

GABINO ALMONACID

*Aplicaciones fotovoltaicas
en edificios*

Lección Inaugural.

Curso Académico 1996-97



UNIVERSIDAD DE JAÉN

GABINO ALMONACID

*Aplicaciones fotovoltaicas
en edificios*



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Lección Inaugural. Curso Académico 1996-97

© Gabino Almonacid

© UNIVERSIDAD DE JAÉN (para la 1.^a edic. Septiembre 1996)

Diseño de cubierta: Andrés Ramírez.

Depósito Legal: J - 531 - 1996

I.S.B.N.: 84-88942-76-1

Difusión: Publicaciones de la Universidad de Jaén
Vicerrectorado de Extensión Universitaria
Paraje de las Lagunillas, s/n
23071 JAÉN
Teléfono (953) 21 23 55 - Fax (953) 21 22 55

Impreso por: Gráficas "LA PAZ" de Torredonjimeno, S. L.
c/. Molinillo, 4 y 6
23650 TORREDONJIMENO (Jaén)
Teléfono (953) 57 10 87 - Fax (953) 57 12 07

*A María,
Paula,
Guillermo y
Lucía*

I. INTRODUCCIÓN	9
II. FUNDAMENTOS	11
II.1. El módulo fotovoltaico	13
II.2. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	16
III. EL EDIFICIO COMO GENERADOR FOTOVOLTAICO	19
III.1. Análisis energético/arquitectónico del edificio	19
III.2. <i>Superficie efectiva</i> de un edificio	21
III.3. Consideraciones sobre el dimensionado	25
III.4. Ejemplos de diseño	27
IV. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FOTOVOLTAICO	31
IV.1. Datos globales del área de estudio	31
IV.2. Los SIG en aplicaciones fotovoltaicas en edificios	33
IV.3. Selección de edificios	35
V. CONCLUSIONES	39
NOMENCLATURA	41
REFERENCIAS	43
ANEXO: Gráficas y figuras	45
FIGURAS	47

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los trabajos del *Grupo Jaén de Técnica Aplicada* se han centrado especialmente en proyectos relacionados con aplicaciones solares en edificios. Se puede decir que el núcleo central y la base de todos estos trabajos ha sido el Proyecto REBUILD (Renewable energies for buildings in historical city centres), proyecto piloto financiado por la UE y los ayuntamientos de ocho ciudades de diversos países (Grecia, Holanda, Italia, Portugal y España) para el estudio de las posibilidades de aplicación de energía solar en edificios dentro de centros históricos [1].

Los recursos conseguidos con este proyecto, la realización de sus trabajos específicos y el intercambio de experiencias a lo largo del desarrollo del mismo, han permitido a nuestro grupo acometer costosos trabajos de análisis y estudios previos y adquirir unos conocimientos y experiencia, a mi juicio importantes, en el campo de las aplicaciones fotovoltaicas en edificios. Fruto de ellos han sido, por una parte una producción científica significativa, y por otra, la presentación de propuestas y realización en algunos casos de proyectos concretos de aplicación.

En esta lección se desarrollan bases teóricas y se estructuran de forma sistemática algunos de los conocimientos y experiencia adquiridos en dichos trabajos. Tras un breve repaso de los fundamentos tecnológicos de la energía solar fotovoltaica, esta exposición se centra en torno a dos grandes bloques: *el edificio como generador fotovoltaico* y *potencial fotovoltaico de un conjunto de edificios*. En el primer bloque se desarrolla un método simple para estudiar la capacidad de producción de energía eléctrica fotovoltaica de un edificio, y se proponen tres criterios para definir el tamaño (potencia nominal) de un generador fotovoltaico para un edificio. Finaliza este bloque presentando tres proyectos de sistemas fotovoltaicos integrados en edificios.

En el segundo bloque se plantea un método para evaluar el potencial de generación fotovoltaica de un conjunto de edificios, mediante la utilización de unos parámetros que nos permiten la selección adecuada de una muestra y su adecuación para una intervención solar. Se presentan también en este bloque los *Sistemas de Información Geográfica*, como una nueva herramienta que está llamada a ser imprescindible en este tipo de trabajos.

II. FUNDAMENTOS

El efecto fotovoltaico es un fenómeno físico consistente en la conversión de la energía luminosa (o radiaciones ópticas) en energía eléctrica. Esto se consigue por la separación mediante un campo eléctrico interno, creado generalmente por una estructura heterogénea del material, de las cargas eléctricas de distinto signo (electrones y huecos), generadas por la ionización de los átomos al ser absorbidos los fotones de la radiación óptica por los electrones de su capa externa (fig. 1).

Para que se produzca el efecto fotovoltaico deben darse, por tanto, las siguientes condiciones:

- a) Existencia de una estructura heterogénea que produzca un campo eléctrico interno.
- b) Que la radiación luminosa sea capaz de generar cargas libres al absorberse por el material. Es decir, que la energía necesaria para romper un enlace entre átomos y liberar un electrón sea igual o inferior a la de los fotones de la radiación luminosa.

La célula solar, basada en una estructura p-n sobre un material semiconductor, cumple con los dos requisitos anteriormente citados, y es el dispositivo más importante hoy día para aprovechar el efecto fotovoltaico. El primer dispositivo capaz de convertir con eficiencia (casi un 6%) la energía solar en energía eléctrica, fue desarrollado en 1.954 por D.M. Chapin, C.S. Fueller, G.L.Pearson de los *Bell Telephon Laboratories* en New Jersey [2] ; desde entonces células similares a aquélla se vienen empleando para suministro de energía eléctrica en una serie de aplicaciones cada día creciente (fig. 2).

En el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid se pusieron a punto los procesos tecnológicos, y se fabricaron, ya a finales de los años setenta, células con un 15 por ciento de eficiencia [3].

La principal barrera que se opone a una utilización masiva de este dispositivo es su elevado coste en relación a su rendimiento. Aunque son varios los caminos que se siguen para conseguir reducir el coste de obtención de este tipo de energía (reducir coste de célula, concentración, PV en edificios: con un aprovechamiento eficiente de la energía generada, eliminando elementos innecesarios, creando aplicaciones más competitivas y desarrollando el mercado) es claro que el rendimiento de las células debe mejorarse (fig. 3) [4][5].

En la tabla II se resumen los datos de células y distintas tecnologías con los mejores resultados de eficiencia hasta 1995 [6].

Tabla II Eficiencia de células terrestres bajo condiciones de radiación global AM1.5						
TECNOLOGÍA	EFIC. %	A (CM ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mAcm ⁻²)	FF (%)	DENOMINACIÓN
Si (monocristalino)	24.0	4.00	0.709	40.9	82.7	UNSW PERL
Si (área moderada)	21.6	37.50	0.698	39.5	78.4	Stanford point contact
Si (policristalino)	17.7	1.00	0.623	35.6	71.2	Georgia Tech
Si (película delgada)	14.9	1.02	0.600	31.4	79.2	Astro Power (Si-film)
GaAs (monocristalino)	25.1	3.91	1.022	28.2	87.1	Kopin, AlGaAs window
InP (monocristalino)	21.9	4.02	0.878	29.3	85.4	Spire, epitaxial
a-Si (película delgada)	11.5	1.08	0.879	18.8	70.1	Solarex
GaNIP/GaAs	29.5	0.25	2.385	14.0	88.5	NREL monolithic

II.1 El módulo fotovoltaico

Para hacer posible su manejo práctico, los fabricantes presentan las células asociadas eléctricamente entre sí y encapsuladas en un bloque llamado panel o módulo fotovoltaico, que constituye el elemento básico para construir un generador fotovoltaico (fig. 4).

El comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico, es decir, su característica $V-I$, que es necesario conocer para la utilización de dicho módulo y el diseño de generadores fotovoltaicos, viene determinado por una serie de parámetros, obtenidos a partir de la información característica suministrada por el fabricante, habitualmente bajo unas condiciones estándares de medida, de uso universal, definidas en la tabla III.

En esas condiciones se miden, al menos, la potencia máxima que puede entregar el módulo, P_{MAX} la corriente de cortocircuito, I_{SC} , el voltaje de circuito abierto, V_{OC} y el factor de forma, definido como

$$FF = P_{MAX} / V_{OC} \cdot I_{SC} \quad (2.1)$$

En la figura 5 se representa la característica $V-I$ de una panel fotovoltaico, en la cual se reflejan los parámetros antes indicados.

Tabla III	CONDICIONES ESTÁNDAR DE MEDIDA DE CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Irradiancia	1000 W/m ²	
Distribución espectral	AM 1,5	
Incidencia	normal	
Temperatura de la célula	25° C	

La caracterización de un módulo se completa con la *Temperatura de Operación Nominal de la Célula, TONC*, definida como la temperatura que alcanzan las células solares, cuando se somete al módulo a las condiciones de operación reflejadas en la tabla IV.

Tabla IV	CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN NOMINAL DE LA CÉLULA, TONC.	
Irradiancia	800 W/m ²	
Distribución espectral	AM 1,5	
Incidencia	normal	
Temperatura ambiente	20º C	
Velocidad del viento	1 m/s	

El conocimiento de los cuatro parámetros mencionados P_{MAX} , I_{SC} , V_{OC} y *TONC* es suficiente para conocer el comportamiento del panel en cualquier condición de operación definida por un valor de la irradiancia, G , y un valor de temperatura ambiente T_a .

Para abordar este cálculo, un buen compromiso entre sencillez y exactitud lo podemos alcanzar con las siguientes simplificaciones [7]:

a) La corriente de cortocircuito de una célula solar depende exclusivamente de la irradiancia y de forma lineal. Es decir,

$$I_{SC}(G) = C_I G \tag{2.2}$$

donde C_I es una constante de valor:

$$C_I = \frac{I_{SC}(100 \text{ mW/cm}^2)}{100 \text{ mW/cm}^2} \tag{2.3}$$

Esta hipótesis supone despreciar los efectos, sobre I_{SC} de la temperatura de la célula y de la distribución espectral de la radiación. Todo ello supone un error inferior al 5 por cien en condiciones reales de operación.

b) El voltaje de circuito abierto de una célula depende exclusivamente de su temperatura, T_c , mediante la expresión:

$$dV_{oc}/dT_c = -2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \quad (2.4)$$

Esta hipótesis supone despreciar los efectos de la iluminación sobre V_{oc} lo que en la práctica supone un error inferior al 1 por cien.

c) La temperatura de trabajo de las células depende exclusivamente de la irradiancia y de la temperatura ambiente mediante la expresión lineal:

$$T_c - T_a = C_2 G \quad (2.5)$$

donde C_2 es una constante de valor:

$$C_2 = \frac{TONC(^{\circ}\text{C}) - 20}{80 \text{ mW}/\text{cm}^2} \quad (2.6)$$

El valor de $TONC$ de los módulos existentes en el mercado actual oscila entre 42 y 46° C, con lo que C_2 varía entre 0.27 y 0.32 °C/(mW/cm²). Cuando no se conoce el valor de $TONC$, una aproximación razonable es suponer $C_2 = 0.3$ °C/(mW/cm²).

En la tabla V se muestran los mejores resultados de eficiencia obtenidos en módulos fotovoltaicos con distintas tecnologías de células solares [6].

