas de cálculo deferentes, y proporcionan resultados con diferentes aplicaciones (figura 1).

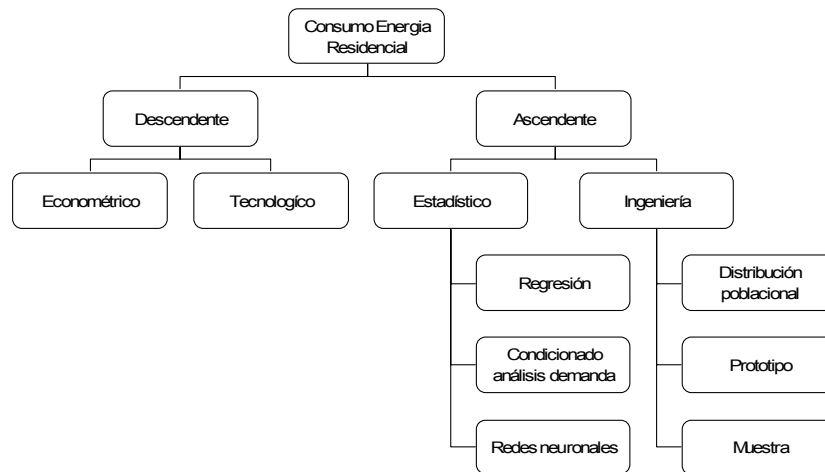


Figura 1. Técnicas de modelado descendente y ascendente para la estimación regional y nacional del consumo de energía en el sector residencial [14].

A continuación se analizan tres modelos de consumo de energía residencial, dos de ellos incluidos en el Atlas de Demanda Eléctrica Española del proyecto INDEL y otro desarrollado por Shimoda Y et al. [15].

2.1 Atlas de demanda eléctrica española. Proyecto INDEL

El Atlas de la Demanda Eléctrica del proyecto INDEL trata de definir donde se encuentran las claves de evolución de la demanda. Analizando la demanda del sector residencial, el Atlas parte de la información aportada por una muestra de consumidores compuesta por 1.500 hogares principales, representativos de la población peninsular, y que han aportado información sobre su consumo, equipamiento y uso de la energía desde 1988 [8].

Su consumo horario se midió mediante un sistema constituido por equipos registradores de potencia durante el periodo 1991-1997. El número de hogares colaboradores con el Proyecto fue de 5.467. Por medio de un cuestionario se realizó una segmentación de la población española según estilos de vida y se hizo un estudio de las actitudes y conductas respecto al medio ambiente y el consumo energético de los diferentes grupos [8]. Las conclusiones se lograron aplicando dos metodologías de análisis matemático:

1. Análisis de la Evolución.
2. Explicación de la Curva de Carga por Usos.

Estas metodologías de análisis de la demanda de energía se engloban dentro de los métodos ascendentes estadísticos, clasificados a su vez en modelos de regresión, condicionados al análisis de la demanda y neuronales [14], y han sido desarrollados por diversos autores Hirst E et al. [16], Raffio G et al. [17], Parti M y Parti C [18], Aigner DJ et al [19], Caves DW et al [20], Kreider JF y Haberl JS [21], Issa RRA et al [22].

La metodología para el Análisis de la Evolución, ayuda a comprender los factores que influyen en la demanda y prever su comportamiento futuro a medio y largo plazo, según escenarios económicos y tecnológicos. Mediante la determinación cuantitativa del impacto de una serie de factores (datos que alimentan el análisis) sobre la demanda de energía y aplicando la metodología de análisis de la evolución, este modelo predice la demanda de energía. Se aplica a cualquier serie de demanda mensual de energía, ya sea la del sistema o la de segmentos de consumidores (figura 2).

Esta metodología abarca 16 modelos estadísticos que incorporan técnicas de clasificación, tipificación, análisis multivariante, análisis de series temporales y técnicas de desestacionalización. Transforma las variables exógenas (estadísticas españolas, indicadores de actividad económica, temperatura, calendarios y equipamiento y/o sensibilidad a la temperatura por sectores) en indicadores relevantes para el análisis de la demanda eléctrica. Estima la influencia de los distintos factores sobre la demanda y su evolución a largo plazo, prediciendo cada factor a corto y largo plazo (figura 2).

