

## Eficiencia energética: estrategias aplicadas en el nuevo edificio de las Consejerías de Mérida (España)

### *Energy efficiency: implemented strategies in the new building for regional Government Offices in Mérida (Spain)*

Bruce S. Fairbanks<sup>(\*)</sup>, Eduardo Montero<sup>(\*\*)</sup>

Schlaich Bergermann und Partner; J. H. Salazar Trujillo, A. A. García Cardona y A. González Castaño, Arquitectos; Etap; Espacio solar; Centro de Investigación Tecnológica (CIDEMCO) y Centro de Domótica Integral (CEDINT)<sup>(\*\*)</sup>

#### RESUMEN

El Estudio GOP ha obtenido la adjudicación del proyecto del edificio de Consejerías en la ciudad de Mérida, diseñadas por Bruce S. Fairbanks, mediante el Concurso Internacional de Ideas convocado por la Junta de Extremadura. Las nuevas Consejerías de Mérida se constituyen como un ejemplo de edificio sostenible en todos sus aspectos. El edificio modifica el entorno natural externo moderando el clima y ofreciendo protección y cobijo. Entre las estrategias seguidas al diseñarlo está obtener el máximo confort en el interior: confort térmico, confort visual, calidad del aire interno y calidad acústica. Las nuevas Consejerías están diseñadas para alcanzar todos estos objetivos, manteniendo la idea subyacente de un edificio simple y obteniendo el máximo rendimiento de los recursos arquitectónicos antes de apelar a las instalaciones para el acondicionamiento del ambiente interno. La propuesta incorpora el intercambiador tierra-aire a un edificio institucional de gran tamaño. El sistema diseñado para utilizar la inercia del terreno como regulador parcial de las temperaturas interiores del edificio no se ha empleado nunca en grandes instalaciones en España, debido a que se requieren grandes volúmenes de aire por su bajo calor específico.

113-81

**Palabras clave:** eficiencia energética, sostenible, ahorro energético, medio ambiente, bioclimático.

<sup>(\*)</sup>Socios directores del Estudio GOP

<sup>(\*\*)</sup>Colaboradores

Persona de contacto/Corresponding author: emontero@gop.es (Eduardo Montero)

#### SUMMARY

*The architecture office GOP was awarded the execution of the project for the regional government office building ("Consejerías") in the city of Mérida, designed by Bruce S. Fairbanks, through an International Competition of Ideas summoned by the Junta de Extremadura. The new Consejerías in Mérida set the standards for a wholly sustainable building. It modifies its natural outdoors environment by soothing the climate and giving shelter. A design strategy was, among others, to gain as much comfort as possible inside the building: thermal comfort, visual comfort, indoor air quality and acoustic quality. The new Consejerías underlying precept is to make a simple building, so they are designed to meet all these objectives by taking full advantage of architectonic means rather than requesting to technical fixtures for the conditioning of their indoor environment. The system designed to benefit from the inertia of the soil as a buffer for the building interior temperatures has never been used in Spain in large facilities, because they require large air volumes due to their low specific temperature. In this case, an air-to-earth heat exchanger was included in the project for a large institutional building.*

**Keywords:** energy efficiency, sustainable, energy savings, environment.

El proyecto del estudio de arquitectura GOP ha sido seleccionado por la Junta de Extremadura mediante el Concurso Internacional de Ideas.

*The project by the architecture office GOP was selected by the Junta de Extremadura (Regional government) through an International Competition.*

Fecha de recepción: 27-III-06

Fecha de aceptación: 22-IX-06

## 1. INTRODUCCIÓN

El Estudio GOP ha obtenido la adjudicación del proyecto del conjunto de edificios para las Nuevas Consejerías en la ciudad de Mérida mediante el Concurso Internacional de Ideas convocado por la Junta de Extremadura.

El nuevo Centro Administrativo se ubicará en un solar procedente del derribo de 650 viviendas de la antigua UVA, en la barriada

de La Paz. La parcela pertenece a la Ordenación MIIM (Mérida Tercer Milenio) y colinda con el perímetro del Conjunto Histórico de la ciudad y con las proximidades del Acueducto de San Lázaro.

El edificio proyectado responde a la fuerza del acueducto e introduce en el diseño el concepto de muro. Esta idea se plasma en una serie de muros paralelos que conforman los núcleos y servicios de las distintas plantas que, a la vez que están unidos por forjados que cubren la luz entre muros, ofrecen unas «bandejas» diáfanas para la distribución de las oficinas. La planta baja del edificio también es diáfana, a excepción de los portales de acceso y algunas plazas de aparcamiento en superficie.

En la implantación urbana, estos muros se sitúan en paralelo a la cuadrícula establecida por la ordenación de los futuros edificios terciarios, en el lado este de la parcela. Los volúmenes de la edificación se desplazan para adaptarse a la forma irregular de la parcela dando forma a la plaza y demás espacios urbanos definidos por los futuros edificios.

El acceso principal a las consejerías se produce desde esta plaza, a través de un paseo peatonal en la planta baja, ubicado entre los soportales creados por las grandes pilas en las que descansa la estructura. El acceso de vehículos a los distintos aparcamientos se sitúa tanto en el extremo norte como en el sur de la parcela. A través de la planta baja, se accede a unos aparcamientos en superficie y a las áreas destinadas para carga y descarga, con acceso directo a los portales.

Por debajo de este nivel se ha proyectado un aparcamiento subterráneo con capacidad para unas 328 plazas. Hacia el lado oeste, el edificio se entierra en el talud suave del parque que baja desde el acueducto y los muros que estructuran el edificio continúan dentro del parque definiendo rampas que comunican la plaza urbana bajo el edificio con el citado parque.

Sobre el nivel de planta baja, se han proyectado otras 4 plantas en las que se desarrolla el programa de las diferentes consejerías, que se distribuyen en edificios paralelos, siguiendo el esquema definido por los muros de servicios. Los cinco muros contienen cuatro «bandejas» de oficinas paralelas: la primera acoge la Consejería de Infraestructuras y Desarrollo Tecnológico y la última la Consejería de Educación, Ciencia y Tecnología. Las bandejas intermedias albergan dos consejerías cada una: en la tercera se ubican la Consejería de Desarrollo

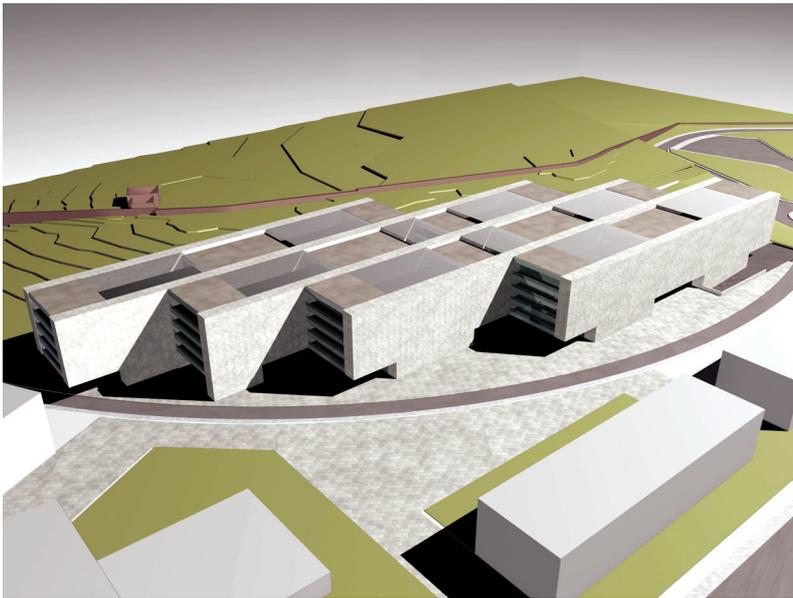
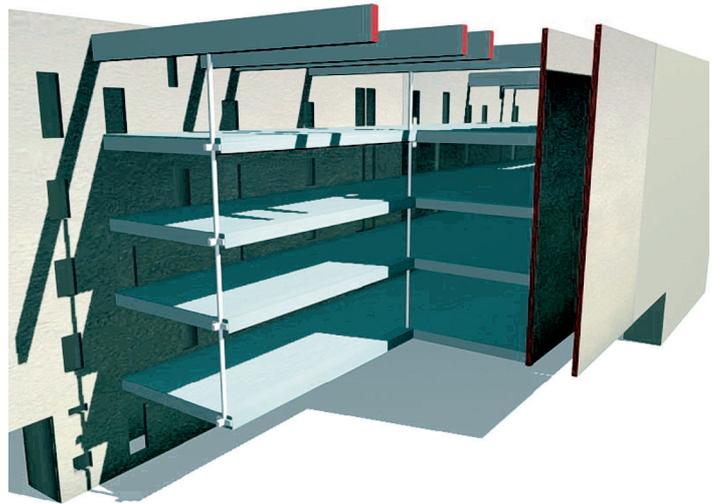


Figura 1. Nuevo Centro Administrativo. Maqueta.



