



## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AJUSTE DE UN PROTOTIPO DE SIMULADOR DE LA TRAYECTORIA SOLAR

**A. Maristany, S. Barra, C. Nicasio, S. Bonafé, C. Herrán, L. Abadía**

Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas (CIAL)  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño- Universidad Nacional de Córdoba  
Ciudad Universitaria – CP 5000 – Córdoba  
Tel. 0351 4333037 – email: [cial@faudi.unc.edu.ar](mailto:cial@faudi.unc.edu.ar)

**RESUMEN:** En la presente ponencia se presenta la descripción del dispositivo construido en el CIAL-FAUD-UNC para la simulación de la trayectoria solar y la verificación del asoleamiento en maquetas. A los efectos del diseño y construcción del mismo se analizaron y compararon dispositivos similares construidos en distintos centros y laboratorios adoptando el modelo y tipología más adecuado a las condiciones de trabajo y disponibilidad funcional existente. También se desarrolló una metodología de análisis para el ajuste del dispositivo y la definición de sus limitaciones de aplicación en función del error producido por la inevitable divergencia de los rayos luminosos al utilizar una fuente puntual cercana al modelo. El simulador construido permite su uso para aplicaciones de tipo didácticas, con suficiente versatilidad y facilidad de funcionamiento, y para el desarrollo de proyectos específicos tanto de investigación como de aplicación práctica. Por el tipo de fuente utilizado se ha incorporado la posibilidad de evaluar las sombras proyectadas en tres posiciones simultáneas mediante el uso del color.

**Palabras clave:** asoleamiento, simulación, heliodón

### INTRODUCCIÓN

Un heliodón o simulador de trayectoria solar es un dispositivo mecánico que permite la simulación de la posición del sol o de su trayectoria para una determinada condición espacial y temporal. El dispositivo sirve para evaluar el efecto de esta trayectoria en modelos físicos arquitectónicos o urbanísticos de un proyecto en estudio. El simulador solar permite una visión tridimensional del comportamiento del sol frente a los edificios, aunque implica la construcción de modelos ó maquetas, a escala. Esta última situación deriva en el debate de la pertinencia del uso de la maqueta como elemento de verificación y simulación ó de la utilización de modelos de simulación virtual.

Cualquier modelo de heliodón implica la construcción de una fuente de luz artificial que simula la acción del sol. Esta fuente, fija o móvil, se relaciona con el resto de la instalación destinada a ubicar las tres variables de la geometría solar: La latitud (determina los ángulos de posición solar en relación al lugar); el día del año (determina el ángulo de declinación solar en ese día) y la hora del día (determina los ángulos de posición solar para cada hora del día).

Existen una gran diversidad de tipos, prototipos y modelos de simuladores de trayectoria solar, los cuales se suelen clasificar de manera general como:

- a) de fuente luminosa fija y modelo arquitectónico móvil,
- b) de fuente luminosa móvil y modelo fijo, y
- c) de fuente luminosa y modelo móviles.

Los simuladores de modelo móvil (Cheung et al, 1996) tienen la desventaja de la necesidad de fijar el modelo para mantenerlo en posición y que no se caiga, aspecto que imposibilita el uso del dispositivo con maquetas de estudio ó desarmables. Por otro lado también es más difícil visualizar la posición relativa del sol lo que complica su uso desde el punto de vista didáctico. Los dispositivos con modelo fijo y horizontal superan las desventajas anteriores aunque necesitan de una estructura funcional de mayores dimensiones y peso. De este último tipo disponemos de antecedentes construidos en nuestro país como el de la FADU-UBA (Evans et al, 1992) o el del CEEMA-UNT (Gonzalo et al, 1996). En estos casos la plataforma fija nivelada permite colocar modelos importantes y con componentes sueltos para su ajuste. A partir de estas consideraciones se decidió la construcción de un simulador de modelo fijo, horizontal y fuente móvil. Desarrollo posteriores están orientados a proponer sistemas integrados de simulación solar contemplando el heliodón y cielo artificial en un mismo dispositivo (Bodart et al, 2006).