Tabla -V		Eficiencia de módulos terrestres bajo condiciones de radiación global AM1.5				
TECNOLOGÍA	EFIC. %	A (cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	FF (%)	DENOMINACIÓN
Si (monocristalino)	21.6	862	32.6	0.703	81.3	Si (policristalino)
Si (policristalino)	15.3	1017	14.6	1.36	78.6	Sandia/HEM, 24 cells
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	10.2	903	2.32	6.47	61.2	USSC

II.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional. El concepto de SFCR es compatible con un amplio margen de aplicaciones las cuales pueden ir desde centrales de varios megavatios hasta pequeños sistemas de unos cuantos kilovatios. En nuestro caso estamos centrados en sistemas pequeños y medianos, tales como los que pueden incorporarse en un edificio (*Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red, EFCR*). El carácter intrínsecamente modular de la tecnología fotovoltaica permite, al contrario que en la mayoría de las fuentes de energía convencionales, un costo unitario relativamente independiente del tamaño de la instalación; por ello los pequeños sistemas presentan un gran interés (producción de energía descentralizada y autosuficiencia del usuario o consumidor).

En la figura 6 se muestra un dibujo esquemático de un edificio conectado a la red en donde se pueden ver los elementos básicos de que consta un SFCR. Éste, básicamente está formado por un generador fotovoltaico, constituido por el número necesario de paneles -conectados en serie para obtener la tensión nominal de funcionamiento-, y el número de ramas en paralelo suficiente para obtener la corriente (potencia) requerida. El inversor se conecta tras un cuadro de conexión que incorpora los elementos de protección del sistema fotovoltaico: diodos de bloqueo, fusibles de protección en cada una de las ramas y descargadores de tensión. Este dispositivo transforma la energía eléctrica en forma de corriente continua, proporcionada por el generador fotovoltaico, en corriente alterna con las mismas características que la red.

Es conveniente además incluir, tras el inversor, un transformador para aislamiento galvánico, un interruptor automático de desconexión, cuando la tensión de la red está fuera de márgenes (vigilante de tensión) y el

correspondiente contador (en serie con el habitual y en sentido inverso) para tarificar la potencia eléctrica inyectada en la red.

Habitualmente las compañías eléctricas exigen también la instalación, en un lugar accesible a su personal, de un interruptor manual que permita separar totalmente el generador fotovoltaico de la red.

III. EL EDIFICIO COMO GENERADOR FOTOVOLTAICO

III.1 Análisis energético/arquitectónico del edificio

Para integrar un sistema fotovoltaico en un edificio es necesario en primer lugar realizar un análisis energético y arquitectónico del mismo. A partir de ahí podemos conocer los problemas de integración, las necesidades de energía y las posibilidades de generación. Estos tres aspectos serán la base para un correcto dimensionado, diseño e instalación del generador fotovoltaico adecuado a dicha aplicación (Fig. 7).

Vamos a tratar brevemente los detalles mínimos que han de considerarse en el mencionado análisis. En el aspecto energético, debemos averiguar los siguientes datos del edificio:

- *Consumo de energía eléctrica anual y mensual del edificio:* C (kWh/año) y C_m (kWh/mes) ($m = 1, 2 \dots, 12$). Este es un dato, en principio, fácil de obtener a partir de la facturación de la empresa suministradora.

- *Curva de carga o consumo horario:* $P(t)$ (kW). Esta curva representa, en su forma más precisa, la potencia instantánea demandada por el edificio a lo largo de un período de tiempo. En nuestro caso nos referimos a un período de un día. Su obtención requiere el uso de un analizador de red conectado en el edificio durante el período en cuestión. Esto no siempre será posible, y trataremos de obtener (al menos) curvas de carga horaria a base de lecturas periódicas en un contador de energía.

Ahora bien, en edificios unifamiliares esta curva tendrá a lo largo del día una forma en general discontinua y con grandes dispersiones entre un día y otro. A medida que el edificio tenga mayor número de usuarios, la curva presentará formas más estándares y similares entre todos los días. En

todo caso, es conveniente realizar el seguimiento del consumo durante varios días de una semana en las diferentes estaciones, lo que nos permitirá conocer la adecuación entre la demanda y la generación fotovoltaica.

En algunos casos será útil representar los valores medios de las curvas de varios días mediante la expresión:

$$P(t_v) = (1/N_d) \sum_d P_d(t_v) \quad (3.1)$$

en donde,

$P(t_v)$ = potencia típica demandada en la hora t_i ($i= 1, 2, \dots, 24$)

$N_d = n^\circ$ de días a considerar

$P_d(t_v)$ = potencia demandada en la hora t_i en el día d .

- *Distribución del consumo según sus diferentes usos*: consumo destinado a iluminación C_L (kWh); calefacción C_H (kWh); refrigeración C_R (kWh); agua caliente C_Q (kWh) y otras aplicaciones C_{OT} (kWh). El conocimiento de esta distribución del consumo no se relaciona directamente, a través de una expresión analítica, con el diseño del sistema fotovoltaico, pero nos ayudará a valorar y tomar decisiones sobre el mismo. Estos datos se pueden conseguir por medio de una encuesta a los usuarios y un análisis de los dispositivos de consumo existentes en el edificio [8][9].

El análisis arquitectónico nos debe proporcionar algunos datos cuantificables y otros de aspecto más cualitativo, cuya intervención en el diseño será más difícil de precisar. Al menos debemos obtener:

- Superficie total (horizontal) que ocupa el edificio: A (m^2)
- Superficie de patios y terrazas: A_p (m^2) y A_t (m^2)
- Superficies de tejado e inclinación de los mismos: $A_n(\alpha, \beta)$ (m^2)
- Superficies de fachada y su orientación: $A_f(\alpha)$ (m^2)
- Condiciones de conservación y tipo de cubiertas y tejados.

A partir de estos datos podemos obtener el potencial generador de energía fotovoltaica del edificio mediante la expresión:

$$E_{FMAX} = G_a(0) \cdot A_{ef} \cdot \eta \quad (3.2)$$

en donde E_{FMAX} es la energía eléctrica (kWh) de origen fotovoltaico que el edificio es capaz de generar en un año; $G_a(0)$ es la radiación global anual (kWh/m²) sobre superficie horizontal; η es el rendimiento del generador fotovoltaico, que debe considerar los factores de rendimiento de células, factor de empaquetamiento (área efectiva del panel) y rendimiento del inversor y equipos de conexión a la red en general. Con la tecnología actual y utilizando paneles de Si cristalino, este coeficiente puede estar en torno al 10%. Finalmente, A_{ef} es un parámetro que denominamos *área efectiva del edificio*, y que nos indica la superficie equivalente horizontal colectora del edificio. Su definición precisa y método de cálculo se exponen en el próximo apartado.

III.2 Superficie efectiva de un edificio

Se trata de obtener el área horizontal equivalente que recibe la misma radiación que el conjunto de todas las superficies «activas» del edificio a lo largo del año. Habrá que determinar en primer lugar las superficies «activas» del edificio.

El problema hay que tratarlo individualmente en cada caso en función de la orientación, uso y estado de cada una de las distintas superficies consideradas en el análisis arquitectónico, y decidir su inclusión, o no, como superficie potencial para instalar un colector fotovoltaico.

Otro factor, previo al cálculo de la superficie efectiva, es el sombreado. Es necesario realizar un diagrama de sombras sobre aquellas áreas del edificio que ofrezcan problemas de sombreado. Sobre un diagrama que indica dónde se encuentra el sol en cada una de las horas a lo largo de todos los días del año, se superpone el horizonte local, obtenido a través de una lectura directa

de un teodolito instalado sobre el lugar en cuestión. En este diagrama podemos ver los obstáculos que pueden causar problemas de sombreado. En la figura 8 se muestra, a modo de ejemplo, el diagrama de sombras sobre el tejado del Palacio del Condestable Iranzo de Jaén.

El cálculo del coeficiente corrector adecuado, según el índice de sombreado, es complejo y supone el manejo de modelos de radiación para, integrando en el tiempo, obtener la fracción de energía sobre el total anual. Esto no resulta práctico en la mayoría de los casos; y si tenemos en cuenta, además, los problemas adicionales que plantea el sombreado parcial de un generador fotovoltaico (posibilidad de aparición de puntos calientes, etc.) es preferible no incluir las superficies con problemas de sombreado en el cálculo del área efectiva. Por todo ello, no vamos a entrar aquí en ese desarrollo prefiriendo desechar las superficies con problemas de sombreado.

En nuestro caso, dadas las características de nuestro clima, con una proporción muy elevada de radiación directa; cuando no se pueda garantizar la ausencia de sombras, al menos, en el intervalo entre tres horas antes y tres horas después del mediodía, durante todos los días del año, es aconsejable no considerar la utilización de dicha superficie para generador fotovoltaico [7][10].

Tras esta selección previa el *área efectiva del edificio* se calcula mediante la siguiente expresión,

$$A_{ef} = \sum k_{ji} \cdot A_{ji} \quad (3.3)$$

en donde A_{ji} son las áreas correspondientes de patios, terrazas y tejados considerados como superficies «activas» y k_{ji} es un coeficiente que adopta los siguientes valores:

En patios, y salvo caso excepcionales, tomaremos para dicho coeficiente el valor cero, puesto que en general, la instalación de paneles fotovoltaicos

en dichos recintos no será aconsejable, en vista de sus problemas de sombreado y el uso de esa parte del edificio.

En terrazas o cubiertas planas, dicho coeficiente adoptará un valor de 0,4; bien para evitar problemas de sombreado entre los propios paneles [7], o por estar en torno al 40% la superficie aprovechable en soluciones de integración compatibles con el uso de las mismas [11].

En tejados, o superficies inclinadas destinadas solamente a cubiertas, para el cálculo del coeficiente nos basaremos en el diagrama de radiación colectada a lo largo del año por una superficie en función de la orientación. En la figura 9 se muestra dicho diagrama calculado por M. Macagnan y E. Lorenzo para el caso de Madrid [12]. Diagramas similares podemos encontrar para Friburgo (D) [13] y para Holanda [14]. Las escasas diferencias entre ellos nos confirman que en nuestro caso podemos utilizar el modelo de Madrid sin errores apreciables¹.

A partir de este diagrama podemos calcular los valores para los coeficientes $k_{ji}(\alpha,\beta)$ normalizando con respecto a la superficie horizontal, es decir,

$$k_{ji}(\alpha,\beta) = p(\alpha,\beta) / p(0^\circ,0^\circ) \quad (3.4)$$

en donde $p(\alpha,\beta)$ es el porcentaje de radiación colectada por una superficie con una orientación determinada por el acimut α y la inclinación β , respecto a la máxima ($\alpha=0^\circ$; $\beta=34^\circ$); y $p(0^\circ,0^\circ)$ es dicho porcentaje para una superficie horizontal [$p(0^\circ,0^\circ) = 0.85$].

¹ El proyecto *Pérgola Fotovoltaica* incluye equipos de medida de radiación solar y un sistema de adquisición de datos con los que se están realizando, entre otras, medidas para obtener este diagrama en el caso de Jaén.

En la tabla VI se indica la matriz de valores que adoptan estos coeficientes en función de la inclinación y acimut de la superficie para el citado caso de Madrid.

