

## EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL SOL EN ENVOLVENTES VIDRIADAS

John Martin Evans<sup>1</sup>, Susana Eguía<sup>2</sup>, Alejandro Pérez<sup>3</sup>, Julian Evans<sup>4</sup>  
Centro de Investigación Hábitat y Energía (CIHE), SICyT  
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires  
Pabellón 3, Piso 4, Ciudad Universitaria.  
Ciudad de Buenos Aires, Tel (+ 54 11) 4789-6274  
E-mail: cihe@fadu.uba.ar, evans@fadu.uba.ar

**RESUMEN:** Este trabajo presenta la aplicación de una metodología de estudio y sus resultados, destinada a evaluar y verificar el comportamiento al impacto solar de la envolvente edilicia del Proyecto para el conjunto de la Ciudad Judicial de Barcelona y Llobregat. El estudio tuvo por objetivo evaluar el impacto solar en fachadas y espacios interiores a fin de establecer valores adecuados de transmisión de radiación en vidrios que conformarían el diseño definitivo de la envolvente. La metodología de trabajo incluyó la aplicación de técnicas bioclimáticas, ensayos con modelos a escala en el Heliódón y el Cielo Artificial del Laboratorio de Estudios Ambientales del CIHE, simulaciones gráficas por computadora y cálculos analíticos. El estudio permitió analizar alternativa y verificar la aptitud de las características, dimensiones y diseño de aberturas, cuya geometría proporciona protección solar en todas las fachadas, las que representaban gran variedad de orientaciones. A tal fin, se elaboraron recomendaciones para las fachadas más críticas, tendientes a lograr adecuado control solar, reducir el impacto de las reflexiones provenientes de múltiples fachadas enfrentadas y disminuir los requerimientos energéticos para acondicionamiento térmico. El estudio también verificó niveles de iluminación natural y confort visual.

**Palabras clave:** envolventes vidriadas, radiación solar, fachadas doble piel, innovación tecnológica, ahorro de energía.

### INTRODUCCIÓN

La importancia del comportamiento de la envolvente edilicia y su implicancia en el consumo energético, constituye un tema que adquiere cada vez más relevancia en países de la Unión Europea, donde las normativas y la concientización sobre el impacto del consumo energético en edificios promueven la adopción de estrategias de optimización del diseño arquitectónico. La propuesta ganadora del concurso internacional de arquitectura para el conjunto edilicio de la Ciudad Judicial de Barcelona y Llobregat, fue desarrollada por los Estudios Chipperfield, de Londres, y B720, de Barcelona. En la etapa de definición de proyecto se requirió la realización de estudios de impacto solar, tanto en la doble piel de las fachadas y los espacios interiores, con el fin de verificar el comportamiento termo-luminico del diseño de la envolvente para las distintas situaciones de orientación. El diagnóstico permitió determinar las características genéricas de transmisión de luz visible y radiación del vidrio a utilizar en la envolvente y proponer la implementación de estrategias adicionales de protección solar. A fin de responder a los objetivos del estudio, se consideraron los siguientes aspectos:

- Proporción de la envolvente expuesta o protegida de la radiación solar, superficies con sombra permanente y las que presentan riesgo de reflexión entre fachadas enfrentadas. La evaluación de ángulos de sol horarios incidentes para cada estación del año, y para cada una de las orientaciones de los 12 edificios, a fin de determinar los requisitos iniciales de características de vidrios y posibles elementos adicionales de protección solar.
- Incidencia estacional del sol directo en locales interiores e incidencia porcentual del sol sobre los vidrios interiores de la fachada, con relación a sus respectivas orientaciones.
- Transmisión de radiación solar a través de las ventanas. Estimación de la intensidad de radiación solar sobre el exterior de las fachadas y la proporción de esta radiación transmitida, considerando la geometría y sombra producida por el diseño de las ventanas y la absorción del vidrio.
- Verificación de características termo-luminicas del proyecto de doble fachada vidriada y recomendación de coeficiente de transmisión térmica y de radiación en vidrios.

Los estudios se desarrollaron en el CIHE y consistieron en ensayos de modelos en el Laboratorio de Estudios Bioambientales utilizando el Heliódón y el Cielo Artificial. Asimismo, se realizaron simulaciones gráficas en maquetas electrónicas, simulaciones de comportamiento térmico, lumínico y de movimiento de aire. Dada la extensión de los estudios realizados, en este trabajo se consigna exclusivamente el desarrollo destinado a evaluar el impacto de radiación directa en fachadas y las recomendaciones de valores recomendables de transmisión lumínica, térmica y de radiación solar del sistema vidriado.