Los objetivos principales de este proyecto fueron: Rescatar la capacidad de verificación tridimensional de la maqueta de estudio a partir del diseño y construir un prototipo de simulador de trayectoria solar (heliodón) con aplicación general en los proyectos con maqueta en la FAUD.

El trabajo desarrollado se estructuró en base a las siguientes etapas metodológicas:

- Recopilación de antecedentes de distintos dispositivos existentes.
- Desarrollo de aplicaciones posibles que condicionen su diseño

- Evaluación en función del espacio disponible.
- Proyecto de mecanismos y dispositivo general.
- Evaluación y adecuación de sistemas de iluminación.
- Evaluación de posibilidades de automatización.
- Desarrollo de proyecto general.
- Construcción, calibración, evaluación y ajuste.
- Formulación de recomendaciones para la construcción de maquetas en orden a ser utilizadas dentro del simulador.

### PROPUESTA DIMENSIONAL Y CONSTRUCTIVA DEL HELIODON

El dispositivo diseñado corresponde al tipo de modelo fijo y fuente móvil. Está constituido por un arco metálico, tubular de sección 50 x 50 x 2 mm, de media circunferencia con un diámetro interior de 4 metros. La estructura de soporte a la pared permite el giro del arco para simular las variaciones de latitud (figura 1).

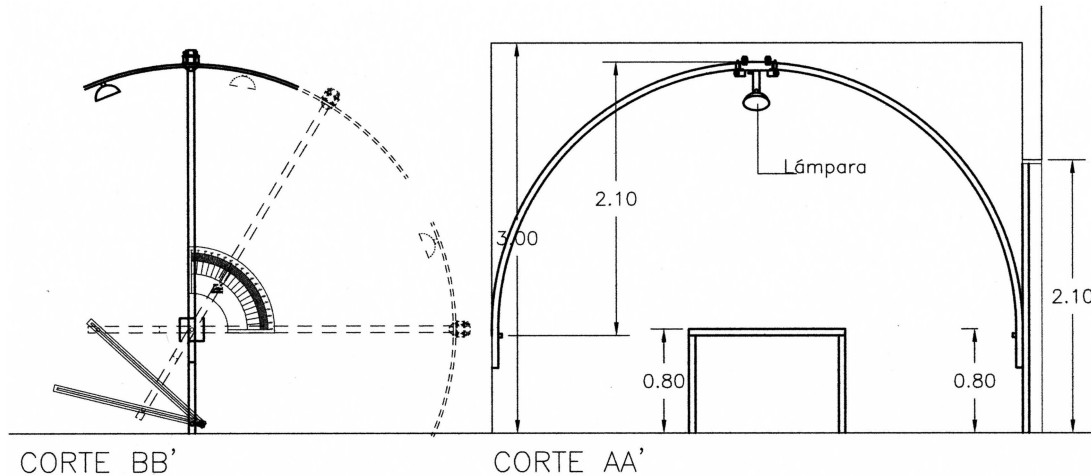


Figura 1: Cortes longitudinal y transversal del dispositivo

En forma perpendicular al arco y con posibilidad de desplazamiento a lo largo del mismo se ubica un arco menor cuya longitud equivale al alejamiento máximo del sol entre el solsticio de verano y el de invierno. Sobre este arco se colocan tres fuentes luminosas intercambiables, blancas o de color, que simulan la posición del sol para las cuatro estaciones del año. El desplazamiento de los arcos menores sobre el principal determina las distintas horas del día. Las figuras 2, 3 y 4 muestran una vista general del dispositivo construido, un detalle del artefacto de iluminación y un detalle del elemento de articulación y desplazamiento del arco. Este sistema de desplazamiento permitirá en un futuro la incorporación de un sistema motorizado para la ubicación automática del arco secundario.