Figura 2. Muros paralelos.



Figuras 3 y 4. Esquema de bandeja entre muros.

Rural y la Consejería de Sanidad y Consumo, y en la cuarta la Consejería de Cultura y de Bienestar Social.

El esquema definido de «bandeja» entre muros permite la máxima flexibilidad en el desarrollo del programa de cada consejería. Con la distribución de los patios interiores se ajusta la superficie a la necesidad de cada una y se garantiza una correcta iluminación natural. Como planteamiento general se han ubicado los gabinetes de los consejeros en los extremos de las últimas plantas, que cuentan con ascensor independiente y con comunicación directa a los niveles de aparcamiento. A continuación de éstos y en la misma planta se han ubicado las secretarías generales y en los niveles inferiores las direcciones generales.

El edificio modifica el entorno natural externo moderando el clima y ofreciendo protección y cobijo. El objetivo del diseño de las nuevas consejerías no es otro que obtener confort en el interior en todos sus aspectos: confort térmico, confort visual, calidad del aire interno y calidad acústica. Las nuevas consejerías están diseñadas para alcanzar todos estos objetivos, manteniendo la idea subyacente de un edificio simple y obteniendo el máximo rendimiento de los recursos arquitectónicos antes de apelar a las instalaciones para el acondicionamiento del ambiente interno.

## 2. DATOS DE PARTIDA

Ningún aspecto de un proyecto puede desarrollarse sin unos datos de partida correctos. En el caso de la eficiencia energética los datos del clima son fundamentales para poder desarrollar unas estrategias correctas.

### 2.1. Datos climáticos

Los niveles térmicos a emplear en el cálculo de las instalaciones de climatización han sido 20 °C para el invierno y 24 °C para el verano. Estos datos nos han permitido determinar con fiabilidad las dimensiones adecuadas de las instalaciones de climatización que se emplearán en el proyecto.

Hay que tener en cuenta que el clima de Mérida es seco, con valores de humedad relativa inferiores al 30% en los meses calurosos. Estos valores unidos a los de la temperatura manifiestan que los veranos son muy severos y hacen prever una elevada demanda de refrigeración. Por el contrario, los inviernos son más suaves, estación en la que los máximos de temperatura descienden hasta los 15 °C.

### 2.2. Temperatura del terreno

La temperatura del terreno a partir de una determinada profundidad es muy próxima a la temperatura media del terreno a lo largo del tiempo, lo que permite estimar con facilidad la temperatura ambiente media anual de una localidad.

A modo de ejemplo, en un suelo del centro de Europa a lo largo del año y a partir de 8 metros de profundidad, la temperatura se mantiene constante a lo largo del año, provocando que el suelo pueda ser considerado como un depósito infinito de energía a dicho nivel térmico (9 °C en este caso). También se puede concluir que debido a la gran inercia térmica del terreno, en casos como en el mes de mayo y a 4 metros de profundidad, la temperatura es de 7 °C, mientras que en la superficie ronda los 13 °C (círculos verdes).

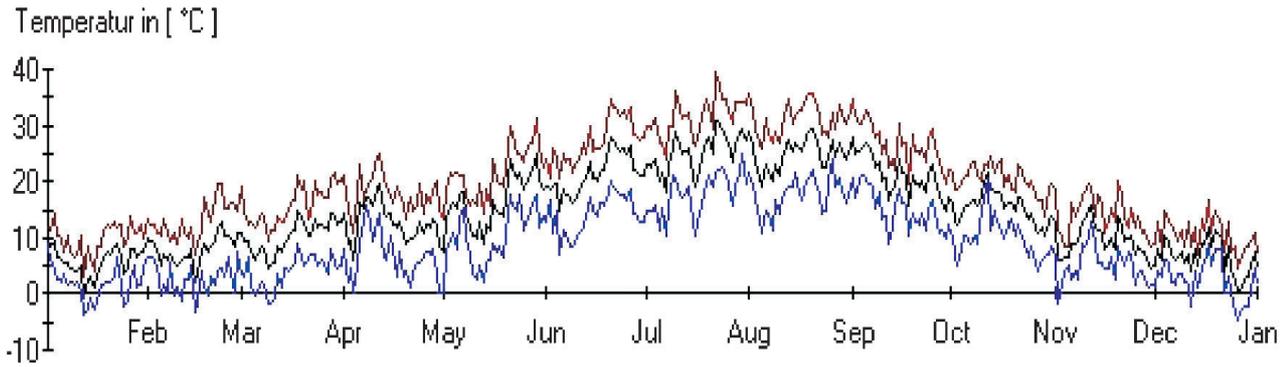
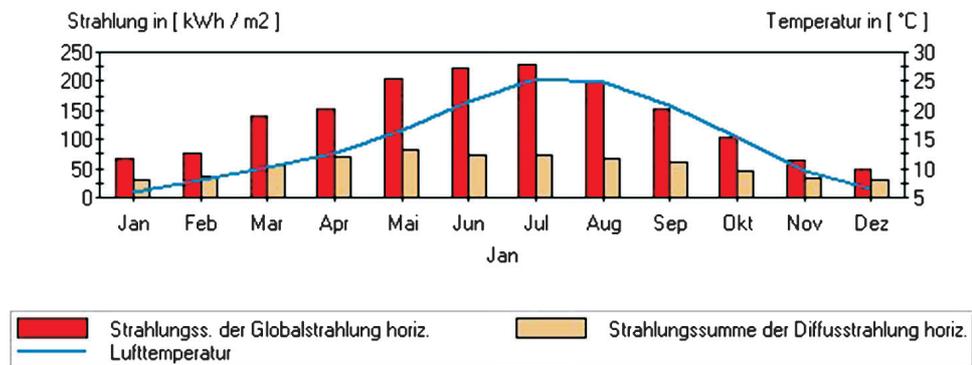
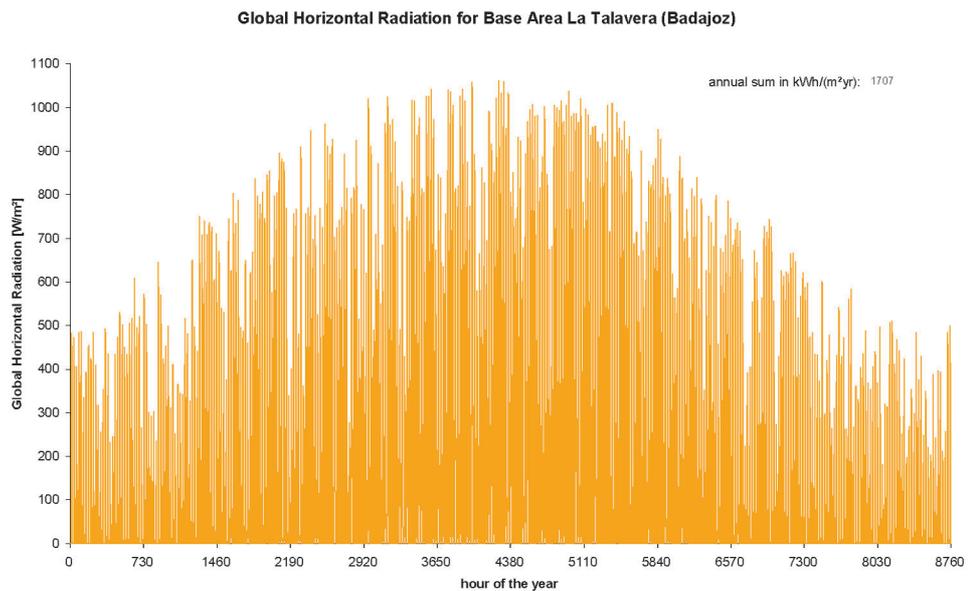


Figura 5. Temperatura ambiente.



Radiación solar global, valores mensuales



Radiación solar global, valores horarios

Figura 6. Radiación solar global.