<sup>1</sup> Director del Centro de Investigación Hábitat y Energía, a cargo de la asistencia técnica.

<sup>2</sup> Docente - Investigadora CIHE

<sup>3</sup> Docente - Investigador CIHE

<sup>4</sup> Estudiante, con Pasantía Académica de Investigación

## EL CONJUNTO EDILICIO.

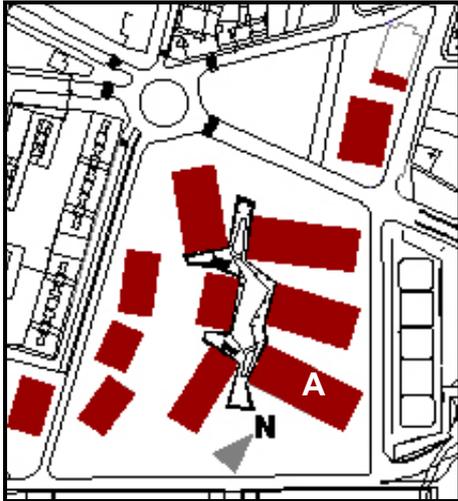


Figura 1. Organización del conjunto, con Edificio A.



Figura 2. Modelización tridimensional del conjunto

El conjunto edilicio proyectado por los Estudios Chipperfield y Asoc. y B720, se ubica en Barcelona, latitud  $41^{\circ} 24' N$ , Fig. 1. Está constituido por volúmenes simples que morfológicamente juegan con la noción de fragmentación y unidad. Los diferentes edificios se hallan integrados entre la PB y el cuarto piso por un elemento conector a modo de atrio-calle, destinado a constituir un espacio público cubierto que permita el acceso a los distintos edificios.

El proyecto contemplaba la completa climatización de todos los edificios, incorporando al mismo tiempo estrategias pasivas para reducir el consumo de energía. Así, la envolvente fue proyectada como una pantalla conformada por fachadas con doble piel vidriada y hormigón a fin de controlar las ganancias por radiación directa y las pérdidas térmicas, reduciendo las cargas del sistema de climatización. El atrio-calle, climatizado con ventilación natural, proporciona un amplio espacio de uso múltiple con temperaturas confortables, tanto en verano como invierno.

El material predominante en los volúmenes edilicios es el hormigón con vidrio matizado en distintos colores que diferencia cada bloque. El proyecto contempló, en un primer momento, la utilización de vidrios serigrafiados para optimizar sus condiciones termo-luminicas. Esta unidad de tratamiento aporta solidez y transparencia enriquecida por el color de los bloques y el contraste entre ellos que proporcionarían alta complejidad visual al conjunto.

Se evaluaron los elementos de aventanamiento constituidos por una continuidad de aberturas rectangulares de 2.84 m de altura y ancho variable entre 0.80 m exterior y 0.60 m interior. El dintel de la ventana presenta un espesor constante de 0.35 mts que alberga un vidrio simple exterior, cámara de aire ventilada y doble vidrio hermético interior, conformando de esta manera una doble piel de triple vidriado. En principio, y ante la necesidad de optimizar la protección solar, el proyecto prevé la colocación de dispositivos de oscurecimiento dentro de la cámara de aire.

La geometría y materialidad de los aventanamientos descriptos fueron objeto de verificación con relación a las condiciones de transmisión solar, a fin de elaborar recomendaciones para la optimización termo-luminica en los vidrios a utilizar.

## METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

A partir del análisis de las condiciones climáticas del sitio, para el estudio del impacto de radiación solar directa en la envolvente, la metodología de trabajo combinó ensayos con maquetas en el Heliódón del Laboratorio de Estudios Bioambientales del CIHE, simulaciones con maquetas electrónicas de la trayectoria horaria estacional del sol en las fachadas de los distintos edificios y modelos de cálculo desarrollados en planillas electrónicas. Los aspectos a evaluar mencionados en el punto anterior, se organizaron en las siguientes etapas de estudio:

- Evaluación de impacto de sol y proyección de sombras sobre fachadas y atrio: apreciación del impacto general del sol en el conjunto.
- Evaluación de la proporción de vidrio con sol directo o en sombra: nivel general de protección solar.
- Impacto de la radiación solar en el interior.
- Determinación de coeficientes adecuados de transmisión de luz visible y radiación solar de vidrios.