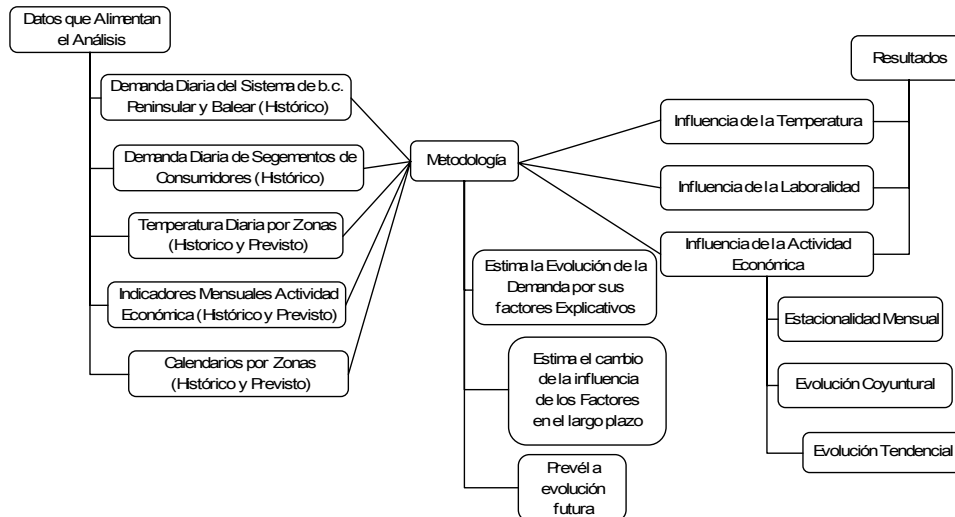


Figura 2. Metodología de análisis de demanda de energía mediante el análisis. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

Como aplicación de esta metodología, se analiza a continuación la influencia de la temperatura en la evolución de la demanda residencial.

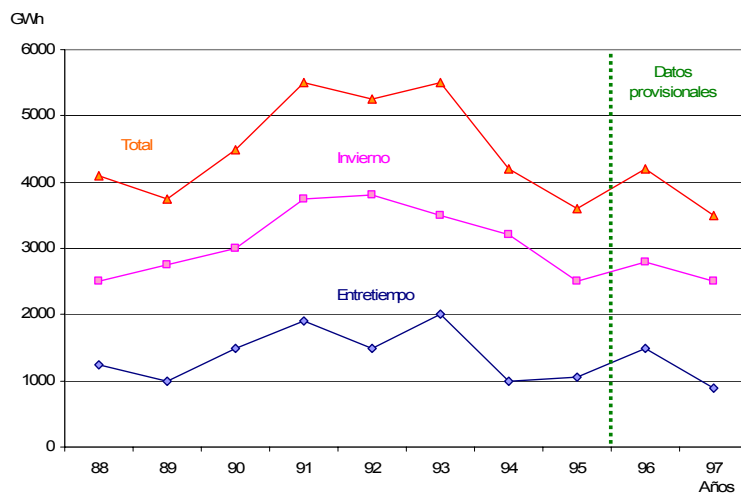


Figura 3. Influencia de la temperatura en la demanda residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

La temperatura es la causa principal del cambio de la demanda en los hogares. Su efecto, 4.570 GWh de media en el periodo 1989-1996, supone el 18 % de la demanda total residencial [8]. La mayor parte de este efecto se concentra en los meses de

invierno, diciembre, enero y febrero, 3.140 GWh. Supone un 12.2 % de la demanda total para el mismo periodo. En el periodo de entretiempo, noviembre, marzo y abril, la influencia es mucho menor: 5.5 % de la demanda (figura 3).

La metodología de Explicación de la Curva de Carga por Usos, se compone de 24 modelos estadístico-matemáticos y de simulación que incorporan técnicas de clasificación, tipificación de formas, análisis multivariante, análisis y proyección de series temporales y proyección demográfica. Estos modelos, transforman los datos medidos de curva de carga, procesos de uso y características de los consumidores en factores relevantes que alimentan el análisis, construyen el consumo horario de cada uso en cada tipo de día, en base a características encuestadas al consumidor, realizan una estimación simultánea de la influencia de estos factores sobre la curva de carga registrada a cada consumidor y sobre un segmento o sector de consumidores y por último, proyectan a corto y largo plazo la evolución de cada uso basándose en escenarios tecnológicos, demográficos o económicos, obteniendo la curva de carga demandada por usos de un sector o segmento de consumidores (figura 4).