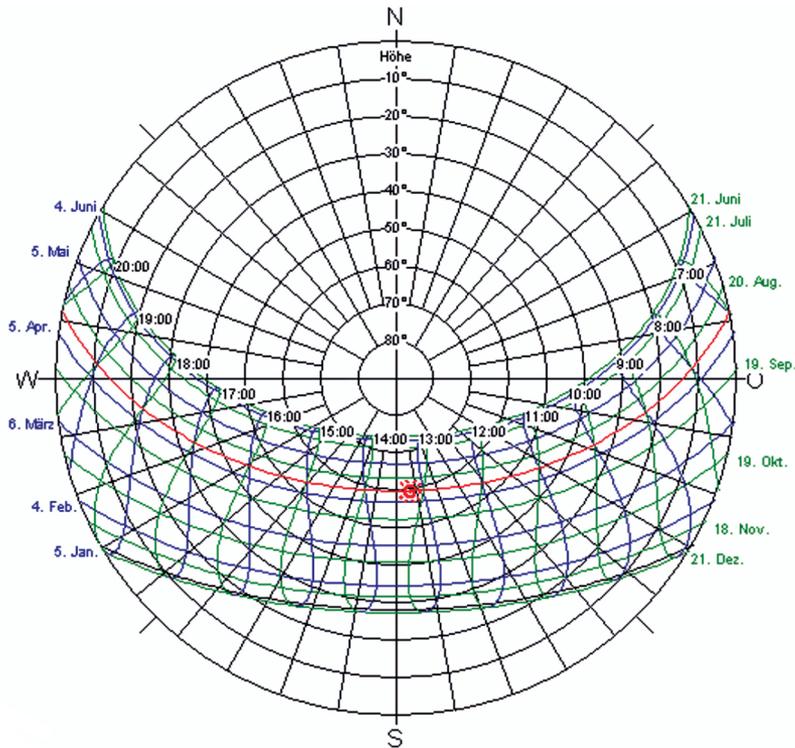


Figura 7. Carta solar de Mérida.

En el caso de Sevilla -más próximo al de Mérida- la temperatura del terreno, según estudios efectuados para la Expo 92, se estabiliza a 9 metros de profundidad a una temperatura próxima a los 20 °C.

Para el proyecto de las Consejerías de Mérida, está previsto medir la temperatura del terreno in situ antes de que comiencen las obras, para contrastar las hipótesis empleadas en el cálculo del intercambiador y así afinar el modelo.

### 3. INTENSIDAD DE LA ENERGÍA SOLAR SOBRE EL EDIFICIO

Como se sabe, la radiación directa es la que viene directamente del sol a la superficie de la tierra y es el componente que más calor aporta al edificio. Por esta razón, se debe tener en cuenta la trayectoria solar y las horas del sol con mayor intensidad para definir la orientación de las fachadas. La radiación difusa se queda sobre el manto de nubes y rebota en la bóveda celeste llegando a producir un efecto molesto de deslumbramiento.

Al provenir de todas las direcciones la posibilidad de su control es más limitada que la radiación directa. La radiación reflejada es aquella que es devuelta a la atmósfera y al entorno por las propiedades reflectivas del receptor.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, pasamos a detallar la envolvente de los edificios del conjunto.

La cubierta, lógicamente, recibe la mayor parte de la insolación. Por este motivo, la estrategia utilizada consiste en colocar otra cubierta adicional para sombrear la principal, que en este caso está conformado por paneles fotovoltaicos.

Respecto a la fachada este y oeste, cabe destacar que estos cerramientos están constituidos por una doble fachada de hormigón

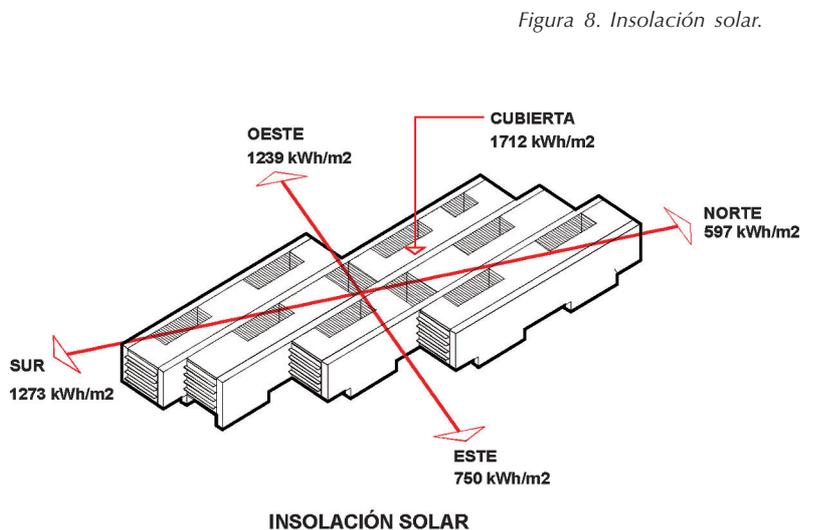


Figura 8. Insolación solar.

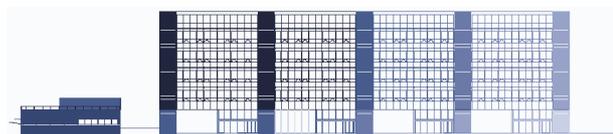
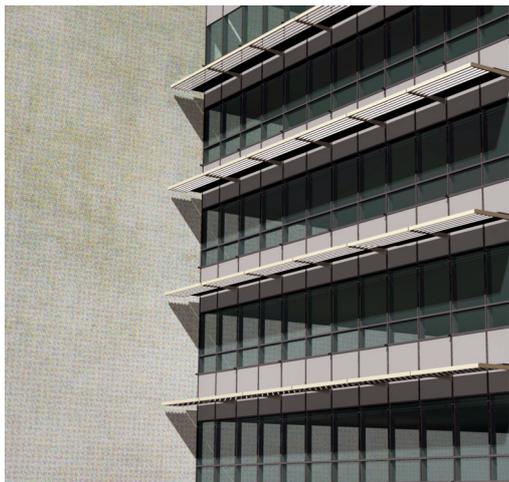


Figura 9. Radiación solar directa y difusa en las fachadas sur y este.

armado con una cámara intermedia en la que se alojan servicios -locales no calefaktados- que permite obtener un buen aislamiento por efecto de la citada cámara.

Aunque el aislamiento se hace por el interior, la cámara separa el ambiente exterior de la zona de uso interior, de forma que los puentes térmicos originados en los cantos de forjado solamente afectarán a zonas no calefaktadas.

No obstante, en el paramento interior de los dos que componen la fachada, el aislamiento se colocará con una barrera radiante, con objeto de reducir la ganancia solar térmica, ya que impiden el paso del calor al interior del edificio. La fachada oeste recibe un 60% más de radiación (1.239 Kw h/m<sup>2</sup>), por lo que el aislamiento de dicha fachada adquiere mucha importancia.

La orientación de la fachada determina la radiación solar que recibe. Partiendo de esta premisa, observamos que la fachada norte recibe poca radiación solar, aproximadamente la mitad de la que reciben la fachada sureste y oeste. Sin embargo, la fachada sur recibe mucha radiación, debido a su orientación y a los elementos de reflexión solar, puesto que la luz directa alcanzará el muro cortina sólo por las mañanas. Para evitar los deslumbramientos y la carga solar excesiva, se instalarán persianas venecianas (lama horizontal).

Las fachadas sur y norte reciben radiación solar directa y difusa. Como consecuencia de la radiación difusa del cielo y la luz solar reflejada, normalmente se siguen recibiendo flujos solares, incluso cuando la fachada está completamente sombreada.

Se han efectuado cálculos para determinar la energía solar incidente sobre las fachadas

situadas en el sureste y noreste desde la planta 1<sup>a</sup> a la 4<sup>a</sup>, siendo las diferencias pequeñas.

Debido a las placas de reflexión solar, la fachada sureste recibe predominantemente radiación difusa en verano y durante el invierno una considerable radiación directa por las mañanas.

#### 4. INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE TIERRA

Para la pre-refrigeración del aire ambiente en verano y el precalentamiento del aire ambiente en invierno se ha incorporado al edificio un intercambiador de calor aire-tierra. El proyecto contempla, por tanto, el diseño del mismo integrado dentro de las instalaciones de climatización del edificio.

El aire ambiente es introducido a través de un sistema de conductos enterrados. Al fluir por esos conductos, la temperatura del aire se aproxima a la temperatura del suelo circundante. Exceptuando las capas más próximas a la superficie, las temperaturas de la tierra varían muy poco a lo largo del año, tal como se ha indicado. Así, el flujo de aire que pasa por los conductos es enfriado por la tierra relativamente fría que rodea a éstos durante el periodo estival, y en invierno la tierra relativamente cálida precalienta el aire antes de que entre en el edificio. Para obtener el flujo de aire necesario se emplea un ventilador, que puede estar situado en el circuito, tanto delante como detrás del sistema de conductos. El conjunto consta de cuatro bloques y en cada bloque se prevén dos equipos de aire acondicionado. La solución propuesta integra dos intercambiadores de calor aire-tierra bajo cada edificio, es decir, se utilizarán un total de ocho intercambiadores.