## EVALUACIÓN DE PROYECCIÓN DE SOMBRAS SOBRE FACHADAS

La evaluación se realizó a través de ensayos en el Heliódón del LEB del CIHE del impacto solar sobre los muros de las cuatro fachadas de los 12 edificios del conjunto, para cada hora, y las distintas estaciones del año, invierno, verano y equinoccio, a fin de detectar las zonas expuestas al sol y las protegidas de la radiación, y determinar los requisitos iniciales de características de vidrios, diseño de fachadas y posibles elementos de protección solar.

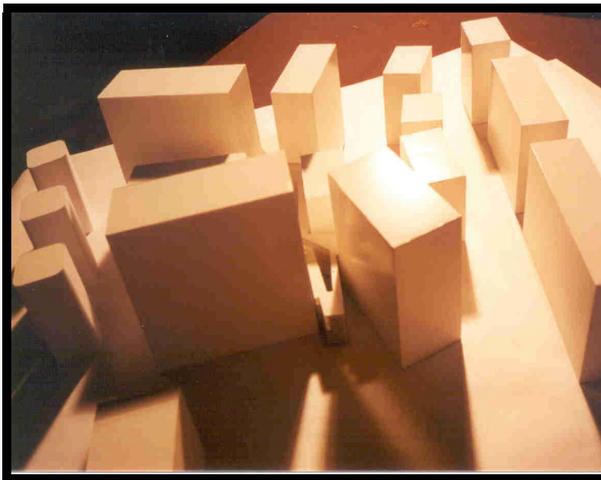


Figura 3. Invierno. Vista del conjunto a las 12 horas.

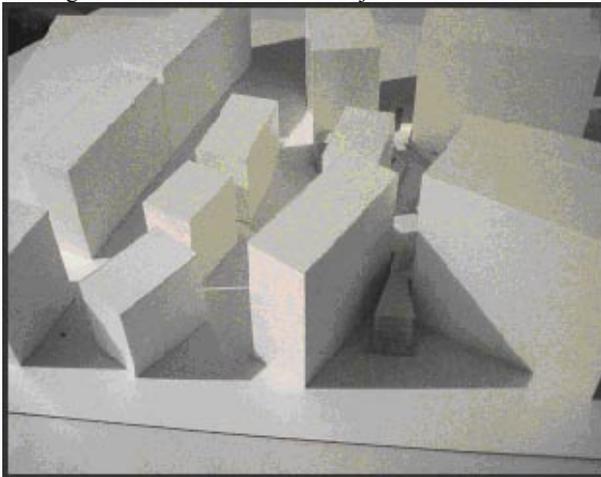


Figura 4. Equinoccio. Vista del conjunto a las 14 horas.

A partir de esta primera evaluación general, se establecieron porcentajes de radiación solar directa sobre las aberturas vidriadas, y sus variaciones horarias y estacionales.

### EVALUACIÓN DE PROPORCIÓN DE VIDRIOS CON SOL DIRECTO O EN SOMBRA.

En esta etapa, la evaluación de sombras sobre vidrios de cada una de las fachadas, se consideró la acción conjunta de la orientación de cada fachada y la geometría de las aberturas.

Este estudio permitió determinar la incidencia del sol directo en interiores y el porcentual del sol sobre los vidrios interiores de la fachada y, consecuentemente, el factor de sombra según el diseño de la fachada. La cantidad de radiación y el porcentaje de superficie afectado en las fachadas de uno de los 12 edificios estudiados, se presenta sintetizada en los siguientes gráficos que indican la variación de radiación estacional y horaria incidente.



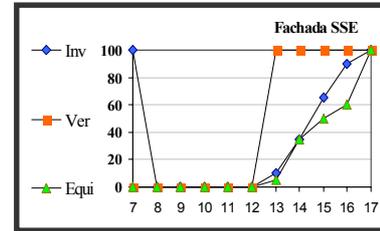
Figura 5. Ingreso de sol en el interior con ángulo bajo y perpendicular.



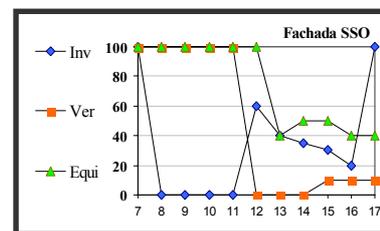
Figura 6. Ingreso de sol con ángulo oblicuo a la fachada y 35° de altura.