### SISTEMA DE ILUMINACIÓN ADOPTADO

Para posibilitar el estudio del asoleamiento mediante maquetas, cuya sombra proyectada es el elemento indicador, se hizo uso de la siguiente técnica para simular el sol en sus diversas posiciones.

La elección de la fuente de iluminación estuvo principalmente condicionada en la búsqueda de un sistema versátil que posibilitara el intercambio de colores y/o el uso simultáneo de los tres colores primarios a los efectos de disponer de un sistema de simulación que permita la visión en paralelo de las tres sombras proyectadas (solsticios y equinoccios).

Se efectuaron estudios y ensayos utilizando como posibles fuentes: 1) Elementos de filamento incandescente (lámparas incandescentes halógenas), 2) Diodos emisores de luz (LED's).

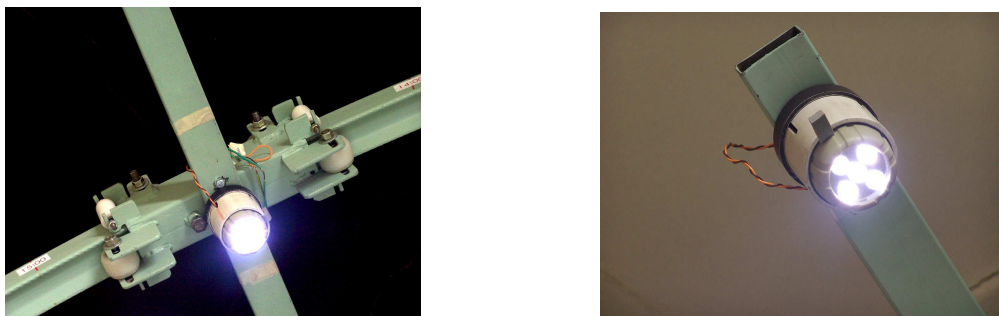


Figura 2: Detalle del sistema de articulación entre los dos arcos

Figura 3: Detalle del artefacto de luz blanca



Figura 4: Vista general del simulador construido

De los mismos se concluyó en la utilización del segundo método ya que los LED's tienen las siguientes ventajas:

- Emiten luz en longitudes de onda definida (monocromática) independiente de la tensión de alimentación.
- Tienen dimensiones reducidas.
- Tienen alta eficiencia y larga vida.
- Poseen ángulos de emisión pequeños.
- Trabajan con baja tensión eléctrica.
- Poseen gran resistencia mecánica a golpes y vibraciones.

Para conformar el equipamiento total se construyeron y montaron:

- 4 baterías de LED's de alta eficiencia para ser utilizados en la simulación del sol en cualquiera de las posiciones alternativas (solsticios y equinoccios).
- Una batería emite con luz azul ( $\lambda = 460 \text{ nm}$ ).
- Una batería emite con luz roja ( $\lambda = 640 \text{ nm}$ ).
- Una batería emite con luz verde ( $\lambda = 525 \text{ nm}$ )
- Una batería emite con luz blanca ( $X=0,40; Y=0,43$ )
- Una fuente de corriente con cuatro salidas en baja tensión, con posibilidad de variación de la corriente de salida por modulación de ancho de pulso.

## METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN DE LOS ERRORES

Debido a que este tipo de equipos posee lámparas o fuentes de iluminación de tipo puntual, los rayos son divergentes con respecto a la fuente produciendo distorsiones en la simulación. Conocer la magnitud de estas distorsiones permitirá definir el margen de error con los cuales se trabaja. La propuesta metodológica se basa en dos aspectos: a) Verificación de ángulo al centro geométrico del sistema y b) Definición del margen de error en la simulación.