Tabla VI		Coeficientes k_p para el cálculo del <i>área efectiva</i> de un edificio.										
ACIMUT α INCLINACIÓN β	-90°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	90°	
-20°	1	0.88	0.82	0.82	0.81	0.81	0.82	0.82	0.88	0.89	1	
-10°	1	0.94	0.94	0.88	0.87	0.88	0.88	0.89	0.94	0.94	1	
0°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
10°	1	1.06	1.06	1,07	1.09	1.09	1.09	1.09	1.08	1.06	1	
20°	1	1.08	1.12	1.13	1.13	1.13	1.13	1.12	1.09	1.07	1	
30°	0.94	1.06	1.12	1.14	1.15	1.15	1.15	1.13	1.09	1.06	0.93	
40°	0.88	1	1.09	1.13	1.15	1.15	1.14	1.11	1.06	1	0.83	
50°	0.82	0.96	1.06	1.09	1.12	1.12	1.11	1.06	1	0.94	0.76	
60°	0.76	0.92	1	1.01	1.06	1.06	1.05	1	0.94	0.88	0.71	
70°	0.65	0.82	0.88	0.94	0.94	0.94	0.93	0.94	0.84	0.76	0.59	
80°	0.59	0.76	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.80	0.76	0.71	0.53	
90°	0.47	0.65	0.71	0.73	0.73	0.76	0.71	0.70	0.65	0.59	0.47	

Los coeficientes que afectan a las superficies de fachadas están incluidos en la anterior tabla para el caso de $\beta = 90^\circ$; no obstante, y dado el elevado porcentaje de pérdidas que se puede apreciar en este caso (superior a un 25% con respecto a la superficie horizontal, que se eleva a más de un 33% si lo consideramos respecto a la inclinación óptima), el uso de fachadas como generadores fotovoltaicos debe ser considerado sólo en casos especiales. En países con climas diferentes al nuestro, en los que la radiación difusa constituya una fracción importante de la energía solar, se debe reconsiderar la validez de esta recomendación [15]. También habrá que considerar

aquellos caso especiales donde las fachadas, o partes de ellas, tienen una inclinación diferente de 90° (esto último puede ser habitual en edificios diseñados específicamente para aplicaciones solares, pero no, en edificios ya construidos).

En la tabla VII se resumen los valores de los coeficientes k_{ji} para todas aquellas superficies libres de sombras y, -salvo casos excepcionales que será necesario estudiar individualmente- de acuerdo con los criterios antes expuestos.

Tabla VII	Resumen de los valores de los coeficientes para el cálculo del <i>área efectiva</i> de un edificio.
PATIOS	$k_p = 0;$
TERRAZAS	$k_t = 0,4;$
CUBIERTAS Y TEJADOS	$k_{ri} = k_{ji}$ (Tabla VI);
FACHADAS	$k_{fi} = 0;$

III.3 Consideraciones sobre el dimensionado

Podemos utilizar tres criterios básicos para determinar el tamaño (potencia nominal en kWp) del generador fotovoltaico en el edificio:

- a) Máxima generación fotovoltaica.
- b) Generación fotovoltaica equivalente al consumo (autosuficiencia neta).
- c) Generación fotovoltaica para cubrir directamente una determinada fracción del consumo.

El criterio a) es el más simple. Consiste en determinar la potencia en kilovatios pico del generador fotovoltaico, P_{FMAX} , a partir de toda la superficie

colectora útil disponible en el edificio. De esta forma, teniendo en cuenta el η_p (=rendimiento de células x factor de empaquetamiento) correspondiente a los paneles elegidos, tenemos,

$$P_{FMAX} \text{ (kWp)} = \eta_p G_{ce} \sum A_{ji} \quad (3.5)$$

donde G_{ce} es la irradiancia en condiciones estándar, también llamado un sol o sol-pico, ($1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) y A_{ji} son las áreas de las superficies seleccionadas en el cálculo del *área efectiva*.

La ec. 3.5 nos da también la potencia nominal correspondiente para obtener todo el potencial generador fotovoltaico del edificio indicado en la ec. 3.2.

El criterio b) *Generación fotovoltaica equivalente al consumo*, será posible aplicarlo en caso de que E_{FMAX} sea mayor que C , lo que ocurre frecuentemente: p.e. en el caso de viviendas unifamiliares, en nuestro entorno climático y de nivel de vida, E_{FMAX} suele ser del orden de cuatro o cinco veces superior a C . Consiste en determinar el tamaño del generador fotovoltaico adecuado, para generar, en media, a lo largo del año una electricidad fotovoltaica equivalente al consumo anual del edificio. Es decir,

$$P_F \text{ (kWp)} = P_{FMAX} (C/E_{FMAX}) \quad (3.6)$$

donde la fracción (C/E_{FMAX}) es la proporción que representa el consumo respecto al potencial generador fotovoltaico del edificio y que nos determina la potencia nominal de generador con respecto a la máxima.

El criterio c) se basa en resultados de un reciente trabajo publicado por E. Caamaño y E. Lorenzo [16] gracias al cual se obtiene una expresión analítica para calcular la fracción de consumo cubierta directamente por

un generador fotovoltaico en función del tamaño de éste, en un edificio fotovoltaico conectado a la red². La expresión analítica correspondiente es:

$$y(x) = A[1 - \exp(-bx)] \quad (3.7)$$

en donde x está relacionado con el tamaño del generador fotovoltaico (generación fotovoltaica normalizada respecto al consumo) e y es la fracción de consumo cubierta directamente por el sistema fotovoltaico. La expresión gráfica de la ec. 3.7 puede verse en la figura 10.

Una vez fijada la fracción del consumo, y , que deseamos cubrir directamente con ESF calculamos el valor de x a partir de la ec. 3.7 y a partir de ahí obtenemos el tamaño (en kWp) del GFV a partir de la expresión:

$$P_F \text{ (kWp)} = x [P_{FMAX} (C/E_{FMAX})] \quad (3.8)$$

III.4 Ejemplos de diseño

Para finalizar este epígrafe, se muestran tres ejemplos de diseño en diferentes fases de realización, llevados a cabo por el Grupo Jaén de Técnica Aplicada (figs. 12, 13 y 14). Las características generales de cada uno de los proyectos se resumen a continuación en las tablas VIII, IX y X.

² Este trabajo está realizado concretamente para el caso de viviendas. El Grupo Jaén de Técnica Aplicada está desarrollando un trabajo, ahora en fase inicial, que trata de realizar el mismo estudio para otros sectores: industrial, comercial, oficinas, etc.

Tabla VIII	Resumen de características del Proyecto Pérgola Fotovoltaica .
OBJETIVOS DEL PROYECTO	Ejemplo de diseño de integración arquitectónica y estudio del comportamiento de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red.
TIPO DE EDIFICIO	Edificio docente de 3/4 plantas orientado al sur-este sin características arquitectónicas de especial interés (construcción típica de los años 50/60) con una parte de la cubierta plana y transitable, bien orientada y sin problemas de sombreado.
CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO	No intervienen en los objetivos del proyecto.
INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA	Estructura en forma de pérgola en la cubierta plana como soporte de los paneles.
TAMAÑO DEL GENERADOR	2 kWp (18.5 m ² de paneles).
DISEÑO DEL SISTEMA	23 paneles de 6 V y 88 Wp nominales, conectados en serie a un inversor de 1.8 kW y 220 Vac de salida.
ENERGÍA GENERADA	~ 3200 kWh/año (estimada). Equivalente al consumo medio por vivienda en España.
ESTADO ACTUAL	En funcionamiento desde el 19/2/95. Toma de datos para análisis de su comportamiento.
COSTE DEL PROYECTO Y FINANCIACIÓN	~ 13,5 Mpta (proyecto total de estación experimental) Financiado por: Consejería de Industria, Universidad de Jaén, Instituto de Estudios Giennenses y Solar Jiennense.

Tabla IX	Resumen de características del Proyecto IRANZO .
OBJETIVOS DEL PROYECTO	Realización de un caso de estudio del Proyecto REBUILD.
TIPO DE EDIFICIO	Palacio del S. XVI de gran valor arquitectónico, dentro del casco histórico de la ciudad, recientemente restaurado y destinado actualmente a centro de cultura del Ayuntamiento.
CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO	Elevado consumo eléctrico debido, fundamentalmente, a que en su restauración no se han tenido en cuenta criterios de ahorro y eficiencia energética. Consumo anual de unos 80.000 kWh centrado de 9 a 15 horas, y con ligeros picos estacionales en invierno y verano.
INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA	Integración de paneles traslúcidos en la cubierta del patio.
TAMAÑO DEL GENERADOR	6,4 kWp.
DISEÑO DEL SISTEMA	3 ramas de 20 paneles conectados en serie de 106 Wp y 18 Vcc nominales conectadas en paralelo a un inversor de 5 kW y 220 Vac de salida.
ENERGÍA GENERADA	~ 11000 kWh/año (estimada).
ESTADO ACTUAL	Proyecto aprobado por el Ayuntamiento el 16/5/95. Comienzo previsto de la instalación a finales de 1996.
COSTE DEL PROYECTO Y FINANCIACIÓN	25 Mpta (Ingeniería y Arquitectura +Obra Civil +Generador Fotovoltaico). Financiado por: Ayuntamiento de Jaén y solicitadas subvenciones al PAEE y THERMIE.

Tabla XI	Resumen de características del Proyecto UNIVER .
OBJETIVOS DEL PROYECTO	Suministro de energía fotovoltaica (200 kWp) a los edificios del Campus Universitario de Jaén.
CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO	Actualmente se está haciendo un análisis del consumo en varios edificios de la Universidad. Consumo total de energía eléctrica del Campus durante el año 1994: 1,4 GWh, con variaciones mensuales que alcanzan casi hasta el 50% sobre la media en Abril (mínimo) y en Junio/Julio (máximo).
TIPO DE EDIFICIO	En este caso se trata de un recinto de acceso público, con diversos edificios y zonas (aparcamientos, jardines, etc), potencialmente utilizables para instalación de paneles fotovoltaicos.
INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA	Se trata de ensayar tres soluciones de integración: 1) Cubiertas de aparcamientos, 2) terrazas y fachadas y 3) estructura de diseño específico para soporte del generador (torre fotovoltaica). Se pretende compatibilizar el uso habitual del recinto con la instalación de paneles.
TAMAÑO DEL GENERADOR	200 kWp.
DISEÑO DEL SISTEMA (TENSIÓN, NUMERO DE PANELES, RAMAS, ETC)	1 Subsistema de 25 kWp en la torre fotovoltaica. 2 Subsistemas de 70 kWp en las cubiertas de los aparcamient. Subsistemas aún por definir en fachadas y terrazas.
ENERGÍA GENERADA	280.000 kWh/año (estimada). Equivalente al 20% de la energía eléctrica consumida en el campus de la Universidad.
ESTADO ACTUAL	Propuesta aprobada por el Programa THERMIE. Si se completa la financiación adecuada, la ejecución del proyecto podría comenzar a finales de 1996.
COSTE DEL PROYECTO Y FINANCIACIÓN	300 Mpta. Financiación prevista: THERMIE, PAEE, Sevillana de Electricidad, IFA, Universidad de Jaén, Isofotón, Solar Jiennense, Instituto de Energía Solar (UPM) y Newcastle PV Application Centre.

IV. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE UN CONJUNTO DE EDIFICIOS

Si extrapolamos el problema desde un edificio a un conjunto de edificios como generador fotovoltaico (un casco urbano, un área residencial, polígono industrial, etc), tendremos que partir del análisis de una muestra estadística de edificios de la zona de estudio, a menos que el número de ellos sea pequeño. A partir de dicho análisis y conociendo algunos datos globales del conjunto (n° total de edificios, consumo total, etc.) nos es posible extrapolar los resultados a toda la zona de estudio, calculando el potencial fotovoltaico, y por último, determinar los efectos de una posible intervención fotovoltaica en la zona: cambio del escenario energético, mejoras medioambientales, etc. (Fig. 14)

Esta parte de la exposición se desarrolla aplicándola a un caso concreto como es el casco histórico de Jaén, y al trabajo realizado sobre el mismo dentro del Proyecto REBUILD [17]. No obstante los objetivos y condicionantes de ese proyecto eran algo diferentes de los de esta exposición, por lo que he realizado sobre el mismo las correcciones oportunas.