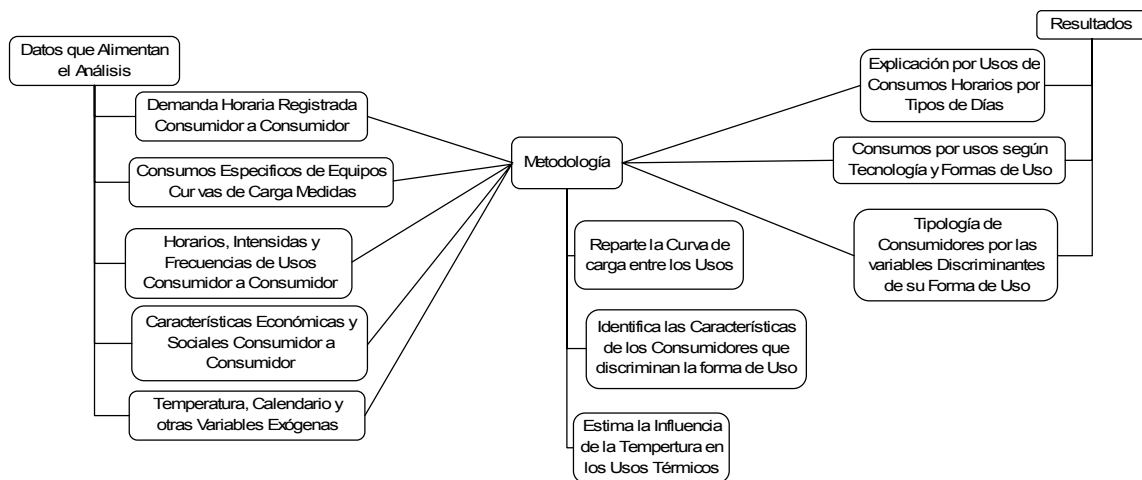


Figura 4. Metodología de Explicación de la Curva de Carga por Usos. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

Aplicando la metodología descrita arriba, se obtiene la figura 5 y la figura 6. La figura 5 representa la explicación por usos del consumo anual residencial. Se puede ver que los usos de mayor peso tienen son el frigorífico, televisión, iluminación y pequeños

electrodomésticos. El consumo del frigorífico supone un 27.3 % de la demanda residencial, la iluminación el 23.5 % y la televisión aporta el 12 %. A pesar de que prácticamente toda la población posee lavadora, ésta supone tan solo el 5 % del consumo total residencial, pues su uso no es continuo a lo largo del día. El consumo por calefacción eléctrica es del 10 % de esta demanda.

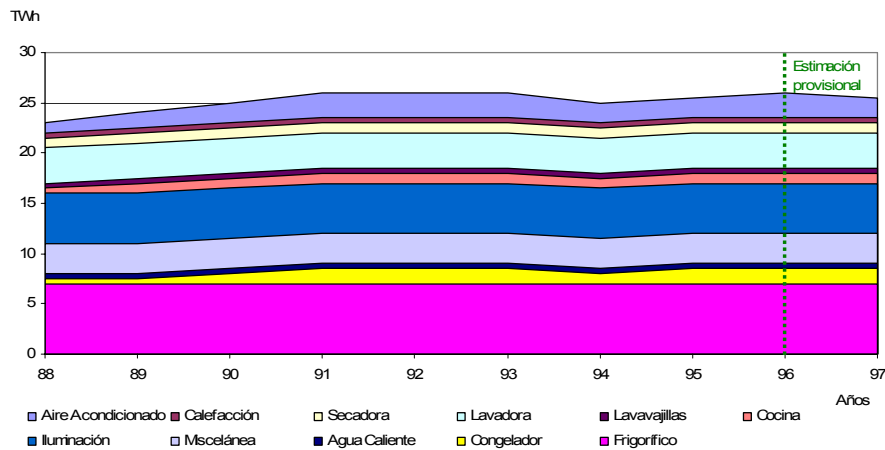


Figura 5. Explicación por usos del consumo anual residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