Los flujos de aire seleccionados son de 26.000 m<sup>3</sup>/h o 30.000 m<sup>3</sup>/h respectivamente para cada bloque. Ambos valores son razonablemente parecidos, por lo que para simplificar el diseño del intercambiador se utiliza un módulo base con una capacidad de 15.000 m<sup>3</sup>/h<sup>(1)</sup>. En aquellos edificios que requieren sólo 26.000 m<sup>3</sup>/h se puede utilizar la misma geometría del intercambiador que para los que requieren 30.000 m<sup>3</sup>/h, pero con el flujo ligeramente reducido.

En el caso estudiado, el terreno tiene un fuerte componente granítico. El granito, como material en contacto con el intercambiador, es un suelo apropiado para este fin debido a sus características termodinámicas. Para aprovechar su conductividad térmica, relativamente alta, se debe asegurar que los conductos enterrados tienen un contacto térmico adecuado con el granito, por lo que durante su ejecución se efectuarán los controles pertinentes para evitar que se originen las oquedades y cavernas.

Para mantener bajas las pérdidas de presión dentro del intercambiador de calor, la velocidad del aire debe ser igual o menor a 4 m/s. En el proyecto se ha tomado un valor de diseño de 3 m/s para los conductos paralelos del intercambiador de calor, lo que conlleva una sección transversal mínima de 1,4 m<sup>2</sup>. Esto significa que la sección de los conductos de distribución y la sección total de los conductos paralelos deben ser aproximadamente la citada superficie.

A la hora de seleccionar los conductos a emplear se ha preferido un diámetro comprendido entre 200 mm y 350 mm, porque el costo de los tubos por área de sección es mínimo para tubos con diámetros comprendidos entre estos márgenes. Consecuentemente, en nuestro caso, se utilizarán 25 tubos de 18 m de largo y 300 mm de diámetro cada uno, instalados a 1 metro bajo el nivel del último sótano del aparcamiento del edificio. Los tubos se conectan en paralelo, con una distancia de 1 metro y utilizando el dispositivo «Tichelmann». Los colectores y los conductos de distribución se encuentran en el proyecto de hormigón.

Para obtener los datos sobre cuándo se tenía que enfriar o calentar el edificio, se efectuó un simple balance térmico utilizando cargas internas de 50 W/m<sup>2</sup>, un valor medio de la envolvente del edificio de 0.94 W/m<sup>2</sup> K y un suministro aproximado de aire fresco de 111.500 m<sup>3</sup>/h. No se tuvieron en cuenta las ganancias solares.

Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que se debe utilizar el intercambiador para la pre-refrigeración del aire

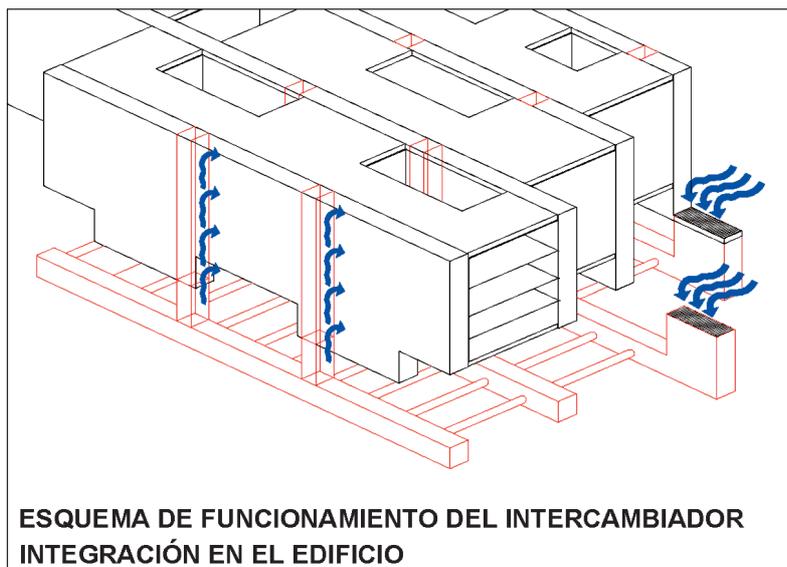
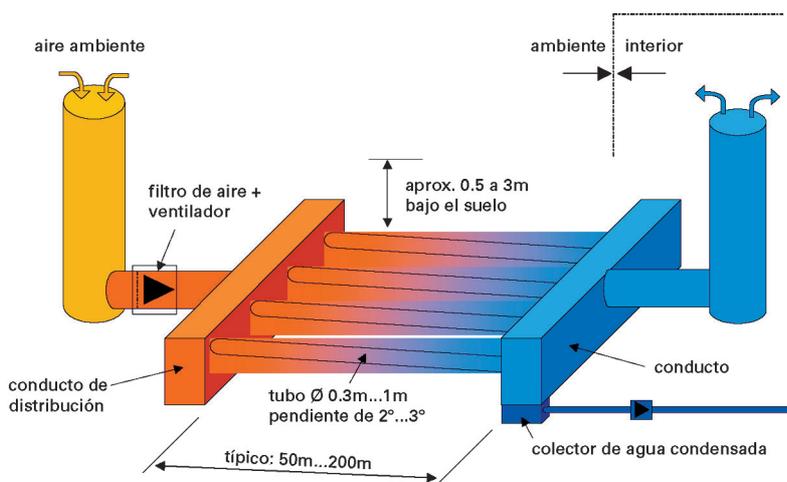


Figura 10. Esquema de funcionamiento del intercambiador.



cuando la temperatura ambiente es superior a 14 °C, y para el calentamiento cuando la temperatura ambiente es inferior a 10 °C.

De lo anterior se deduce que el intercambiador de calor aire-tierra debe ser puentado (no se utilizará) cuando la temperatura ambiente se encuentra entre 10 °C y 14 °C, pues en estas condiciones no existe necesidad en el edificio ni de calentamiento ni de enfriamiento. Estos valores fueron los que se utilizaron en la fase de diseño de detalle de la ingeniería durante la redacción del proyecto de ejecución.

Se necesitará, por tanto, emplear el bypass para evitar que el intercambiador influya negativamente en las condiciones del aire. Esto podría suceder, por ejemplo, un día de

Figura 11. Principio funcional de un intercambiador de calor aire-tierra (se muestra el uso en verano, para pre-refrigeración del aire).

<sup>(1)</sup>El mayor valor de 30.000 m<sup>3</sup>/h se divide entre dos, ya que se deben instalar dos intercambiadores de calor bajo cada edificio. Por ello, la capacidad nominal de cada intercambiador de calor es de 15.000 m<sup>3</sup>/h.

primavera, cuando la temperatura ambiente es adecuada para su uso directo como aire fresco en el interior del edificio, pero el que existe en el intercambiador sigue relativamente frío. Si el aire fresco para el edificio se tomase del intercambiador, se necesitaría usar calefacción. En este caso, es mejor puentear el intercambiador y usar directamente el aire ambiente.

Obviamente, el empleo de la temperatura ambiente para diseñar el funcionamiento del intercambiador de calor es una simplificación de las estrategias reales de uso ya que se deberían utilizar en las temperaturas internas del edificio pero sin un modelo detallado de todo el sistema, que incluya el edificio y toda la instalación de aire acondicionado, no es posible efectuar dicho estudio. Estas simplificaciones son, por tanto, la única forma de obtener los datos necesarios para la evaluación y selección del intercambiador de calor.

En el histograma de las temperaturas del aire ambiente a lo largo del año, se puede observar que durante unas 5.000 horas, la temperatura ambiente se mantiene superior a 14°C. De acuerdo con los cálculos simplificados, durante esas horas existirá una demanda de enfriamiento del edificio y el intercambiador puede entrar en funcionamiento en modo de refrigeración. Obviamente la demanda de refrigeración es mucho más frecuente que la demanda de calefacción, como es habitual en edificios de oficinas con altas cargas internas.