Los resultados de la observación se volcaron en una base de datos con el porcentaje de incidencia solar sobre las fachadas, porcentaje de la fachada en sombra, según hora del día y estación del año. Complementariamente, se realizaron simulaciones con maquetas electrónicas para visualizar el comportamiento horario y estacional de la incidencia solar directa y las sombras en cada una de las 48 fachadas.

Gráficos 1 y 2.



Porcentaje de áreas en sombra en el Edificio A para las distintas horas del día y estaciones del año.



La orientación SSE presenta una gran variación debido a las sombras proyectadas desde otros edificios.

**Resultados.** Debido a la densidad del conjunto, las sombras arrojadas sobre ciertas fachadas en invierno resultaron considerables, aunque la gran mayoría de las fachadas reciben sol en algunas horas del día, al menos en una estación del año. En posteriores estudios se verificó la necesidad de incorporar elementos de protección solar o protección para evitar desconfort térmico y visual.

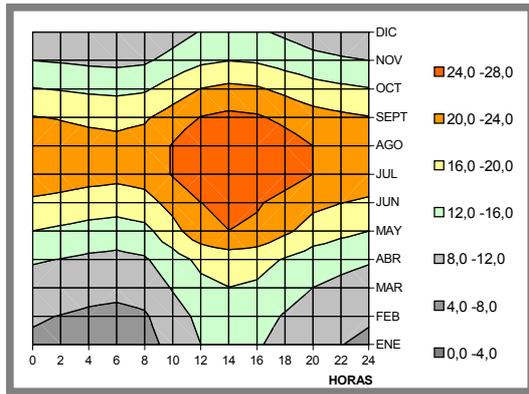


Gráfico 3. Barcelona. Distribución horaria y estacional de temperaturas.

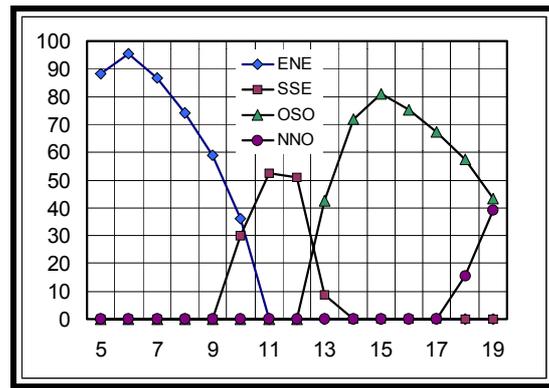


Gráfico 4. Porcentaje de sol sobre el vidrio interior en verano, según orientación, en el Edificio A.

La distribución de temperaturas horaria y estacional de Barcelona (Graf. 3) con un rango extendido del pico en verano entre las 10.00 y las 20.00 hs, refuerza la necesidad de protección solar en las fachadas. En el caso del Edificio A, uno de los más expuestos del conjunto, se corrobora esta situación por los porcentajes de área con sol durante el verano. La orientación con mayores problemas es la OSO en horas de la tarde, mientras la ENE tiene su pico en horas de la mañana cuando las temperaturas medias entre 20 y 24 °C, aún no alcanzan el pico diurno. El diseño de ventanas, aún cuando aporta adecuada protección en horas de máxima temperatura y radiación, no impide la incidencia de los ángulos bajos de sol, cuya mitigación implica disminuir la transmisión de vidrios e incorporar elementos móviles de sombreado.

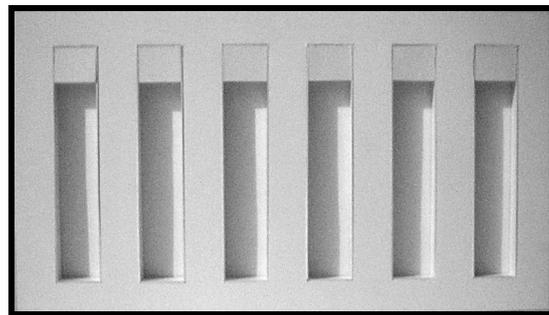


Figura 7. Tipología de Ventanas. Sombras sobre vidrios, Edificio A: Equinoccios, 14 horas.