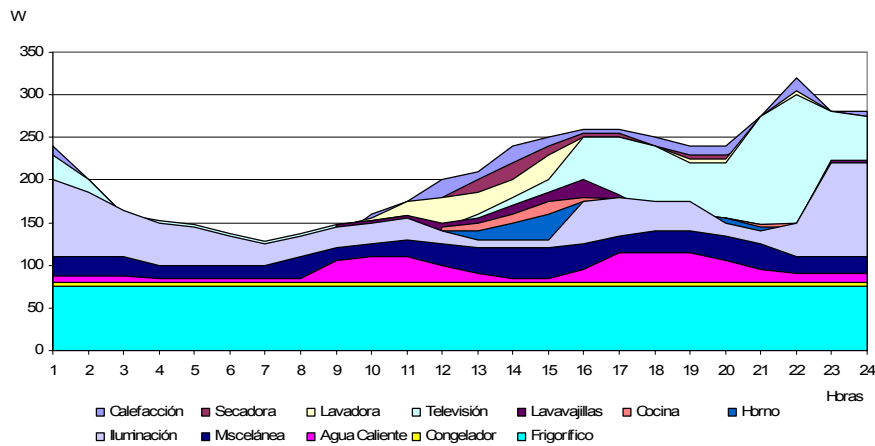


Figura 6. Curva de carga del hogar medio en un día tipo laborable. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

En la figura 6, se aprecia que la curva de carga del sector residencial tiene su punta de 21 a 22 horas, momento de mayor ocupación en el hogar. La lavadora y la secadora

concentran su consumo durante las mañanas. A las 12 horas, estos dos usos suponen el 21 % de la demanda total residencial. Durante la noche existe otra punta de consumo de lavadora y secadora consecuencia del trabajo fuera de casa de los componentes principales de un número de hogares. El agua caliente tiene dos puntas claras, a las 9 de la mañana y a las 5 de la tarde, que coinciden con el aseo matinal y el fregado de vajilla posterior a la comida.

Los usos relacionados con la comida en el hogar, cocina y horno, concentran su consumo en las horas previas a la comida, 2 de la tarde, y cena, en menor medida, a las 9 de la noche.

El lavavajillas tiene sus puntas de consumo en las horas posteriores a dichos momentos, de comida y cena, es decir, hacia las 16 y 22 horas.

Iluminación, calefacción y televisión mantienen un perfil que coinciden con los niveles de ocupación de los hogares. El frigorífico y congelador mantienen el mismo nivel de consumo a lo largo del día, al no desconectarse en ningún momento.

2.2 Residential end-use energy simulation at city scale [15]

Según la clasificación establecida por Swan LG y Ugursal VI [14], este modelo de estimación de la demanda de energía es un método ascendente, de ingeniería y de diseño de prototipos.

Los modelos de ingeniería estiman el consumo de energía de los usos finales, en función de sus calificaciones y características. Estos modelos pueden determinar plenamente el consumo de energía del sector, sin necesidad de recurrir a información estadística (al contrario que los dos modelos analizados anteriormente, que si que partían de datos históricos). La metodología de diseño de prototipos, se utiliza para clasificar las viviendas de acuerdo a determinados factores (tamaño, tipo de casa, etc.). A partir de estas variables incluidas en las ecuaciones del modelo, se obtiene la demanda de energía.

Las estimaciones del consumo de energía obtenidas del modelo se escalan para que sean representativas del consumo regional o nacional de viviendas, multiplicando el resultado por el número de viviendas que se ajustan a la descripción de cada prototipo.

MacGregor WA et al [23], Kohler N et al [24], Huang Y et al [25], han sido algunos de los autores que han desarrollado modelos de demanda de energía de estas características.

La metodología objeto de este análisis, permite desarrollar un modelo de simulación para predecir el uso final de consumo de energía en sectores residenciales de una ciudad y región. En este modelo, el consumo anual de energía de una vivienda es simulado a través del calendario de las actividades de sus ocupantes (mediante encuestas), datos meteorológicos y la eficiencia energética de los aparatos y de las viviendas. El total de la energía consumida para el sector de la vivienda en una región puede ser estimado utilizando los resultados de la simulación para las diferentes categorías de hogares. El uso de la energía de las viviendas se calcula iterativamente para 23 tipos de hogares y 20 tipos de vivienda (10 viviendas aisladas y 10 bloques). Multiplicando el consumo de energía simulado por el número de hogares de cada tipología se obtiene el consumo total de energía para el sector residencial en la región objeto del estudio.