En la figura se muestran los resultados del modelo desarrollado para el intercambiador de calor aire-tierra. Se detalla el caso base, con módulos instalados a 1 metro de profundidad (parte alta de los tubos) bajo la superficie. Además, se estudió una segunda configuración en la que los conductos del intercambiador estaban instalados a una profundidad de 1,5 metros. Para este nuevo análisis (a mayor profundidad), el calentamiento anual es alrededor de un 5% mayor y la energía de refrigeración anual aproximadamente de un 10% mayor. Sin embargo, como los costes de excavación lógicamente aumentan cuando los conductos se entierran a más profundidad, se decidió emplear la cota de 1 metro por debajo de la cimentación en el proyecto.

Durante los días calurosos de verano (temperatura ambiente máxima superior a 37 °C), la temperatura de salida del intercambiador oscilará entre  $\pm 8K$ , alrededor de 22 °C, ofreciendo de este modo aire pre-refrigerado al edificio.

Además, en el histograma se pueden observar los datos de la temperatura de salida del intercambiador de calor aire-tierra cuando está en uso. Como se ha mencionado anteriormente, cuando la temperatura ambiente se encuentra entre los límites de calefacción y refrigeración, se puentea el intercambiador (bypass). También se puede ver que la temperatura de salida del intercambiador está mucho más próxima a la temperatura deseada del aire fresco que a la temperatura

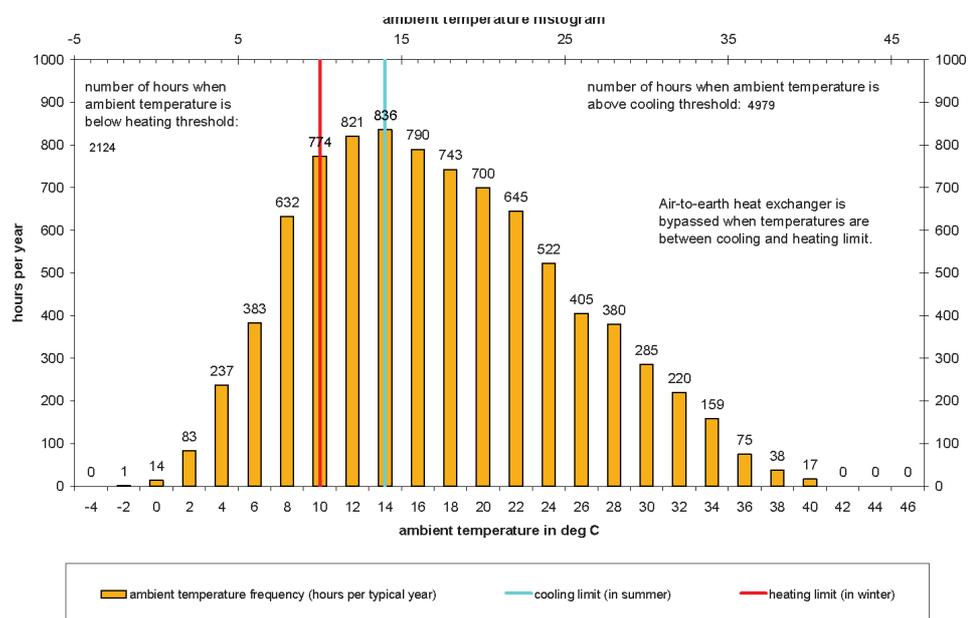


Figura 12. Histograma de temperaturas ambiente. Para el año que se muestra, la temperatura ambiente es inferior al umbral de calefacción admitido durante 2.124 horas, y superior al límite de refrigeración asumido durante 4.979 horas.

ambiente. La temperatura de salida del aire del intercambiador se encuentra entre los 4 °C y los 34 °C.

Basándose en los datos disponibles del suelo, se utilizó para los cálculos el granito, un tipo de suelo muy favorable para este tipo de sistemas. Para aprovechar las características positivas del granito, los tubos se colocarán de forma que se establezca un buen contacto térmico entre los tubos y la roca. Se efectuó un nuevo cálculo para determinar qué pasaría si existiesen condiciones menos favorables en el terreno, empleándose como caso pésimo la arena seca. En este caso, el resultado térmico (calor y frío) del intercambiador se penaliza en un 20%.

#### 4.1. Coste y datos ambientales

Los tubos de hormigón son los más ventajosos económicamente para diámetros superiores a 350 mm. No obstante, por razones sanitarias los más propicios son los tubos de PE, y como para el intercambiador de Mérida se requieren tubos entre 250 y 350 mm de diámetro, se decidió emplear estos últimos. Los tubos de PVC, que podrían haberse utilizado, son menos aconsejables por razones ecológicas.

La utilización de un sistema de intercambiador de calor aire-tierra permite reducir la capacidad del sistema «convencional» de aire acondicionado, minimizando los costes de inversión de este último. No obstante, este efecto no se ha tenido en cuenta en las estimaciones económicas que se han realizado.

A una profundidad de 10 metros, la temperatura de la tierra es prácticamente constantes durante todo el año. En las capas más próximas a la superficie se produce una oscilación térmica a lo largo del año, correspondiente a las distintas estaciones. En principio, cuanto más profundos estén los

tubos del intercambiador, mejor. No obstante, como la excavación es una unidad con un coste elevado al tratarse de una roca, se debe encontrar una solución de compromiso entre el coste de la excavación y una reducción del rendimiento del intercambiador en el caso de realizarse una instalación más superficial. Se considera que un valor sensato es una profundidad comprendida entre 1 y 1,5 metros por debajo del edificio.

#### 4.2. Costes de funcionamiento y ahorro energético

Para producir la misma cantidad de frío, un sistema de aire acondicionado convencional con un COP de 3 requiere  $168.000/3 = 56.000$  kWh de electricidad. El funcionamiento del intercambiador produce un ahorro anual de electricidad de unos 56.000 kWh-1.200 kWh (consumo del ventilador) = 54.800 kWh que a un coste de la electricidad de 0.08 €/kWh, supone unos 4.400 € de ahorro energético por año.

#### 4.3. Reducción de las emisiones de dióxido de carbono

Como se ha indicado en el anterior apartado, el sistema del intercambiador ahorra 54.8 MWh por año. Si tenemos en cuenta que la emisión media de CO<sub>2</sub> por kWh de electricidad en España es de aproximadamente unos 400 kg/MWh., el sistema de intercambiador propuesto reduce las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> de 22 toneladas al año en refrigeración. Si consideramos además unas emisiones de gas de efecto invernadero específicas para la calefacción alimentada con combustibles convencionales, de todo lo anterior se desprende que el resultado es un ahorro anual de 152 MWh x 300 kg/MWh, aproximadamente 46 toneladas. La reducción anual total de emisiones de gases de efecto invernadero ascendería a unas 68 toneladas.

**Tabla 1. Costes de funcionamiento y ahorro energético**

	Módulo único prof. A 1,0 m	8 módulos prof. 1,0 m	Módulo único prof. 1,5 m	8 módulos prof. 1,5 m	
Energía térmica:	19	152	20	160	MWh
Refrigeración del hx:	19	154	21	168	MWh
Consumo eléctrico ventilador B:	152	1216	152	1216	kWh

Todos los valores están redondeados.

A) La profundidad es el espesor de la capa de tierra sobre los tubos, es decir, el centro de los tubos de 0,3 m de diámetro está a 1,5 m bajo la superficie cuando se da una profundidad nominal de 1 m.

B) La electricidad necesaria para compensar las pérdidas de presión en los filtros y y en las entradas de aire no se incluye.

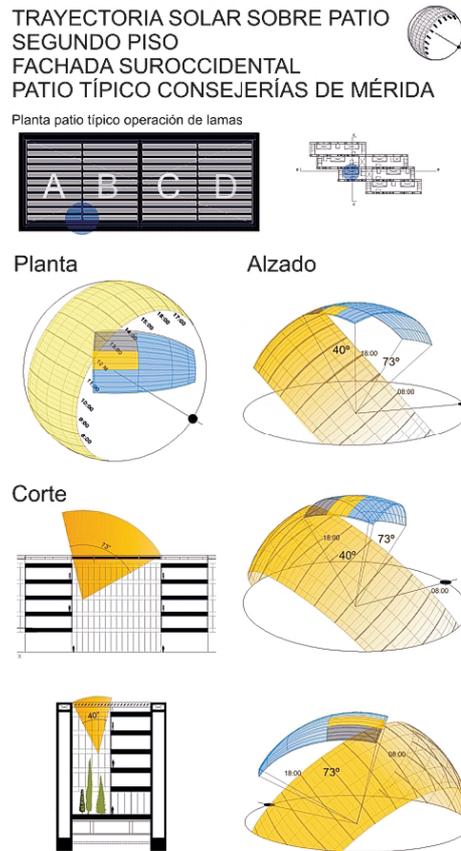


Figura 13. Control de radiación solar.