IV.1 Datos globales del área de estudio

El proceso comienza por un reconocimiento general de la zona y una obtención de datos arquitectónicos, energéticos y socio-geográficos de carácter global. A continuación se relacionan los datos que es conveniente obtener con indicación de sus valores para el caso del casco histórico de la ciudad de Jaén.

a) *Datos de carácter geo-climático:*

- Coordenadas geográficas: latitud, 37° 46' N; longitud, 3° 47' W.
- Altitud media: 550 m.
- Superficie: 1 km².
- Población: 33.000 habitantes.
- Radiación diaria media a lo largo del año³: 4.9 kWhm⁻² [18].
- Radiación diaria media en invierno (oct.-mar.): 3.6 kWhm⁻².
- Radiación diaria media en verano (abr.-sep.): 6.2 kWhm⁻².

b) *Datos de carácter energético (fig. 15):*

- Consumo total de energía de todos los edificios de la zona: 80.000 Mwh/año.
- Distribución de usos a los que se destina este consumo (tabla XI).

Tabla XI	Distribución de la energía total consumida en viviendas.	
USOS	% ENERGÍA TOTAL según una encuesta sobre 50 edif. del C.H. de Jaén	%ENERGÍA TOTAL Media Nacional [19]
Calefacción	24,4	29
Iluminación	9,7	10
Agua caliente	27,3	28,5
Refrigeración	9,9	
Otros	28,7	32,5

³ Lo más correcto es utilizar el año meteorológico típico y trabajar con la media diaria de radiación en cada uno de los meses. No obstante, en la mayoría de los casos con los datos aquí indicados es suficiente.

c) Datos de carácter arquitectónico:

- Número total de edificios: 3.982

- Tipologías de edificios:

* Viviendas unifamiliares - 71%

* Bloques de pisos - 26%

* Edificios públicos - 3%

- Es útil analizar también otras características arquitectónicas menos cuantificables como: Tipo, estado y orientaciones usuales de cubiertas y tejados, tipo de arquitectura (restricciones legales), etc...

IV.2 Los SIG en aplicaciones fotovoltaicas en edificios

La implantación de energías renovables en edificios requiere un pormenorizado análisis multifactorial de una gran cantidad de variables asociadas a entidades espaciales, y no cabe duda de que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) responden adecuadamente a las necesidades de este tipo de estudios.

Los SIG (o sistemas informáticos destinados al análisis y representación de datos gráficos georreferenciados y con capacidad para interrelacionar los elementos espacialmente entre ellos) surgen como una herramienta fundamental para acometer un trabajo de este tipo. En este caso se ha realizado un pequeño proyecto piloto de SIG sobre un área de la zona de estudio, que nos ha permitido desarrollar un procedimiento y conocer las posibilidades de esta técnica en las aplicaciones fotovoltaicas de edificios [20]. Describiré en este breve apartado las características generales y alguno de los resultados de dicho proyecto piloto.

El objetivo fijado fue estudiar una zona susceptible de ser generalizada a todo el casco histórico de la ciudad de Jaén. Se trata de incorporar en un proyecto de SIG todos los datos disponibles de los edificios de esa zona para

facilitar su análisis, y delimitar aquellos que reúnen las mejores condiciones para aplicaciones solares.

La base de datos se estructura en entidades de topología superficial: patios, terrazas, cubiertas con sus distintas orientaciones y base espacial de referencia del edificio. Estas entidades se agrupan en una entidad compleja -edificio- que es la que soporta la mayor parte del proyecto. Para una mejor comprensión visual de las vistas y mapas temáticos se introdujeron las calles y el perímetro de los edificios. El resto de los datos energéticos y arquitectónicos se incorporan como atributos alfanuméricos asociados a las entidades espaciales. La información de base fue obtenida a partir de los datos de campo que aportaron una serie de encuestas, el plano parcelario de Jaén a escala 1:1000 y fotografías de la zona (Fig. 16).

La explotación básica de un SIG se realiza a través de cuatro procesos fundamentales: visualización, edición, consulta y generación de informes. La visualización nos permite un reconocimiento visual de la zona, tanto en su totalidad como parcialmente con opciones de zoom y panorámica. La edición es un aspecto fundamental en los SIG ya que, cuestiones de gran importancia, como la corrección gráfica, actualización inmediata de la cartografía, unificación de entidades no contiguas superficialmente, etc. son posibles gracias a las funciones de edición que incorporan estos sistemas. Esta es la llamada *cartografía dinámica* que está destinada a convertirse en una herramienta imprescindible en este tipo de proyectos.

La generación de informes permite la elaboración de mapas temáticos, que ofrecen una información visual inmediata, y nos facilitan análisis complejos con la selección y muestra de entidades que cumplan la totalidad de los requerimientos especificados. En la figura 17 se muestran, a modo de ejemplo, dos resultados de este tipo. Junto a los mapas temáticos se pueden obtener también informes alfanuméricos, en los cuales se recojan los valores de las características especificadas, así como desarrollar aplicaciones específicas para el estudio y explotación de estos datos.

La aplicación práctica aquí presentada permite comprender cómo, a partir de datos base y cartografía estática, se puede generar un modelo dinámico que aporta toda la información necesaria para acometer una intervención solar en un conjunto de edificios.

IV.3 Selección de edificios

El siguiente paso del proceso consiste en la selección de una muestra representativa de edificios dentro del conjunto, para lo cual será muy útil el reconocimiento general de la zona y los datos antes mencionados. Sobre cada uno de los edificios de esta muestra se realizará un análisis, de acuerdo con lo descrito en el apartado III, para conocer el potencial de generación de energía fotovoltaica del mismo.

En nuestro caso se han seleccionado cincuenta edificios, procurando mantener la proporción entre las diferentes tipologías (viviendas unifamiliares, bloques de pisos y edificios públicos), y distribuidos proporcionalmente entre los distritos y secciones en los que se divide el casco histórico de Jaén. Dentro de esto, la selección definitiva del edificio atendió a criterios de facilidad para la realización de la auditoría energética y arquitectónica sobre los mismos. En la figura 18 podemos ver el resultado de esta auditoría.

A continuación se establecen una serie de parámetros que nos permiten valorar las posibilidades de aplicación de energía solar sobre cada uno de los edificios seleccionados, y desestimar aquellos que aparecen como no adecuados (convenientes) para una intervención solar [21]. Estos parámetros son:

* *Balance energético (B)*: relación entre la entrada (captación) de energía solar y el consumo del edificio, de acuerdo con la expresión,

$$B = G_a(0) \cdot A_{ef} / C \quad (4.1)$$

* *Adaptación estacional (D)*: parámetro que indica la adaptación del consumo eléctrico al perfil de radiación, y tiene en cuenta la radiación relativamente alta en invierno en nuestro país, en relación con otros más septentrionales. Se calcula mediante la expresión,

$$D = (C_V / C_P) (G_{av} / G_{at})^{-1} \quad (4.2)$$

* *Consumo por metro cúbico (M)*: relación entre el consumo y el volumen del edificio,

$$M = C / V \quad (4.3)$$

en donde V es el volumen total de edificio (m³).

* *Condiciones de tejados y fachadas (R)*: parámetro cualitativo que trata de reflejar el estado de las cubiertas del edificio y la posibilidad de instalación de paneles sobre ellas. Se evalúa como «bueno», «regular» y «malo».

Se ha considerado que un edificio es adecuado para una intervención solar cuando estos parámetros se encuentran dentro de los siguientes valores:

$$B \geq 10; \quad 3 > D > 0,3; \quad M < 12 \text{ kWh.m}^{-3}; \quad R = \text{regular o bueno.}$$

El cálculo de estos parámetros en cada uno de los edificios de la muestra⁴ nos ha permitido seleccionar finalmente 34 edificios (68%) como convenientes para aplicaciones fotovoltaicas. A través de la ecuación (3.2), por el procedimiento descrito en el epígrafe III, conseguimos el potencial

⁴ La tabla completa de los valores de cada uno de estos parámetros para los cincuenta edificios estudiados se puede ver en la ref. [17].

generador de energía eléctrica de origen fotovoltaico que para este conjunto de edificios resulta ser de 545.570 kWh/año lo que supone el 73% del consumo total de electricidad de los mismos y equivale al 49% del consumo total de energía de los cincuenta edificios. Para ello sería necesario la instalación de 341 kWp fotovoltaicos.

V. CONCLUSIONES

Se recogen en el presente trabajo algunas de las **experiencias y conocimientos adquiridos en cuatro años** de trabajos dedicados al desarrollo de una de las aplicaciones con más futuro, y que más puede contribuir a cambiar el actual carácter, todavía marginal, de la energía solar fotovoltaica: las **aplicaciones fotovoltaicas en edificios** conectados a la red.

Mediante la sistematización de los conocimientos adquiridos se ha desarrollado un procedimiento simple para evaluar el **potencial de producción de electricidad fotovoltaica de un edificio**, y unos **criterios para el dimensionado del generador**.

Igualmente, se plantea un método para evaluar el **potencial fotovoltaico de un conjunto de edificios**: un casco urbano, una zona residencial, etc. y los **efectos de una intervención solar** sobre los mismos, en los aspectos de cambio en el escenario energético y beneficios medioambientales. Se presentan también los **resultados** de la aplicación de este método **en el casco histórico de Jaén**. A pesar de aplicar en este análisis criterios de partida muy restrictivos a la hora de considerar los edificios, y superficies dentro de ellos, válidos para instalar generadores fotovoltaicos, destaca el resultado de una capacidad de generación fotovoltaica en torno a las tres cuartas partes del consumo actual de electricidad. Esta intervención supondría unos beneficios medioambientales importantes en cuanto a reducción de emisión de contaminantes.

Mediante la elaboración de un pequeño proyecto piloto de **Sistemas de Información Geográfica** se presentan éstos como una herramienta muy útil para el estudio de intervenciones solares en un conjunto de edificios. Este

proyecto nos muestra cómo utilizar los SIG en este campo, y las posibilidades que nos ofrece esta herramienta informática.

Finalmente, y como contrapunto a los anteriores desarrollos y análisis fundamentalmente teóricos, se resumen las características más importantes de **tres proyectos de aplicaciones fotovoltaicas en edificios** que se están llevando a cabo por el Grupo Jaén de Técnica Aplicada: uno ya funcionando, *Pérgola Fotovoltaica*; otro con un comienzo inmediato de ejecución, *Iranzo*; y el tercero, *UNIVER*, con diseño y proyecto de ejecución realizado y pendiente de conseguir la financiación adecuada.

NOMENCLATURA

A (m²) Superficie total horizontal que ocupa un edificio.

A_{ef} (m²) *Área efectiva de un edificio.*

$A_{fi}(\alpha)$ (m²) Superficie de fachada con una orientación α respecto al sur (este negativo).

A_p (m²) Superficie horizontal de patios.

A_t (m²) Superficie horizontal de terrazas.

$A_{ni}(\alpha, \beta)$ (m²) Superficie del tejado i del edificio, con una inclinación β sobre la horizontal y un acimut α con respecto al sur.

B (adim.) Relación entre la energía solar captada por un edificio y su consumo.