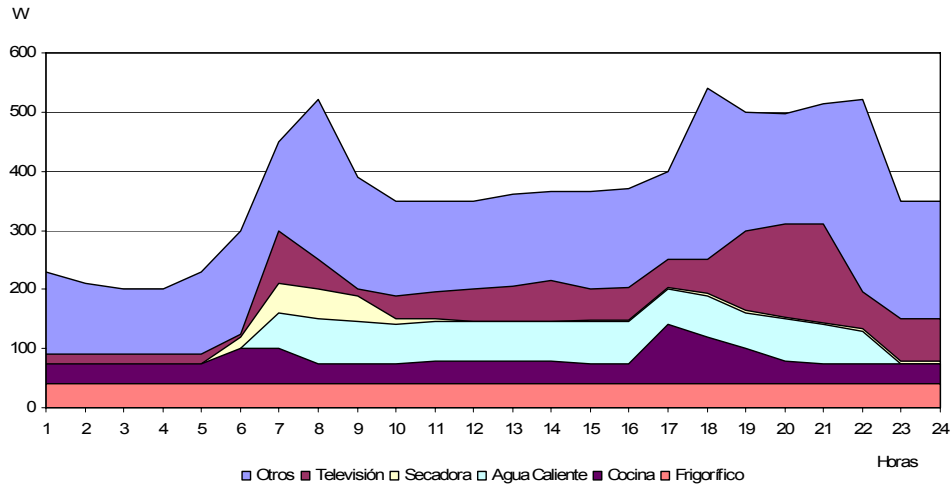


Figura 7. Consumo por hora simulado de electricidad por usos en un día tipo laborable [15].

3 RESULTADOS

Aplicando los modelos analizados y desarrollados en el Altas de la Demanda Eléctrica Española, se obtiene los siguientes consumos anuales de energía en España para la serie de años 1989-1996:

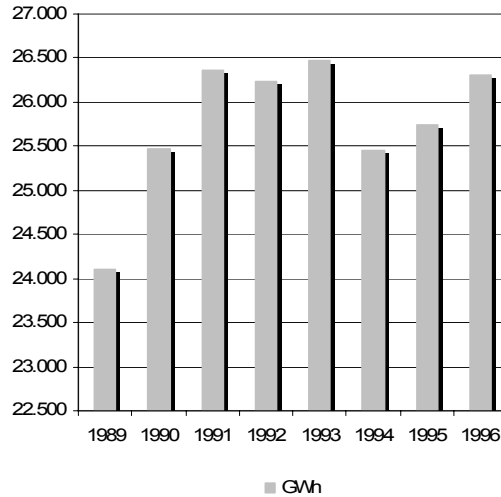


Figura 8. Consumo anual residencial. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

La demanda eléctrica anual de los hogares se estima en 25.768 GWh/año, como promedio, en el periodo analizado.

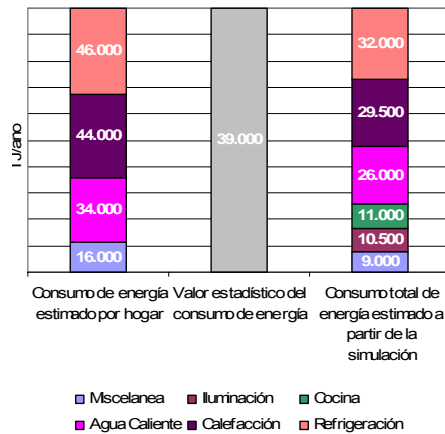


Figura 9. Consumo total de energía del sector residencial en la ciudad de Osaka (Japón) [15].

La figura 8, representa el consumo total de energía del sector residencial en la ciudad de Osaka (Japón), calculado a partir de la simulación, el valor estadístico del consumo de energía en el año de referencia 1999 y la estimación de los valores derivados del producto entre el número total de hogares en la ciudad analizada y el

consumo de energía estimado por hogar. Se obtiene que el consumo total de energía calculado, a partir de la simulación es 32.018 TJ/año.