Como conclusión, cabe destacar que el empleo de un sistema de intercambiador es recomendable en este caso porque puede ser utilizado indistintamente tanto para el pre-calentamiento como para pre-refrigeración del aire. El sistema ahorra electricidad y disminuye el consumo de combustibles fósiles y, por tanto, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

La configuración empleada, está constituida por tanto por un total de 200 tubos HDPE bajo los cuatro edificios, instalados a una profundidad de 1 metro bajo la cimentación, que aportará unos 152 MWh de calor y 154 MWh de frío al año.

### 5. CONTROL DE RADIACIÓN SOLAR

Uno de los principales factores ambientales de los edificios es su relación con la mecánica solar y, a su vez, la integración de este fenómeno con las ganancias de luz natural por radiación difusa. Para el control solar, una de las mejores estrategias consiste en obtener la mayor cantidad de sombra sobre las fachadas del edificio, especialmente si se trata de superficies de vidrio, aspecto que no sólo afecta al cálculo de potencia del acondicionamiento de aire, sino que además permite la posibilidad de utilizar en los cerramientos vidrios claros que favorecen

la transmisión lumínica de las fachadas hacia el interior del edificio.

El control de las ganancias de radiación solar sobre las fachadas de los patios interiores se realiza en este caso mediante el diseño y la automatización de lamas mecanizadas. Este proceso se optimizó zonificando el sistema de lamas en cuatro grupos identificados con letras A-B-C-D, los cuales, a su vez, presentan 3 subcircuitos, lo que arroja un total de 12 mecanismos de control individuales.

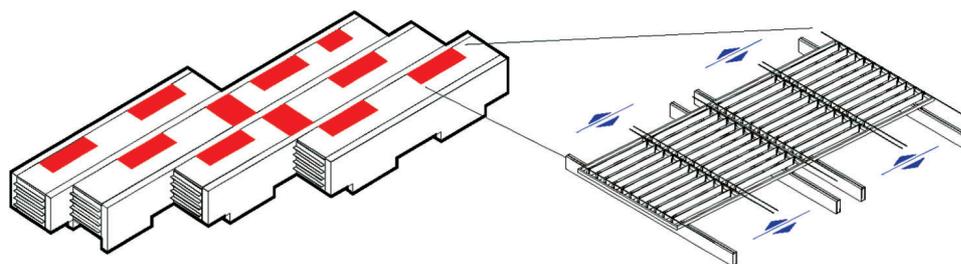
La operación de cada circuito es independiente del resto y sus secuencias fueron calculadas en las fechas y horas de mayor incidencia de radiación para cada fachada, en cada uno de los periodos estacionales definidos por la mecánica solar y en relación con la latitud de la ciudad de Mérida.

Como criterio de optimización se definió como lama cerrada aquella cuya posición bloquea directamente los rayos solares sobre el acristalamiento de las fachadas, y lama abierta aquella que permite el paso del sol sobre los paramentos de hormigón visto de la fachada. Este análisis se integró al proceso de optimización energética por ganancias de luz natural, en donde las lamas cerradas pueden estar bloqueando los rayos solares pero permiten el ingreso de luz natural difusa, siendo esta la razón de que los cálculos de las secuencias de operación estén definidos con precisión de minutos, siguiendo la posición del sol sobre las fachadas a lo largo del día, en cada periodo estacional. El resultado final de este estudio se reflejó en una serie de cuadros resumen con las secuencias de operación de cada sistema de lamas, información que alimentará el programa de operación automático del sistema de oscurecimiento de los patios.

### 6. ILUMINACIÓN NATURAL

El estudio de la iluminación natural permitió definir las condiciones de confort visual de las personas que trabajarán en el centro. También permitió marcar las estrategias de iluminación conjugada para obtener un adecuado rendimiento energético en la integración de los sistemas de luminarias en función del aprovechamiento de la luz natural, a partir del diseño de circuitos de lámparas por zonas, diferenciados para cada una de las plantas del edificio.

El cálculo de las ganancias y la distribución de la luz en el interior del conjunto de edificios se desarrolló mediante procedimientos analíticos y experimentales con modelos a escala, en donde se determina



LAMAS

Figura 14. Iluminación natural.

ron los factores de distribución lumínica y se modularon dichos valores para los periodos de verano e invierno de acuerdo a los niveles de luminancia en el cielo de Mérida.

Los cálculos de distribución lumínica consideran la influencia del sistema de sombreado de los patios para el control de radiación solar. En la fase final del proceso se determinaron las posibles zonas dotadas de circuitos independientes que constituyen el sistema final de iluminación conjugada de luz artificial como apoyo de la luz natural.

En la zona de automatización se ubicaron los puestos de trabajo en los que las ganancias de luz natural pueden garantizar el desempeño de las labores propias de una oficina con niveles superiores a los 500 luxes en la mayor parte del día durante todo el año. Esta zona es la que genera el mayor beneficio energético como consecuencia de la iluminación conjugada.

En cambio, en la zona intermedia de posible automatización, los niveles de iluminación natural de estas zonas oscilan a lo largo del día entre 200 y 300 luxes, por lo que un sistema artificial puede llegar a estar funcionando al 50% de su capacidad.

Por último, en la zona sin automatización, no es necesario conectar los circuitos eléctricos de luminarias al sistema, ya que no se tiene en cuenta los aportes de luz natural proveniente de patios y fachadas. Se recomienda que en esta zona estos sistemas operen en función de los horarios de trabajo y cargas de ocupación.

## 7. LUMINARIAS CON CONTROL DE LUZ

El Sistema ELS (Sistema de Control de Luz) utilizado en el conjunto regula la luz artificial en función de la cantidad de luz natural disponible, garantizando un entorno de trabajo agradable y generando unos importantes ahorros económicos, ya que el excedente de luz se regula automáticamente.

El sistema permite ajustar fácilmente cada luminaria de manera individual, de forma

que se adapte a las necesidades de cada usuario, siendo un sistema de control «suave» que no produce cambios bruscos perceptibles para el usuario.

El sistema de control lee la cantidad de luz que hay en el plano de trabajo (aportada por la luz natural y la luz artificial) y regula la luz artificial, de tal manera que en éste haya siempre el mismo nivel de iluminación.

El ahorro con respecto a los balastos electrónicos no regulables oscila entre el 25 y el 55% en nuevas instalaciones, como es este caso. No precisa de cableado adicional y se integra de manera discreta en la luminaria. Este sistema no sólo es innovador desde el punto de vista tecnológico, sino que representa el compromiso medioambiental de los usuarios en el uso eficiente de los recursos energéticos.

Distribución Lumínica con Patio Sombreado.



Distribución Lumínica con Patio Sombreado.



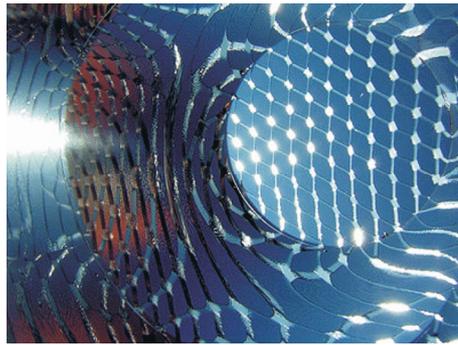
Distribución Lumínica con Patio Sombreado.



Distribución Lumínica con Patio Sombreado.



Figura 15. Luminarias con control de luz.



Figuras 16 y 17. Conductos de sol.

## 8. CONDUCTOS DE SOL

El empleo de estos elementos se considera un guiño energético y una posibilidad de vincular el interior del edificio con el exterior.

Los conductos de sol son un sistema de iluminación natural que capta la luz del sol mediante cúpulas situadas en la cubierta del edificio y la transporta varios metros hacia el interior por un conducto altamente reflectante, lo que permite iluminar espacios oscuros. Una cúpula similar a una claraboya convencional, que se encuentra situada en una zona bien soleada durante el mayor tiempo del día, es el elemento que remata el conducto en cubierta.

Bajo esta cúpula se sitúa una celosía reflectante que desvía los rayos de sol hacia el interior del conducto, mejorando el rendimiento durante las primeras horas de la mañana, las últimas de la tarde y durante los

meses de invierno. La celosía está formada por una única pieza de alta reflectancia, orientada hacia el sur. En el interior se colocará un marco que sujeta un difusor a través del cual sale la luz del conducto.

La máxima cantidad de luz se obtiene en primavera y en verano, cuando el sol está alto y entra muy vertical al conducto. En otoño e invierno la altura del sol es menor, lo que da lugar a un mayor número de reflexiones dentro del conducto. Este efecto se puede minimizar ya que existen celosías reflectantes que desvían el sol bajo de invierno hacia el interior del conducto optimizando su rendimiento.