*Verificación de ángulos al centro geométrico del sistema*

Ángulo de declinación ( $23,45^\circ$ ): En el esquema propuesto en la figura 5 se verifica la siguiente relación entre el ángulo de declinación y las dimensiones del simulador (d: radio) y del modelo (h: altura):

$$l_{s1} = h * \text{tg} 23,45^\circ \quad (1)$$

$$l_{s2} = \frac{\text{sen} 23,45 * d}{(\text{cos} 23,45 * d) - h} \quad (2)$$

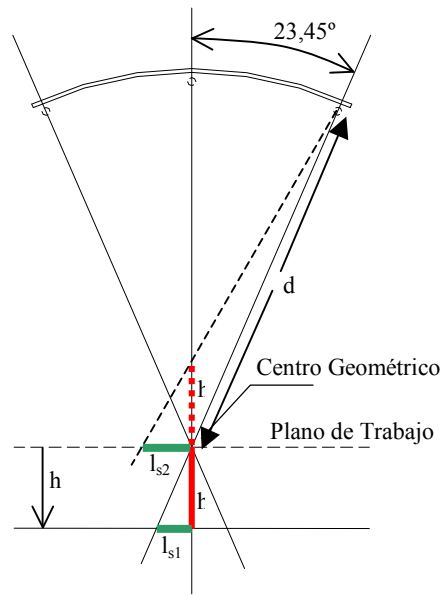


Figura 5: Variación del largo de la sombra real ( $l_{s1}$ ) en función de la altura del modelo ( $h$ ) y la distancia a la fuente ( $d$ )

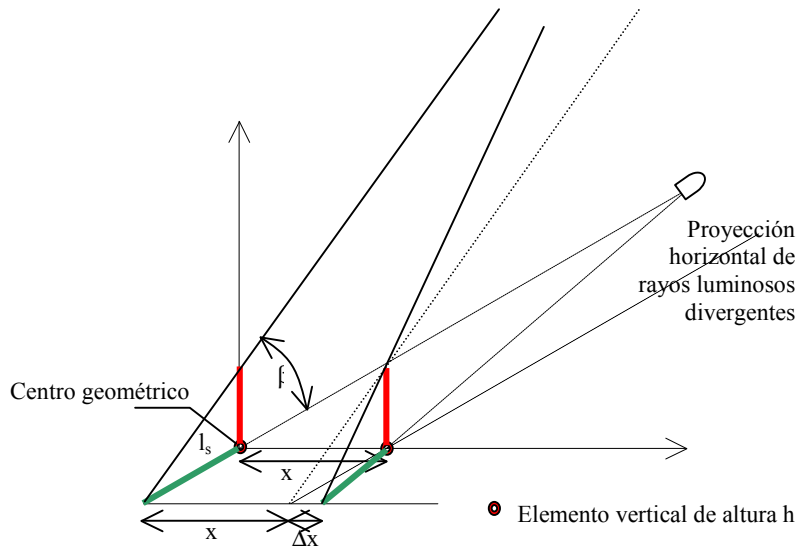


Figura 6: Esquema que muestra el desplazamiento horizontal  $\Delta x$

Ángulos horarios: se pueden verificar de igual manera que en el caso anterior pero trabajando en sentido transversal sobre la línea de simulación de los equinoccios. Para cada avance horario el ángulo desarrollado es de  $15^\circ$ .

$$l_{s2} = \frac{\text{sen}15 * d}{(\text{cos}15 * d) - h} \quad (3)$$

Ángulos de altura y azimut: El ángulo de azimut se verifica directamente midiendo sobre el plano de trabajo el desvío angular con respecto al norte y en el caso de la altura nuevamente se aplica el criterio del largo de sombra según la expresión:

$$l_{s1} = h * \text{tg}(90 - \beta) \quad (4)$$

$$l_{s2} = \frac{\text{sen}(90 - \beta) * d}{(\text{cos}(90 - \beta) * d) - h} \quad (5)$$

#### Definición de márgenes de error en la simulación

De las expresiones (4) y (5) podemos deducir que a medida que se aumenta la distancia  $d$ , desde la fuente al modelo, y manteniendo  $h$  constante,  $l_{s1}$  y  $l_{s2}$ , se aproximan cada vez más, disminuyendo la divergencia. Esta tendencia se muestra en el

gráfico de la figura 7. La curva está trazada para una elevación  $\beta=45^\circ$ ; en eje horizontal se muestra la relación  $d/h$  y en vertical el incremento proporcional de la sombra:  $I_{s2}/I_{s1}$ .