Comparando las curvas de carga (figura 10 y 11), hay que señalar como características comunes, que los distintos modelos analizados, tienen en cuenta como se distribuyen las distintas tipologías de viviendas y hogares en la región de estudio.

Los modelos analizan el efecto del cambio de estilo de vida en el consumo de energía, ya que el uso de aparatos con consumo energético está vinculado a las actividades cotidianas de los ocupantes del hogar.

En cada uno de los modelos, se obtiene una distribución del consumo por hora de electricidad por usos distinta, condicionada por la diferencia entre unas regiones y otras en aspectos tales como: tamaño y tipología de las viviendas, calendario de actividades de sus ocupantes, eficiencia energética de los aparatos y viviendas, datos meteorológicos, etc.

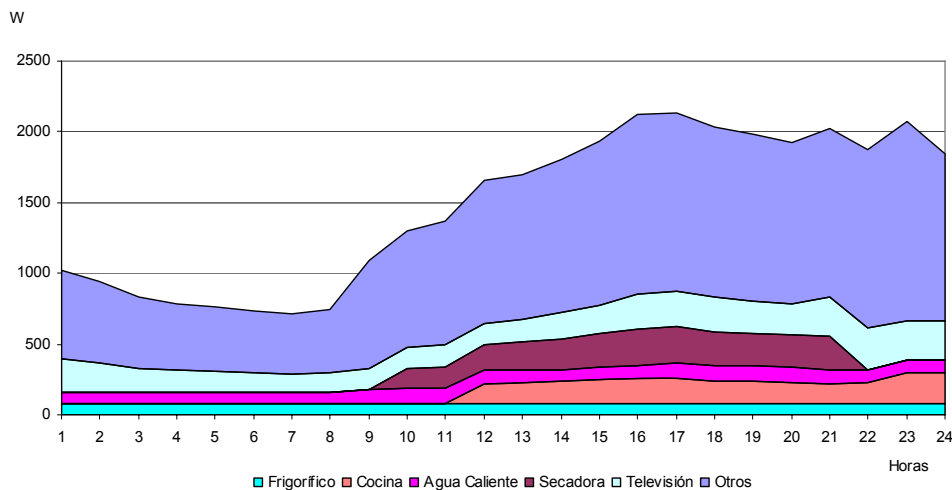


Figura 10. Curva de carga del hogar medio en un día tipo laborable. Fuente: Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.

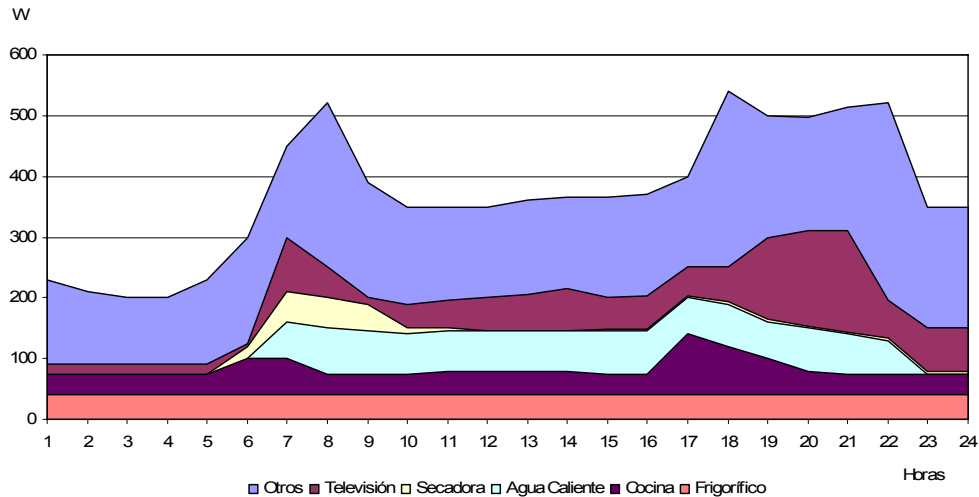


Figura 11. Consumo por hora simulado de electricidad por usos en un día tipo laborable [15].

4 CONCLUSIONES

La importancia que tiene en el consumo de energía eléctrica la edificación residencial, justifica el desarrollo de modelos que permitan obtener la estructura por usos (climatización, electrodomésticos, iluminación, agua caliente sanitaria,...) de dicho consumo.