C (kWh) Consumo anual de electricidad.

C_1 (AW⁻¹m⁻²) Constante de proporcionalidad entre la corriente de cortocircuito de un panel y la irradiancia.

C_2 (°CW⁻¹m⁻²) Constante de proporcionalidad entre el gradiente de temperatura de un panel y la irradiancia.

C_m (kWh) Consumo mensual de electricidad.

C_H (kwh) Consumo destinado a calefacción.

C_L (kwh) Consumo destinado a iluminación.

C_{ot} (kwh) Consumo destinado a otras aplicaciones.

C_Q (kwh) Consumo destinado a agua caliente.

C_R (kwh) Consumo destinado a refrigeración.

C_v (kWh) Consumo de energía eléctrica en verano (Abr.-Sep.)

C_i (kWh) Consumo de energía eléctrica en invierno (Oct.-Mar.)

D (adim.) Parámetro que evalúa la adaptación estacional del consumo.

E_{FMAX} (kWh) Máxima energía fotovoltaica que es capaz de generar un edificio.

FF (adim.) Factor de forma de la curva V-I de un panel fotovoltaico.

G (Wm^{-2}) Irradiancia global.

$G_a(0)$ (Whm^{-2}) Radiación global anual sobre superficie horizontal.

G_{ce} (Wm^{-2}) Irradiancia en condiciones estándares (1 kWhm^{-2}).

G_{av} (Whm^{-2}) Radiación global en el período Abr.-Sep.

G_{at} (Whm^{-2}) Radiación global en el período Oct.-Mar.

I (A) Corriente eléctrica.

I_{SC} (A) Corriente de cortocircuito de un panel.

M ($kWhm^{-3}$) Consumo eléctrico por metro cúbico de un edificio.

N_d n° de días.

$P(t)$ (kWh) Potencia instantánea demandada en un edificio.

P_F (kWp) Potencia nominal de un generador fotovoltaico.

P_{FMAX} (kWp) Potencia nominal de un generador fotovoltaico para conseguir la máxima generación en un edificio.

P_{MAX} (W) Potencia máxima que puede entregar un panel.

R (adim.) Parámetro que evalúa las condiciones de las cubiertas de un edificio.

T_a ($^{\circ}C$) Temperatura ambiente.

T_c ($^{\circ}C$) Temperatura de la célula.

$TONC$ ($^{\circ}C$) *Temperatura de operación nominal de la célula.*

V (V) Tensión eléctrica.

V_{OC} (V) Tensión de circuito abierto de un panel.

REFERENCIAS

- [1]. A. Zervos. Renewable energies for buildings in historical city centres (REBUILD) Solar Europe, 4. 1993.
- [2]. D.M. Chapin, C.S. Fueller, G.L.Pearson. A new silicon photocell for converting solar radiation into electrical power. Journal of Applied Physic, 25 (1954), 676.
- [3]. J. Eguren. Células solares bifaciales de campo de superficie (BCS). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1981.
- [4]. G. Almonacid. Tecnología actual de células solares fotovoltaicas. Lección Inaugural, Curso 90-91. Campus Universitario de Jaén. Universidad de Granada, 1991.
- [5]. A. Luque. Solar cells and optics for photovoltaic concentration . Adam Hilger. Bristol, 1989.
- [6]. M.A. Green et al. Solar cell efficiency tables. Progress in photovoltaics, vol. 3, 51- 55 (1995).
- [7]. E. Lorenzo. Electricidad Solar. Ed. Progensa. Sevilla, 1994.
- [8]. G. Almonacid et al. Análisis energético y posibilidades de aplicación de energía solar en el casco histórico de la ciudad de Jaén. VII Congreso Ibérico de Energía Solar, Vigo, 1994.
- [9]. G. Almonacid et al. Energías renovables para edificios en centros históricos. Boletín del Instituto de Estudios Giennenses, nº 149. 1993.
- [10] E. Lorenzo. Edificios fotovoltaicos conectados a la red en el casco histórico de Jaén. Informe para el Proyecto REBUILD. Jaén, 1993.
- [11]. G. Almonacid et al. Photovoltaic Pérgola. An example of solar energy

- integración on buildings. 13th European PV Solar Energy Conf. Niza, 1995.
- [12]. M.H. Macagnan. Caracterización de la radiación solar para aplicaciones fotovoltaicas en el caso de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1993.
- [13]. J Schmid. PV in buildings. 11th PV Solar Energy Conf. Montreux, 1992.
- [14]. ECOFYS, consultancy and research. Utrech, The Netherlands.
- [15]. R. Hill, et al. PV on buildings. Estimation of the UK resource. 11th PV Solar Energy Conf. Montreux, 1992.
- [16]. E. Caamaño and E. Lorenzo. Photovoltaics in grid-connected buildings: Energy flow and economic aspect. Progress in Photovoltaics, Vol. 3, 1995.
- [17]. G. Almonacid et al. Estimation of the effects of an intensive solar intervention in the historical centre of Jaén (Spain). Progress in Photovoltaics, Vol. 2, 1995.
- [18]. I Tullot. Atlas de radiación solar de España. Instituto de Meteorología de España. 1984.
- [19]. Guía de la Energía. IDAE, Madrid, 1993.
- [20]. A. Garrido et al. Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica para la implantación de energías renovables en entornos urbanos. Mapping nº 19. 1994.
- [21]. G. Almonacid et al. Possibilities of solar energy use in buildings in the historical centre of Jaén (Spain). 12th European PV Solar Energy Conf. Amsterdam 1.994.

FIGURAS

Fig. 1.- El efecto fotovoltaico.

Fig. 2.- Célula solar fotovoltaica.

Fig. 3.- Mecanismos para incrementar la absorción de la luz en una célula solar: doble incidencia y confinamiento.

Fig. 4.- Módulo fotovoltaico.

Fig. 5.- Gráfica V-I de un panel fotovoltaico con indicación de los parámetros:

$$P_{MAX}, I_{SC}, V_{OC}, I_M, V_M, FF.$$

Fig. 6.- Diagrama esquemático de un edificio fotovoltaico conectado a la red mostrando los elementos básicos de un SFCR.

Fig. 7.- El edificio como generador fotovoltaico.

Fig. 8.- Diagrama de sombras sobre el tejado del Palacio del Condestable Iranzo.

Fig. 9.- Porcentaje de radiación anual colectada, respecto a la situación óptima, según las diversas orientaciones e inclinaciones de la superficie receptora.

Fig. 10.- Representación gráfica de la fracción de consumo cubierta por un generador fotovoltaico (GFV) en una vivienda [16].

Fig. 11.- Proyecto Pérgola Fotovoltaica.

Fig. 12.- Proyecto Iranzo. Aspecto de la integración arquitectónica del generador fotovoltaico.

Fig. 13.- Proyecto Univer. Torre fotovoltaica.

Fig. 14.- Intervención solar sobre un conjunto de edificios.

Fig. 15.- Consumo total y su distribución según los diferentes usos en edificios del casco histórico de Jaén.

Fig. 16.- Fotografía parcial de tejados y cubiertas de la zona de estudio con un proyecto SIG.

Fig. 17.- Algunos resultados de la explotación básica del proyecto SIG. a) Orientaciones de tejados y cubiertas, b) Clasificación de edificios según su consumo anual de electricidad.

Fig. 18.- Resultados de la auditoría energética sobre una muestra de cincuenta edificios del casco histórico de la ciudad de Jaén. a) Composición de la demanda según las diferentes fuentes de energía. b) Distribución de usos a los que se destina la energía eléctrica consumida.