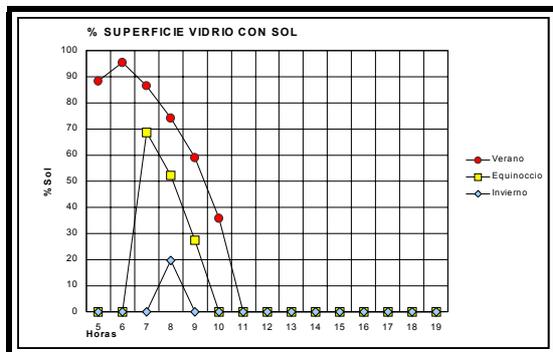


Gráfico 5. Orientación ENE. Sol a la mañana, con importante incidencia en verano, y muy limitado ingreso de sol en invierno.

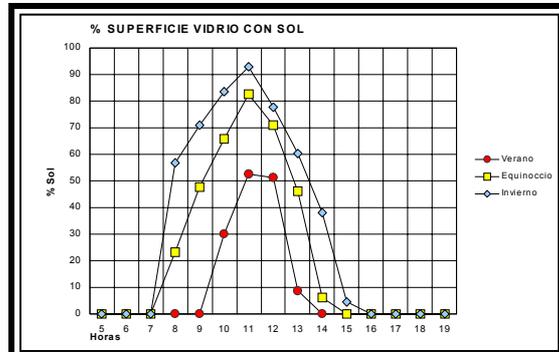


Gráfico 6. Orientación SSE. Protección solar favorable, con mayor superficie de vidrio con sombra en verano y mayor ingreso de sol en invierno.

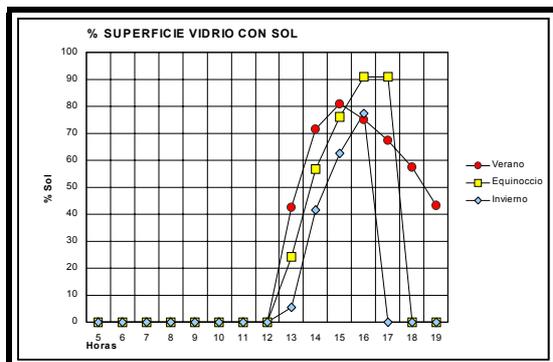


Gráfico 7. Orientación OSO. Las ventanas reciben sol directo por la tarde durante todo el año.

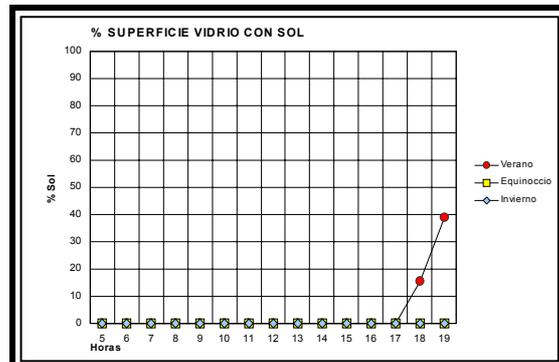


Gráfico 8. Orientación NNO. En verano, las ventanas reciben radiación directa desde las 18:00 hs.

## EVALUACIÓN DE TRANSMISIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN EL INTERIOR DEL EDIFICIO.

Los porcentajes de transmisión de radiación solar a través de las fachadas, se determinaron a partir de la intensidad de radiación solar directa, difusa y reflejada sobre el exterior de cada fachada en verano, y la proporción de esta radiación transmitida, considerando la geometría y sombra producida por el diseño de las ventanas y la absorción del vidrio (Fig.7).

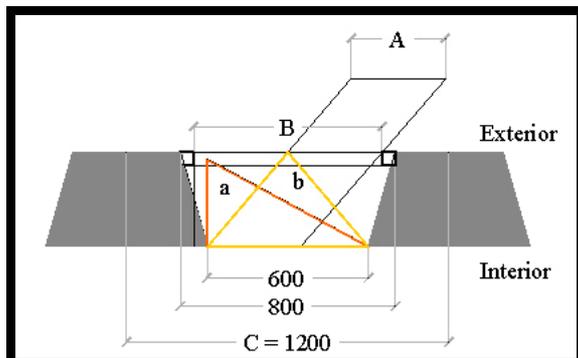


Figura 9. Ingreso máximo de radiación difusa (a y b) y protección geométrica en plano horizontal:

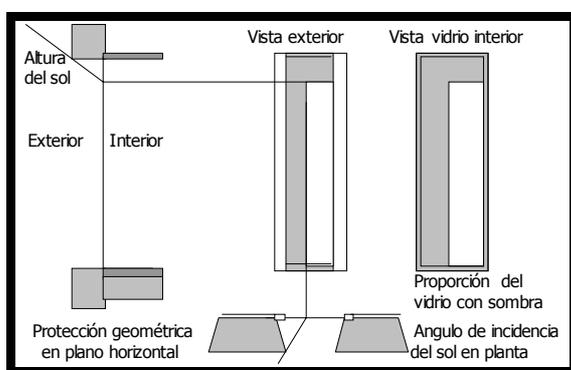


Gráfico 10. Protección geométrica en plano horizontal y vertical.

**Incidencia de la geometría de la fachada en el porcentaje de radiación incidente:** Cada 120 cm de desarrollo lineal de la fachada, tiene superficies vidriadas de 60 cm de ancho por 284 cm de altura en su cara interior, que representa un 66 % de la superficie.

$$= 600 / 1200 = 50 \% = \text{Transmisión geométrica de la fachada}$$

$$= 600 / 700 = 85 \% = \text{Transmisión geométrica del vidrio (sin marco)}$$

**Transmisión geométrica.** El cálculo contempló el impacto de las sombras en sentido vertical debidas al espesor del marco y pared, ancho del marco y orientación de fachada. Los resultados fueron verificados con maquetas en el Heliodón. (Fig. 5)

La Figura 9 muestra las dimensiones para la determinación de la transmisión geométrica:

$A / B =$  Transmisión geométrica del vidrio con radiación directa.

$A / C =$  Transmisión geométrica de la fachada con radiación directa.

**Proporción de la radiación difusa y reflejada, transmitida por el vidrio:** 55 % aplicada a la superficie del vidrio o 27 % aplicada a la superficie de la fachada. La transmisión de luz visible de vidrio, con tres vidrios incoloros y tratamiento de baja emisividad (Low-e), es 66 %. Este porcentaje representa la transmisión máxima posible con tres vidrios. Para este caso, la transmisión de radiación solar es 44 % con un Factor solar de 56 %.

Los cálculos y simulaciones realizados mostraron que el diseño de las ventanas ofrece un factor de sombra geométrica favorable por sus limitadas superficies de vidrio, permitiendo disminuir significativamente la carga de refrigeración. No obstante, para determinadas orientaciones, es necesario considerar la combinación de estrategias de diseño con las características termo - lumínicas de los vidrios a utilizar.

## COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE RADIACIÓN SOLAR DE LOS VIDRIOS.

El factor de sombra del sistema resulta favorable, tanto en el valor máximo como el valor promedio, con variaciones horarias y estacionales, según el ángulo de incidencia del sol y la proporción de radiación directa y difusa. Así, la transmisión de radiación solar del vidrio exterior del doble vidriado interior presenta una transmisión menor al 20 % de la fachada total. La transmisión de radiación solar difusa en el plano del vidrio interior es aproximadamente del 55 % en promedio, considerando los sectores del cielo visible y los ángulos de incidencia de los componentes de la radiación difusa.

	Radiación solar directa	Radiación solar difusa	Total
Composición de la radiación	90 %	10 %	100 %
Transmisión geométrica de fachada (lleno y vacío)	50 % $100 \% \times 600 / 1200$	32 % $55 \% \times 700 / 1200$	48 % promedio ponderado
Transmisión geométrica del vidrio	85 % $50 \% \times 600 / 700$	55 % $55 \% \times 700 / 700$	82 % Promedio ponderado

Tabla 1. Transmisión de radiación solar, para el caso crítico, con sol perpendicular a las fachadas (hs de la mañana y tarde).

La superficie libre de la ventana presenta una transmisión de radiación solar de 66 %, considerando tres hojas de vidrio convencional y tratamiento de baja emisividad.