El desarrollo de modelos energéticos puede desempeñar una función primordial a la hora de evaluar el efecto de políticas destinadas a la conservación de la energía y el impacto que ocasionarían cambios en la eficiencia energética de los aparatos de consumo eléctrico.

Por último, conociendo el consumo energético de una vivienda, estos modelos permitirían evaluar el efecto provocado, en dicho consumo, por modificaciones en el aislamiento térmico.

REFERENCIAS

[1] Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renew Sust Energy Rev* 2000;4:57–75.

[2] Martinez G, Serrano MM, Rubio MC, Menendez A. An overview of renewable energy in Spain. The small hydro-power case. *Renew Sustain Energy Rev* 2005;9:521–34.

- [3] Balaras CA, Gaglia AG, Georgopoulou E, Mirasgedis S, Sarafidis Y, Lalas DP. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment* 2007;42:1298-1314.
- [4] Xiaowu W, Ben H. Energy analysis of domestic-scale solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2005;639-45.
- [5] Jefferson M. Sustainable energy development: performance and prospects. *Renewable Energy* 2006;31:571-82.
- [6] Ordóñez GJ, Gago EJ, Bayo JA, Montes GM. The use of solar energy in the building construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007;11:2166-78.
- [7] IDAE, Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012. Plan de acción 2008-2012. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007.
- [8] Proyecto INDEL. Atlas de la Demanda Eléctrica Española. Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (PIE). Red Eléctrica de España.
- [9] Yamaguchi Y, Shimoda Y, Mizuno M. Proposal of a modelling approach considering urban form for evaluation of city level energy management, *Energy and Buildings* 2007;39:580-592.
- [10] Seem JE. Pattern recognition algorithm for determining days of the week with similar energy consumption profiles, *Energy and Buildings* 2005;37:127-139.
- [11] Al-Mumin A, Khattab O, Sridhar G. Occupants behaviour and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences, *Energy and Buildings* 2003;35:549-559.
- [12] Farinaccio L, Zmeureanu R. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses, *Energy and Buildings* 1999;30:245-259.
- [13] Shimoda Y, Asahi T, Taniguchi A, Mizuno M. Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy* 2007;32:1617-1633.
- [14] Swan LG, Ugursal VI. Modelling of end-use energy consumption in the residential sector. A review of modelling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:1819-1835.

- [15] Shimoda Y, Fujii T, Morikawa M, Mizuno M. Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment* 2004;39(8):959–67.
- [16] Hirst E, Goeltz R, White D. Determination of household energy using “fingerprints” from energy billing data. *Energy Research* 1986;10(4):393–405.
- [17] Raffio G, Isambert O, Mertz G, Schreier C, Kissock K. Targeting residential energy assistance. In: *Proceedings of energy sustainability conference*; 2007. p. 489–95.
- [18] Parti M, Parti C. The total and appliance-specific conditional demand for electricity in the household sector. *The Bell Journal of Economics* 1980;11(1):309–21.
- [19] Aigner DJ, Sorooshian C, Kerwin P. Conditional demand analysis for estimating residential end-use load profiles. *The Energy Journal* 1984;5(3):81–97.
- [20] Caves DW, Herriges JA, Train KE, Windle R. A Bayesian approach to combining conditional demand and engineering models of electricity usage. *The Review of Economics and Statistics* 1987;69(3):438–48.
- [21] Kreider JF, Haberl JS. Predicting hourly building energy use: the great energy predictor shootout—overview and discussion of results. *ASHRAE Transactions* 1994; 100(2):1104–18.
- [22] Issa RRA, Flood I, Asmus M. Development of a neural network to predict residential energy consumption. In: *Proceedings of the sixth international conference on the application of artificial intelligence to civil & structural engineering computing*; 2001. p. 65–6.
- [23] MacGregor WA, Hamdullahpur F, Ugursal VI. Space heating using small-scale fluidized beds: a technoeconomic evaluation. *International Journal of Energy Research* 1993;17(6):445–66.
- [24] Kohler N, Schwaiger B, Barth B, Koch M. Mass flow, energy flow and costs of the German building stock. CIB, 2nd international conference on buildings and the environment, Paris, France; 1997.
- [25] Huang Y, Broderick J. A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire US building stock. Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBNL-46303; 2000.