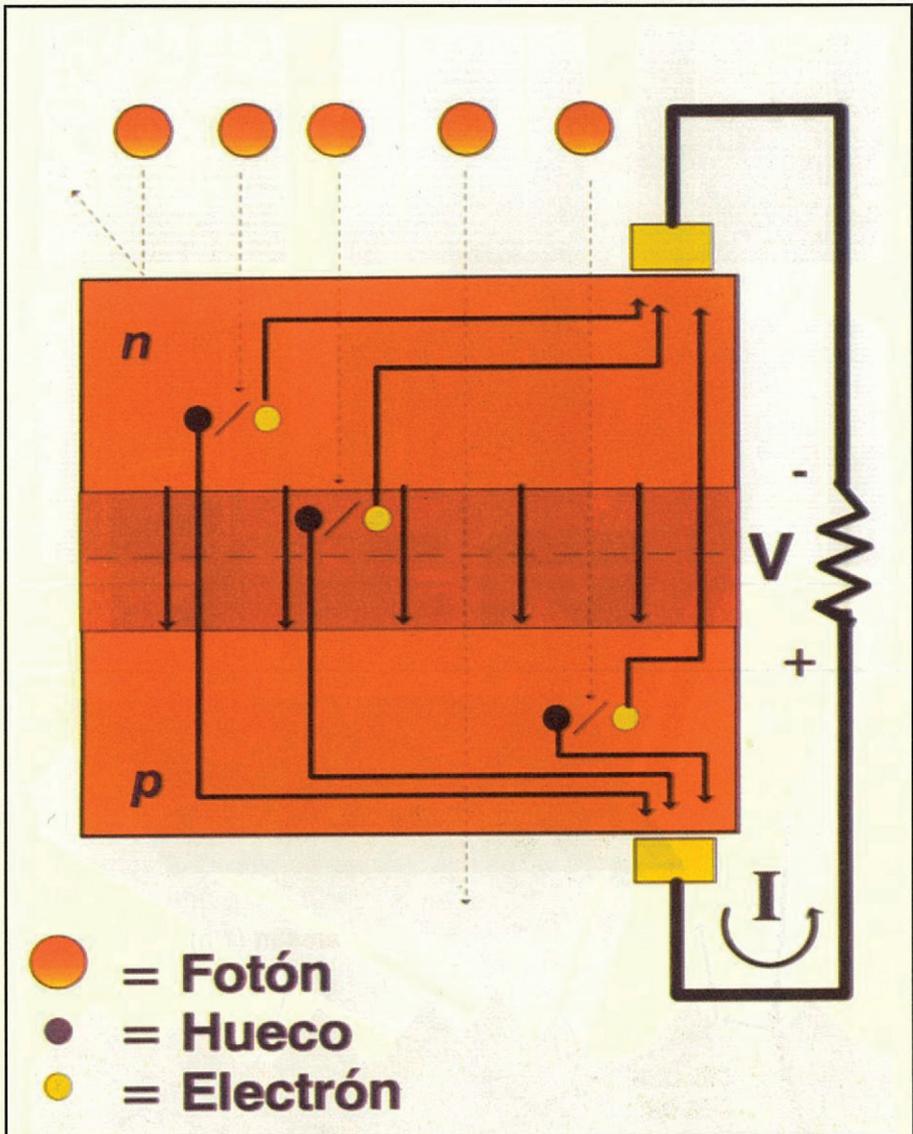


Fig. 1. El efecto fotovoltaico

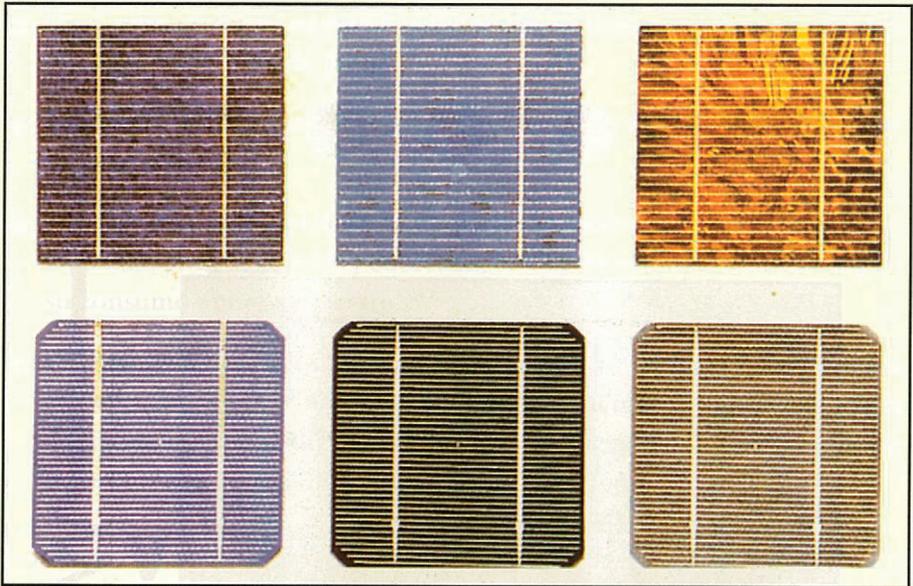


Fig. 2. Células fotovoltaicas

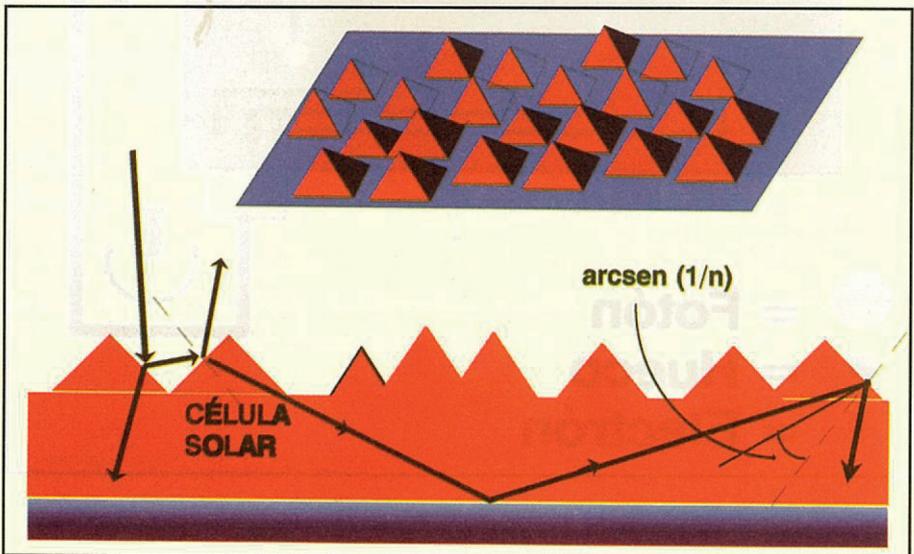


Fig. 3. Mecanismos para incrementar la absorción de la luz en una célula solar: doble incidencia y confinamiento.

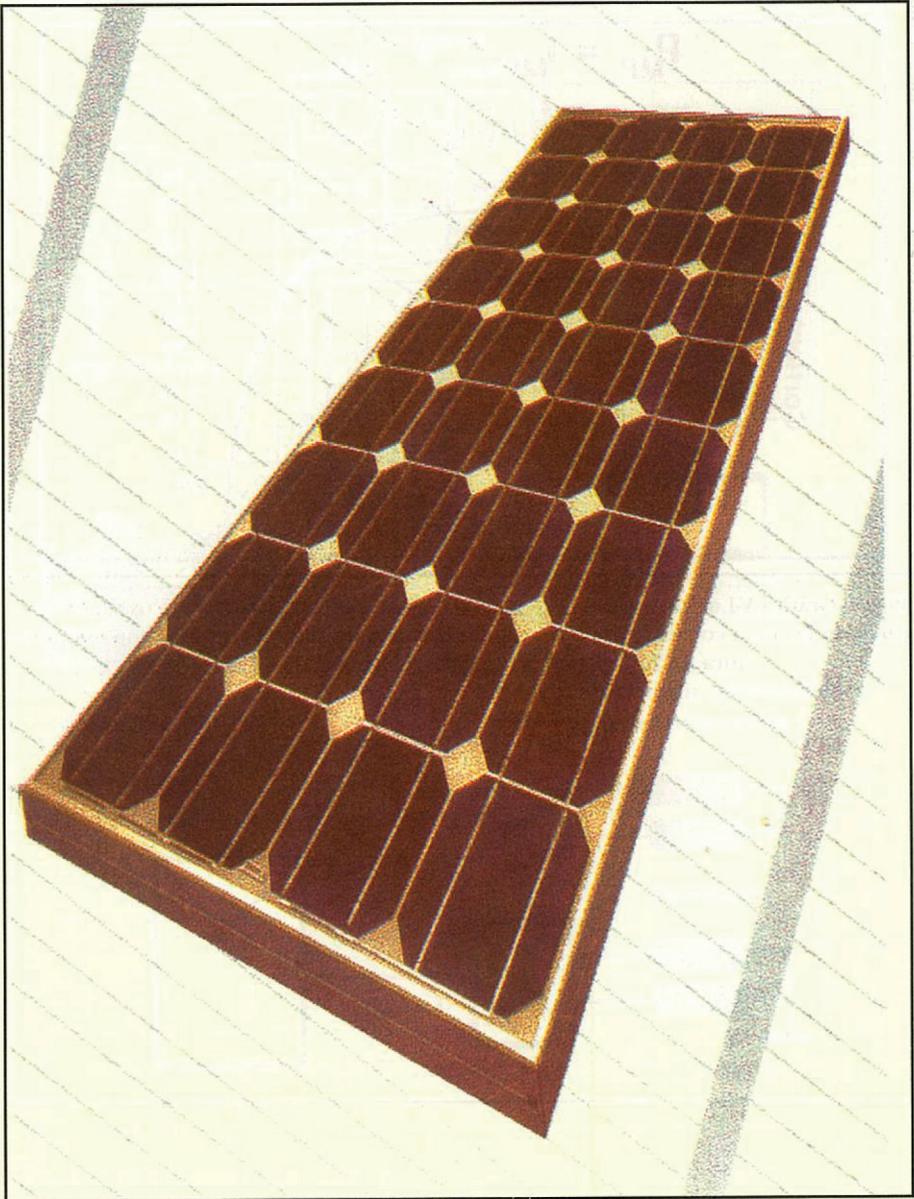


Fig. 4. Módulo fotovoltaico. Panel BP Solar BP585, de 85.0 Wp.

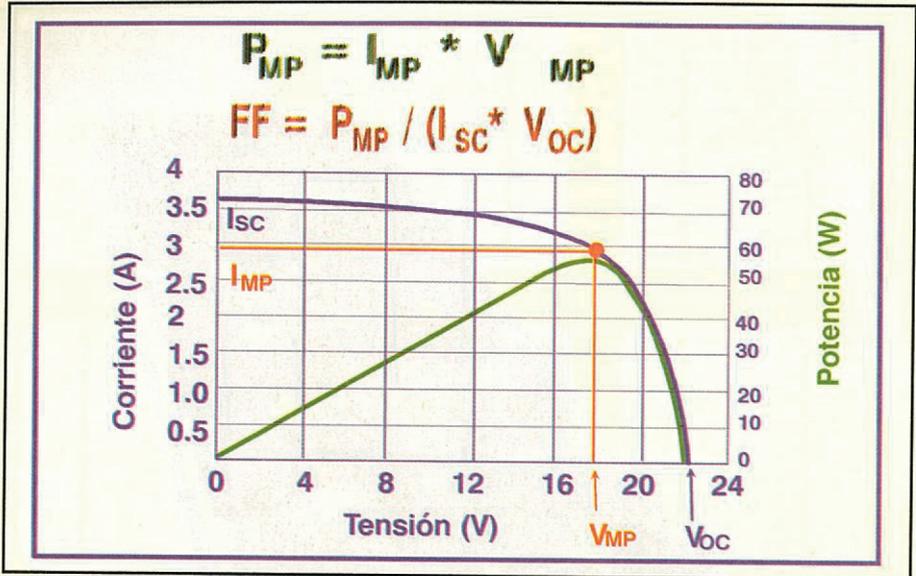


Fig. 5. Gráfica VI de un apanel fotovoltaico con parámetros característicos especificados para la curva correspondiente a una irradiancia de 1000 W/m² y en una temperatura de 25°. (Panel NT181EH de SHARP, de 57.2 Wp)

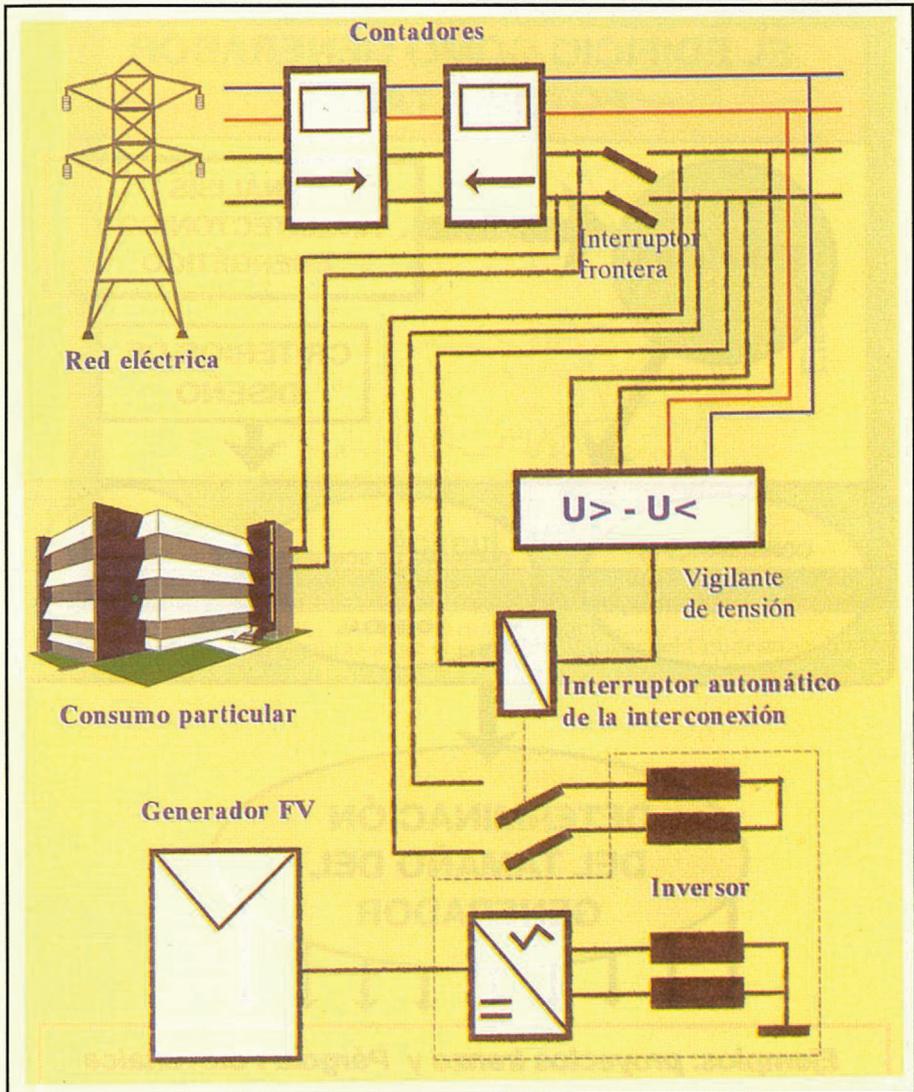


Fig. 6. Diagrama de un edificio fotovoltaico conectado a la red mostrando los elementos básicos de un SFCR