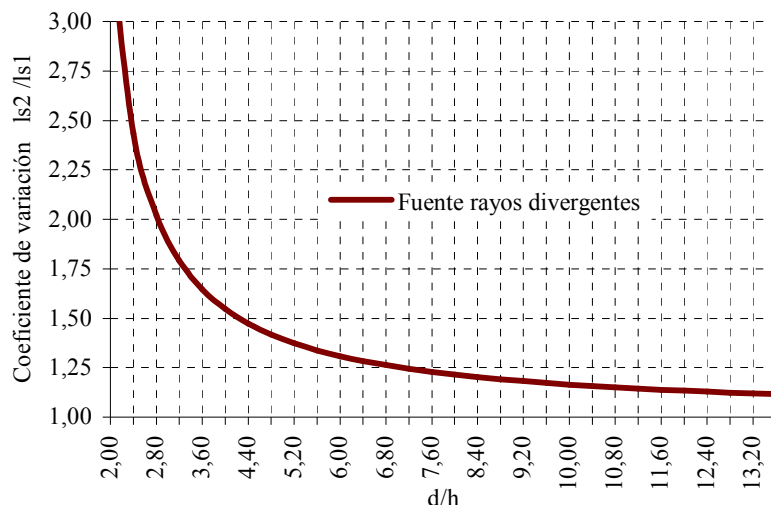


Figura 7: Coeficiente de variación  $I_{s2}/I_{s1}$  en función de  $d/h$  para una elevación de  $45^\circ$ .

Este razonamiento es importante a los efectos de definir la altura del modelo en función del margen de error máximo que se acepte. Se observa en la curva que para relaciones  $d/h > 10$  la disminución del error es pequeña. Esto origina dificultades para reducir el margen de error por debajo del 10% (1,1), para  $\beta=45^\circ$ . El error aumenta a medida que disminuye el ángulo de elevación ( $\beta$ ). El gráfico de la figura 8 muestra los porcentajes de error en función de la relación  $d/h$  para distintos ángulos de elevación. Es evidente que este aspecto influye en la decisión a tomar entre la altura de la maqueta a construir y los ángulos de elevación de la simulación a realizar.

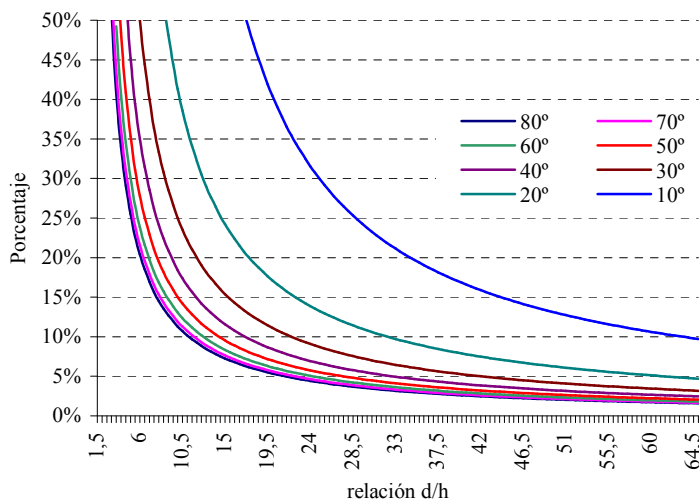


Figura 8: Porcentaje de error (sombra real/sombra simulada) en función de  $d/h$  para distintos ángulos de elevación.