El proyecto contempla, tal como se ha comentado anteriormente, conducir la luz del sol hacia el interior del edificio para iluminar con luz natural 16 salas de reuniones situadas en zonas apartadas de las fachadas y los patios interiores, con el sistema mencionado.

Las salas se encuentran distribuidas a lo largo de las 4 plantas superiores del edificio e iluminadas por conductos de sol agrupados en dos módulos. Cada módulo está constituido por un grupo de 8 conductos de sol de 900 mm de diámetro, de manera que cada conducto ilumina una sala. Con esta distribución, cada elemento capta la luz solar mediante una cúpula situada en la cubierta del edificio y la transporta tantas plantas como sea necesario a través de un conducto de reflectancia especular (98%) fabricado en aluminio anodizado.

Con esto se consigue transportar la luz del sol hasta 15 metros de distancia con las mínimas pérdidas posibles. En el extremo inferior del conducto se instala un panel difusor de alta transparencia que distribuye la luz dentro de la zona a iluminar. El resultado es un espacio interior que mantiene la conexión de sus usuarios con el exterior y disfruta de todas las ventajas de la luz natural.

## 9. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

El método empleado para la evaluación dinámica ha sido el CIBESE de admitancias, el cual fue desarrollado por el Chartered Institute of Building Service Engineers británico, que tiene como objeto dimensionar correctamente las instalaciones de calefacción y refrigeración de los edificios, calculando la demanda neta de energía prevista, así como el máximo valor de potencia necesario en los picos de consumo.

Para evaluar la eficiencia se analizarán los siguientes casos:

### **9.1. Edificio de referencia del Código Técnico de la Edificación (CTE)**

El edificio a estudiar es el mismo que está proyectado pero aplicando los valores de Transmitancia térmica impuestos por el CTE, que en este caso son los siguientes:

Se observa que para porcentajes de huecos superiores al 60% no existe requisito definido explícitamente. En el cálculo se ha efectuado el valor más restrictivo, que es el de la fachada sur (que el CTE asigna como SO, debido a que se desvía más de 18° del sur), en la que se exige un Factor Solar Modificado de 0,39.

Cabe mencionar, que en el edificio de referencia no se ha tenido en cuenta el intercambiador. Esto se ha hecho así porque se entiende que el intercambiador es un elemento que aporta valor añadido al proyecto, y que la mejora del rendimiento energético que produce no puede ser tomada en cuenta en el edificio de referencia.

Si se tuviera en cuenta en este último, desvirtuaría el objetivo final del sistema y acabaría derivando en la ausencia de soluciones innovadoras, debido a que si al incorporarlas a un proyecto son incluidas automáticamente en el edificio de referencia, el ahorro energético que producen queda anulado y la inversión realizada no se vería reflejada en su justa medida en la memoria técnica correspondiente.

Se ha empleado el mismo criterio para las lamas orientables motorizadas que el edificio incorpora en la parte superior de los atrios, destinadas a frenar el paso de la radiación solar en verano y cuya aportación se ha considerado que debe ser tratada de forma independiente en el estudio efectuado. Por ello, en el edificio de referencia que tampoco está incorporada esta solución.

### **9.2. Edificio de proyecto sin intercambiador**

Este caso es el resultado de modelar térmicamente el mismo edificio del caso anterior, pero con los valores de cerramientos que realmente se han proyectado y la incorporación de las lamas en la zona superior de los patios.

Se observa que el ahorro en calefacción es muy significativo, cercano al 30%. Este hecho está motivado por la gran calidad de los cerramientos proyectados, que ofrecen un coeficiente de aislamiento muy superior al

exigido por el CTE. En refrigeración, por el contrario, no se mejora sensiblemente el rendimiento, la demanda de refrigeración disminuye en 1,62%. Este resultado indica que un mayor aislamiento de los cerramientos no se ve reflejado directamente en un ahorro en refrigeración.

El estudio efectuado contempla cargas térmicas internas, debidas a la maquinaria, la iluminación y la presencia de personas. Esto unido a un mayor nivel de aislamiento con el exterior, produce que el calor generado encuentre más dificultad para ser evacuado.

El Código Técnico no impone cargas térmicas internas en el cálculo, por lo que actuando sobre este parámetro en el modelo implementado, se puede conseguir que la carga de refrigeración resulte similar a la calculada para el caso anterior, el edificio de referencia. No obstante, el objeto del estudio realizado es evaluar el edificio tal y como está proyectado, es decir, con la presencia del intercambiador diseñado para aliviar sensiblemente la demanda de refrigeración. Por ello se mantiene la presencia de cargas internas, con el fin de proporcionar resultados más próximos a la realidad.

Este valor, por tanto, no es representativo de la calidad energética del proyecto, aunque pone de manifiesto lo comentado anteriormente, respecto a la validez de introducir o no el intercambiador proyectado en el edificio de referencia.

Si el edificio de referencia se modela con el intercambiador, puede producirse la paradoja de que un proyecto diseñado para tener un consumo de energía mínimo no cumpla el CTE, y que la forma más sencilla de cumplir con los requisitos del mismo fuera realizar un proyecto menos ambicioso cuyo edificio de referencia sea, a su vez, más permisivo.

Por ello, en el estudio efectuado se ha contemplado el intercambiador como un elemento de mejora del proyecto, y por tanto, tal como se ha indicado anteriormente no se ha considerado su efecto en el edificio de referencia que define el CTE.

### **9.3. Edificio de proyecto con intercambiador**

Este caso es el resultado de modelar térmicamente el edificio tal y como ha sido proyectado.

El resultado obtenido muestra que el intercambiador ahorra aproximadamente un 17% en refrigeración y un 30% en calefacción.



Figura 18. Paneles fotovoltaicos.

ción. Extrapolando este ahorro a los 4 edificios supone un total de 280 MWh/año de ahorro en refrigeración, y 222 MWh/año de ahorro en calefacción, originados exclusivamente por la presencia del intercambiador.

El proyecto globalmente consigue un ahorro total del 51% en calefacción y un 18,5% en refrigeración respecto al edificio de referencia, valores muy importantes dado el elevado nivel de exigencia que presenta el Código Técnico ya de partida.

En términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, y referido a la totalidad de edificios, el proyecto presenta un importante ahorro respecto al edificio de referencia. La solución proyectada ahorra un total de 136 Ton/año de emisiones de CO<sub>2</sub>, de las cuales, 118 t/año corresponden a calefacción y 18 t/año a refrigeración.

El intercambiador ahorra un 40% (46 t/año) en calefacción y prácticamente la totalidad en refrigeración. Estos valores son consecuencia de la suma de efectos del intercambiador, por una parte, y del propio diseño del edificio, por otra.

## 10. PANELES FOTOVOLTAICOS

Como se sabe, el fundamento de la energía solar fotovoltaica es el efecto fotoeléctrico, que consiste en la conversión de la luz en electricidad. Este proceso se consigue con materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

En las instalaciones para conexión a la red eléctrica de distribución, la energía producida por los módulos es transformada en corriente alterna con la misma tensión y frecuencia que la red eléctrica para ser inyectada a ella. En este caso, la compañía suministradora deberá pagar toda la energía producida por el sistema fotovoltaico.

En España la nueva normativa, vigente desde diciembre de 1998 sobre conexión a red de sistemas de energía solar fotovoltaica, incorpora un régimen especial según el cual toda la energía producida por estos sistemas es entregada a la red y será facturada por el productor con una tarifa especial, y toda la energía consumida de la red seguirá siendo facturada por la compañía al precio que en ese momento esté en vigor.

### 10.1. Datos del proyecto

En nuestro caso, se efectuó un estudio para el conjunto de las seis consejerías en el que se pretendió alcanzar una producción de 326,7 kWp para la venta a la compañía eléctrica. Para obtener dicha potencia se requieren 3 instalaciones independientes de 108,9 kWp por instalación.

Cada uno de esos tres sistemas estará formado por 660 paneles fotovoltaicos de 165 Wp de la firma BP Solar, dividiéndose el sistema en 3 inversores de la firma Fronius modelo IG400.

A cada inversor están conectadas 22 cadenas y cada cadena está formada por 10 módulos colocados en serie. La tensión máxima de circuito abierto de este sistema es aproximadamente de 442 Vcc a pleno sol con una temperatura ambiente de -10 °C.