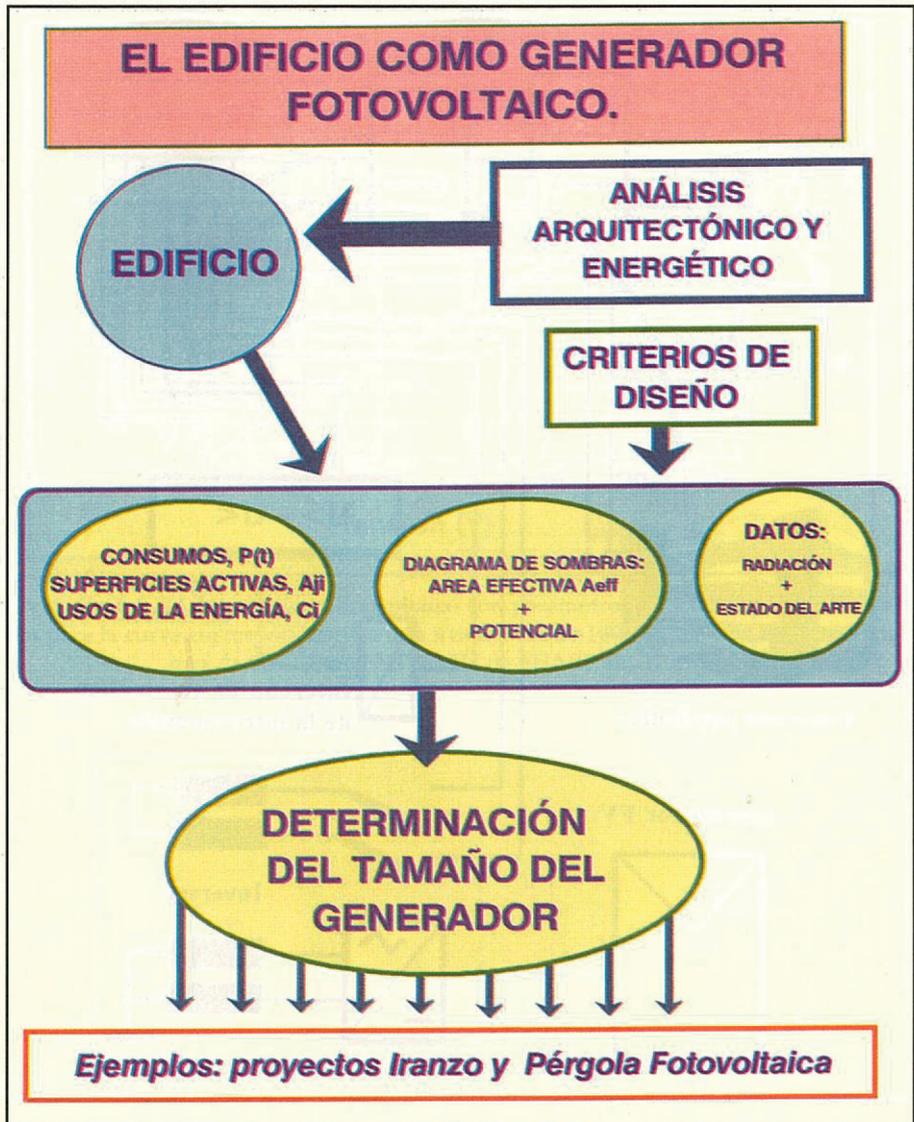


Fig. 7. El edificio como generador fotovoltaico.

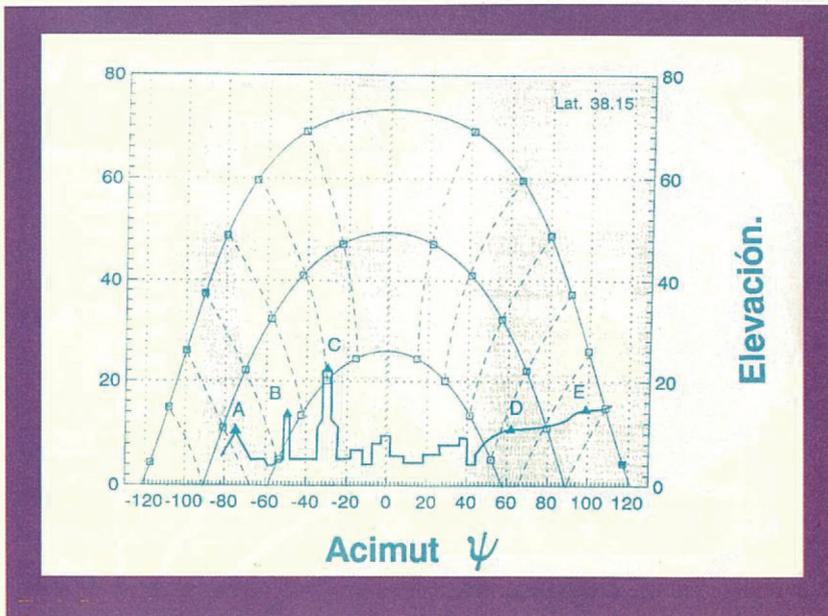


Fig. 8. Diagrama de sombras sobre el tejado del Palacio del Condestable Iranzo.

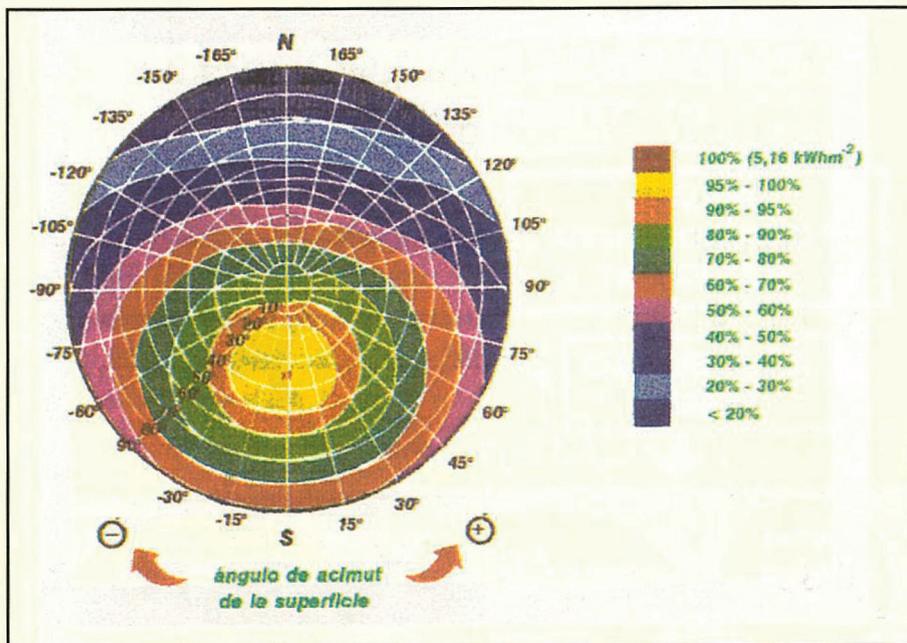


Fig. 9. Porcentaje de radiación anual colectada, respecto de la situación óptima, según las distintas orientaciones e inclinaciones de la superficie receptora. Gráfico extraído de la Tesis Doctoral “Caracterización de la radiación solar para aplicaciones fotovoltaicas en el caso de Madrid”, de M. H. Macagnan.

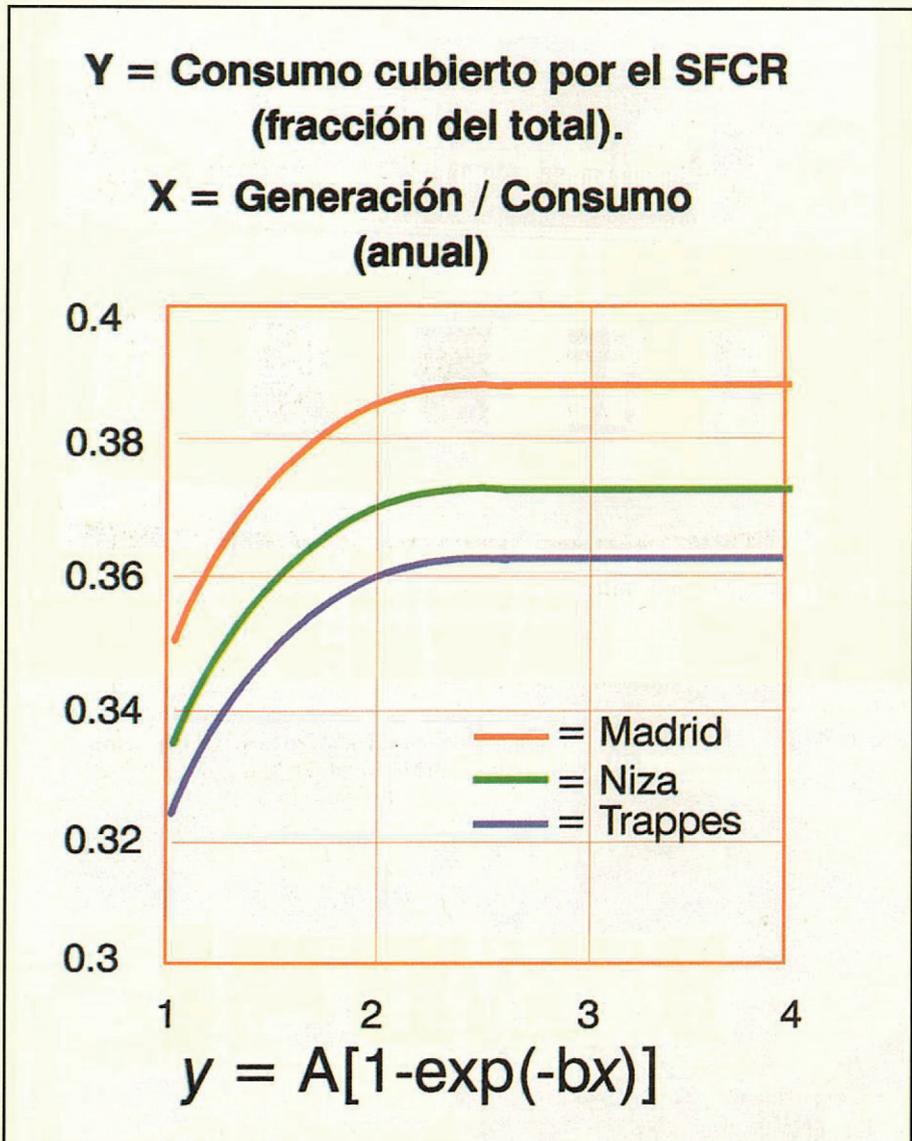


Fig. 10. Representación gráfica de la fracción de consumo eléctrico de una vivienda cubierta por un generador fotovoltaico en función del tamaño de este, para tres claves geográficos distintos.



Fig. 11. Un ejemplo de integración fotovoltaica en edificios: Pérgola Fotovoltaica (Escuela Politécnica Superior).



Fig. 12. Proyecto Iranzo. Aspecto de la integración arquitectónica del generador fotovoltaico.