- Considerando la geometría de las aberturas, el espesor de la pared y vidrios convencionales, la transmisión de radiación solar de la fachada es:
- La transmisión de radiación solar del vidrio común, considerando la geometría de las aberturas, el espesor de la pared y vidrios convencionales, es:
- En el caso mas crítico, con sol perpendicular a la fachada, para lograr una transmisión total del 20 %, se requiere doble vidrio sellado herméticamente con vidrio exterior e interior de 56 % de transmisión.

$$66 \% \times 48 \% = 32 \%$$

$$66 \% \times 82 \% = 54 \%$$

$$= (0,2 / (0,50 * 0,90 + 0,32 * 0,10)) / 0,86 / 0,85$$

siendo,  
 0,2 = transmisión de radiación solar total de la fachada  
 0,5 = transmisión de la fachada, sin vidrio, sol directo  
 0,9 = proporción de sol directo sobre la fachada  
 0,32 = transmisión de la fachada, sin vidrio, sol difuso  
 0,1 = proporción de sol difuso sobre la fachada  
 0,86 = transmisión del vidrio exterior  
 0,85 = transmisión del vidrio interior

En esta situación, se ha recomendado seleccionar un valor de 56 % de transmisión de radiación solar para la hoja exterior del vidrio doble. Para el caso más desfavorable, con sol perpendicular al vidrio, este valor disminuye la transmisión global de la fachada a 20 %, logrando valores significativamente menores cuando el ángulo de incidencia es mayor en los planos horizontal y/o vertical.

## CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas de simulación física en el heliodón para estudios de sombra, si bien no alcanza la precisión de la simulación numérica, permite visualizar y entender la relación tridimensional entre la forma edilicia y la trayectoria del sol durante el proceso de diseño o verificación. En este caso, los ensayos realizados en el heliodón permitieron detectar la incidencia de reflejos, aspecto no detectado en las simulaciones numéricas.

La geometría de la fachada garantiza una protección significativa, alcanzando valores máximos de alrededor de 40 %. Las fachadas con orientación NO y NE presentan menor incidencia de radiación solar, con menor carga diaria y radiación pico. Así en fachadas orientadas al NE, NNE, N, NNO y NO, se ha recomendado considerar una transmisión máxima de 70 % para la hoja exterior del vidrio doble. En algunos casos, la combinación de mínima incidencia de la radiación solar directa y reducido impacto de la radiación difusa permite aceptar valores mayores sin recibir ganancias solares significativas. La fachadas mas expuestas al sol con orientación E, SE, S, SO y O presentan valores máximos cercanos al 50 % . En estos casos la utilización de vidrio exterior tonalizado con tratamiento disminuye la transmisión de radiación solar y mejora el comportamiento térmico debido a la reducción de pérdidas hacia el exterior. Esta alternativa, permite que el doble vidrio interior pueda ser incoloro. En todas las alternativas, se recomendó seleccionar vidrios con alta transmisión de luz visible para garantizar adecuados niveles de iluminación natural.

La utilización de dispositivos de protección móviles, como cortinas regulables en la cámara de aire, resulta un recurso inevitable en la mayor parte de los casos, aún en aquellas orientaciones que no reciben ganancia solar directa. Esto se debe a los reflejos sobre el vidrio producido en las fachadas enfrentadas que reciben sol directo. Es relevante mencionar que los ensayos en el Heliodón permitieron detectar este problema en todos los casos simulados, para distintas estaciones y horarios.

## BIBLIOGRAFIA

- Pearce, E., y Smith, C., (1990), The world weather guide, Hutchinson, Londres.  
 Evans, J. M., et al (1998), Iluminación en maquetas y espacios con iluminación natural. Recomendaciones para su medición. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar, N° 2, Salta, Argentina  
 Evans, J. M. y de Schiller, S. (1992), Teaching architects to design with the sun, Techniques, equipment and computer tools, Proceedings, Solar Energy at high latitudes, SINTEF, Trondheim, Norway, pp 356-361.

## EVALUATION OF SOLAR IMPACT ON GLAZED FACADES

**ABSTRACT:** This paper presents the application of a study methodology and results to evaluate and verify the solar impact on the building envelope of the Barcelona and Llobregat Judicial City project. This assessment, undertaken after the project stage was completed, aims to evaluate solar impacts on facades and indoor spaces, in order to recommend accurate values of glass solar transmission that would be used on the definitive envelope. The work method included simulations with scale models in the Heliodon in the environmental laboratory of the Research Centre Habitat and Energy, as well as computational graphics, simulations and analytic calculations. The study verified the results of the window design, which offers appropriate geometry for solar protection in a wide range of cases. However, selective recommendations were given for the most critical facades, optimising glass solar control to reduce solar gains and reflections, and consequently the amount of energy required for air conditioning. Daylight quality and visual comfort were also studied to ensure adequate protection.

**KEYWORDS:** Glass envelope, solar radiation, double skin facade, glass transmission, energy saving.