Cada uno de los inversores toma la energía, en corriente continua, que proviene de los módulos solares y la transforma en corriente alterna que se inyecta en la red de distribución pública pasando antes por un contador de energía. El inversor monitoriza en todo momento la red inyectando la corriente CA a la misma frecuencia y tensión de la red de distribución.

La instalación tiene un total de 108,9 kWp de potencia fotovoltaica. La potencia nominal CA de los inversores de la instalación es de 32 kWp.

La potencia nominal es menor que la fotovoltaica de pico para mantener el inversor en un punto de eficiencia razonable incluso en los días de poca radiación de invierno, cuando la potencia que dan los paneles es muy baja.

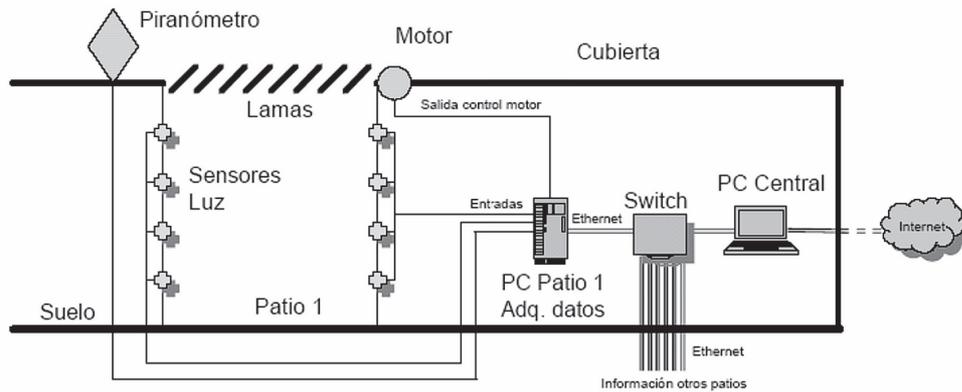


Figura 19. Detalle la interconexión entre los sistemas de control de los patios con el PC central que sirve como maestro de los anteriores y es la interfaz con el exterior.

## 10.2. Cálculos de producción del sistema

Para evaluar la producción del sistema fotovoltaico se ha utilizado un programa de cálculo especializado en este tipo de sistemas que emplea los datos meteorológicos (datos de irradiación solar mensual disponible y de temperatura), de la provincia en la que se realice la instalación.

El programa empleado simula automáticamente la generación diaria, teniendo en cuenta la pérdida de rendimiento de los módulos con la temperatura. El programa también calcula automáticamente la irradiación sobre el plano inclinado de los paneles, considerando un grado de suciedad medio y unas pérdidas por cableado.

## 11. DISEÑO DEL SISTEMA DOMÓTICO PARA EL CONTROL DE LAMAS DE LOS DISTINTOS EDIFICIOS

Se efectuó en fase de proyecto un estudio del entorno para evaluar las posiciones más adecuadas en las que se deben colocar los sensores de medida de iluminación. Inicialmente se ha considerado que puede ser suficiente desplegar una red de sensores equiespaciados en altura para las cuatro fachadas interiores de cada patio. Adicionalmente se podrá colocar un piranómetro en el exterior para medir el nivel de irradiación externa.

Durante la fase de ejecución de obra, se desarrollará adecuadamente la solución definitiva que estará basada en el empleo de sensores cableados. Se ha optado por una solución mixta que incluye dispositivos comerciales conectados a un desarrollo propio compuesto de un mini PC para controlar los sensores en cada patio con una tarjeta de adquisición de datos. Por lo tanto, el diseño propuesto es una solución creada específicamente para este escenario, optimizada para cubrir los objetivos demandados.

La decisión de utilizar una solución cableada en lugar de la solución inalámbrica responde a una cuestión de mayor fiabilidad. Sobre el cable se establecerá un protocolo de comunicaciones que permita la transmisión de la información de los sensores interiores y exteriores hasta el sistema de adquisición de datos, ubicado localmente en cada patio, que a su vez se comuniquen con un ordenador central que almacene la información y que permita configurar todo el sistema. El ordenador central guardará la información recogida por los sensores. Se podrá acceder a esta información desde cualquier ordenador con conexión a Internet. Esta propuesta incluye un software propio basado en un diseño optimizado que actuará remotamente sobre los motores de las lamas de la cubierta para modificar su posición.

En el proyecto figuran las tecnologías y equipos que se van a instalar, así como su ubicación, detallándose todas las conexiones tanto de datos como de alimentación. También se incluirá el código ejecutable del sistema de comunicaciones utilizado, el código ejecutable para el control del movimiento de las lamas y el de control del edificio completo.

Actualmente consideramos que no es necesario utilizar accesos tipo GSM puesto que un edificio de estas características va a estar cableado, siendo esta última solución la más natural, económica y segura. La instalación, por tanto, se caracteriza por:

a) La ubicación de múltiples sensores de luz en cada patio -16 en total, uno por fachada en cada una de las cuatro plantas- proporcionará la información suficiente para evaluar adecuadamente el impacto de la instalación de las lamas motorizadas. De esta forma, se podrá contrastar con medidas reales las simulaciones realizadas. Se utilizarán sensores de luz comerciales de conexión inmediata.

b) Será necesario conectar el piranómetro de irradiación de referencia ubicado en el exterior del edificio.

c) El sistema de adquisición de datos será un PC de bajo coste una con tarjeta específica para esta finalidad que a su vez convierta la información suministrada por los sensores a un formato adecuado para transmitirlos por una red local (LAN). Cada PC, situado en los patios, debe funcionar de forma autónoma aunque debe ser programado inicialmente para cubrir la función de adquisición de datos, control del motor de las lamas y localización del mismo. El control automático del citado motor se realizará de acuerdo con un cierto algoritmo que tenga en cuenta la iluminación en los múltiples puntos, la persistencia de la misma y las condiciones exteriores. Este sistema de adquisición puede manejar múltiples señales aunque debe estar situado en un entorno cercano a los sensores para que la señal generada por éstos llegue con un nivel adecuado. La solución que proponemos como la más eficiente está basada en un diseño propio, específico de esta configuración que contempla las particularidades de los sensores utilizados, así como el grado de confianza y seguridad que debe tener un PC que funcione de manera autónoma. Este sistema propio incluye tanto el diseño a nivel de dispositivo (hardware) como de la programación de los mismos (software).

d) La información recogida en cada uno de los PCs situados en los patios será enviada a un ordenador central vía LAN con la doble

finalidad de recopilar en el ordenador la información recibida de cada sensor y controlar todos los PCs de patios, posibilitando la puesta en marcha o parada de los mismos de manera independiente. Otra de las funciones del ordenador central será permitir el acceso a los datos recopilados. El ordenador central estará, por tanto, equipado con el programa de comunicaciones con los PCs de patio, el programa de comunicaciones con el exterior, el programa de control del sistema completo (puesta, en marcha de cada uno de los sistemas de los patios de manera independiente), y un sistema de emergencia que posibilite la manipulación de las lamas manualmente.

## 12. CONCLUSIÓN

El conjunto de edificios proyectado es de una alta eficiencia energética. Aunque los sistemas empleados son en general conocidos, no existen en España instalaciones realizadas de semejante tamaño, particularmente en el caso del intercambiador tierra-aire.

El conjunto es la evidencia del papel ejemplarizante que la Administración Pública, y en concreto la Junta de Extremadura, debe ejercer liderando el proceso de aplicación de las medidas contempladas en el nuevo Código Técnico de la Edificación; incluso superándolas, como en este caso.

## REFERENCIAS

- WRI: World Resource Institute (2005), <http://earthtrends.wri.org>.
- Dibowski: Dibowski, Hans-Gerd, Auf Basis umfangreicher Messdatensätze experimentell und numerischvalidierte Regeln zur optimierten Auslegung von Luft-Erdwärmetauschern, Dissertation Universität Kassel (2003).
- Meteotest: Meteotest. METEONORM 5.0, Swiss Federal office of Energy, Bern (2003).
- Radiance: Desktop Radiance Version 2.0 beta, Lawrence Berkely National Laboratory, Berkeley, California (2001).
- Ecotect: ECOTECT Version 5.20b, Square One research, Joondalup, Australia (2004).
- Optics: OPTICS Version 5.1, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California (2003).
- Huber: WKM 3.0 Air-to-Earth heat Exchanger Design Code, Huber Energietechnik, Zürich, Switzerland (2005).
- F-Chart: Engineering Equation Solver EES, Professional Version V 7.454, F-Chart Software, Box 44042, Madison, WI 53744, USA (2005).
- Fluent: Fluent Inc., 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA (2005), <http://www.fluent.com>.