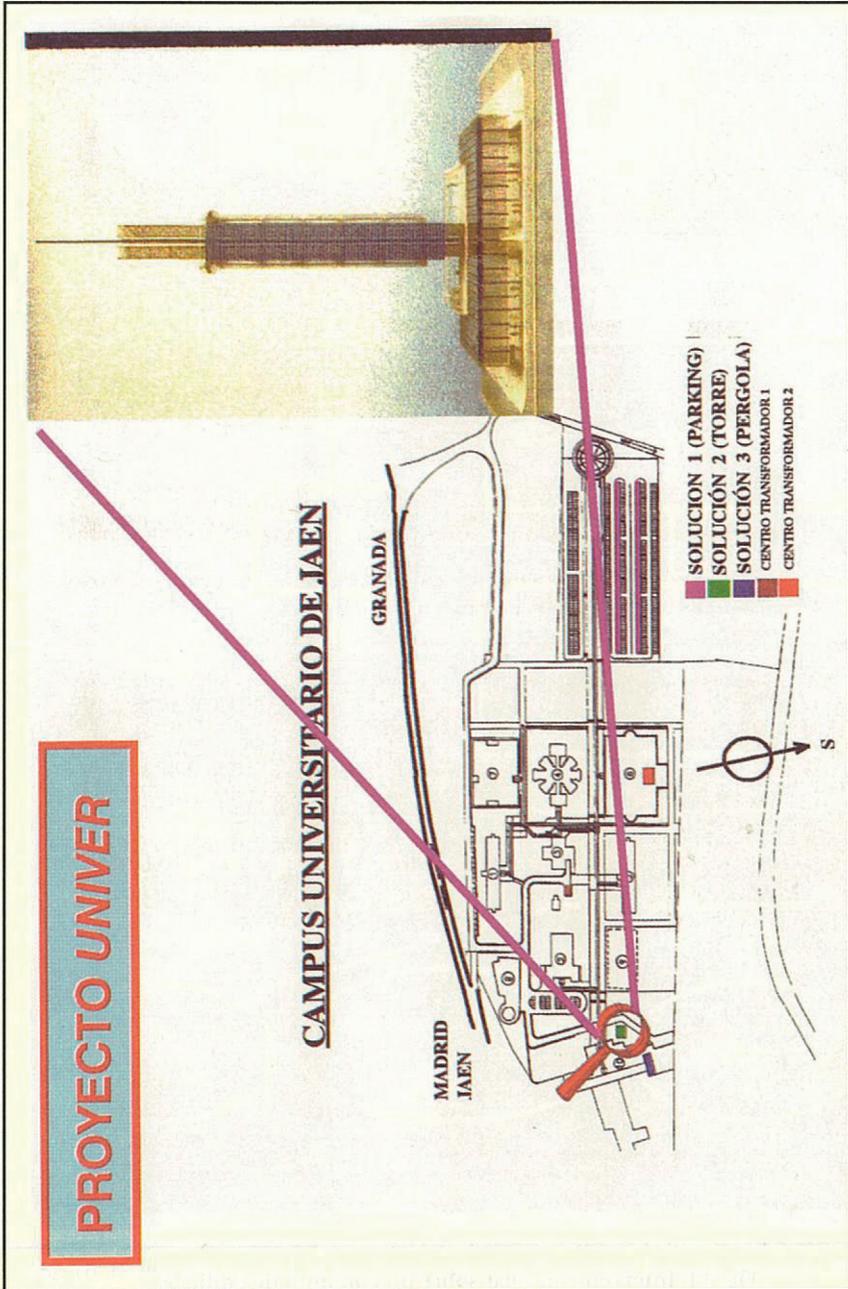


Fig. 13. Proyecto UNIVER. Detalle del enclave y aspecto de la torre fotovoltaica

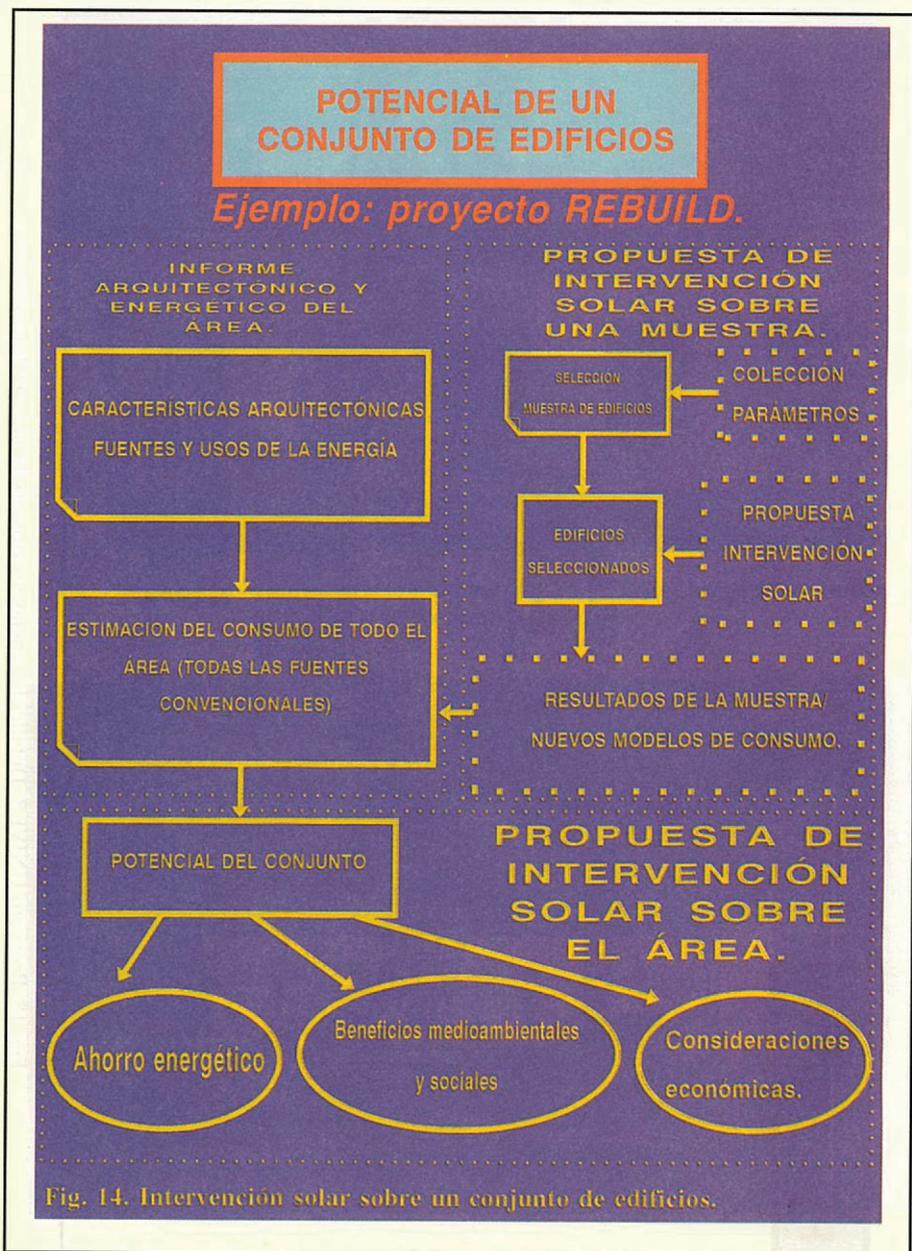


Fig. 14. Intervención solar sobre un conjunto de edificios.

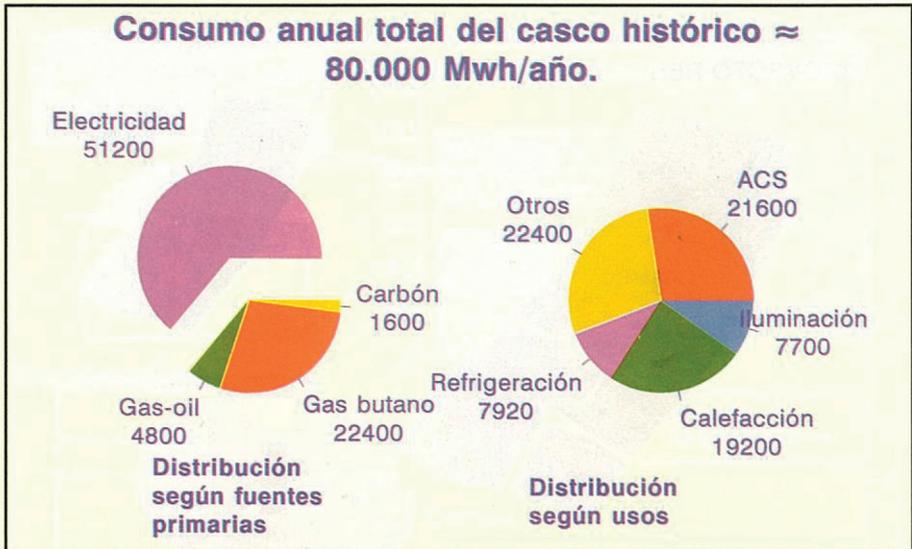


Fig. 15. Consumo total y su distribución según los diferentes usos en edificios del casco histórico de Jaén. (Todos los datos expresados en Mwh/año)



Fig. 16. Fotografía parcial de tejados y cubiertas de la zona para un proyecto SIG.



Orientaciones de tejados y cubiertas.

Fig. 17. Algunos resultados de la explotación básica del proyecto SIG.

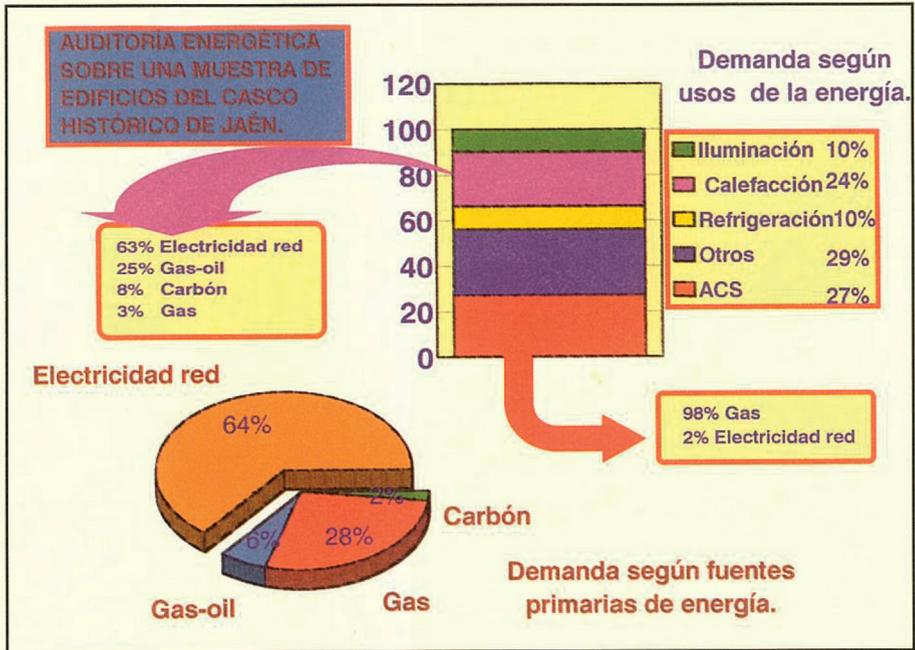


Fig. 18. Resultados de la auditoría energética sobre una muestra de cincuenta edificios del casco histórico de Jaén.



Servicio de Publicaciones
e Intercambio Científico