El incremento  $\Delta x$ , desarrollado en planta al alejarse del centro geométrico del sistema (ver figura 6), depende básicamente de la elevación ( $\beta$ ), de la altura del modelo ( $h$ ) y del desplazamiento ( $x$ ) con respecto al centro del sistema.  $\Delta x$  puede ser calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta x = \frac{h * x}{\text{sen} \beta * d} \quad (6)$$

Esta expresión permite fijar el desplazamiento horizontal máximo para un determinado modelo en función de un incremento máximo ( $\Delta x$ ) en relación a ( $x$ ). El gráfico de la figura 9 muestra la variación del error  $(x+\Delta x)/x$  para diferentes alturas ( $h$ ) de modelo en función de la elevación solar simulada ( $\beta$ ). En el gráfico se destaca el importante incremento del error para ángulos de elevación solar muy bajos y para alturas de modelos importantes en relación a  $d$ .

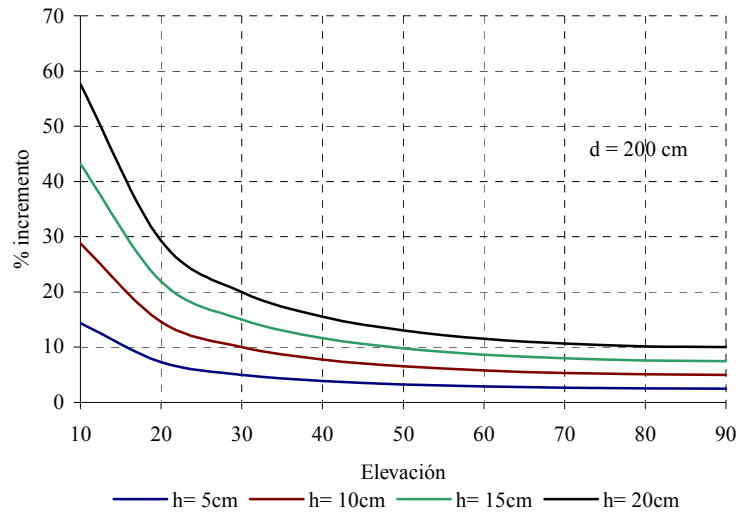


Figura 9: Porcentaje de incremento del desplazamiento de la sombra en planta

### EJEMPLO DE MODELADO

En las figuras 10, 11, 12 y 13 se muestran ejemplos de la sombra arrojada con fuente de luz blanca en una sola posición y fuentes de color en dos posiciones simultáneas. El uso del color permite el estudio simultáneo de las sombras arrojadas en distintas estaciones del año.

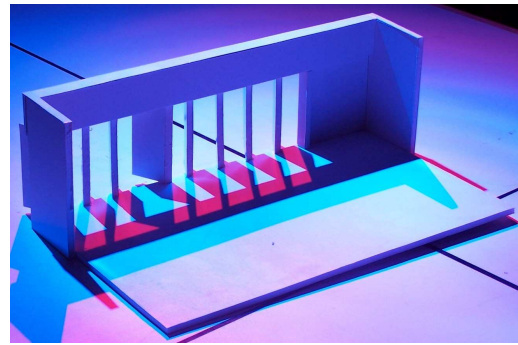
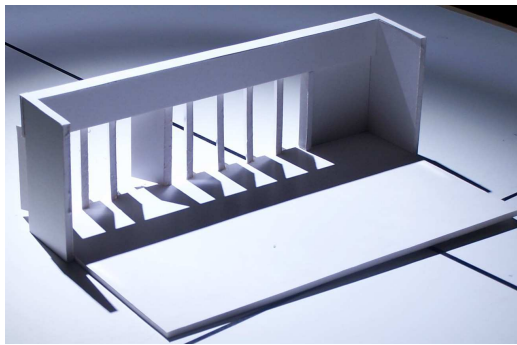


Figura 10 y 11: Simulación de sistema de parasoles con una fuente blanca y con dos fuentes monocromáticas.

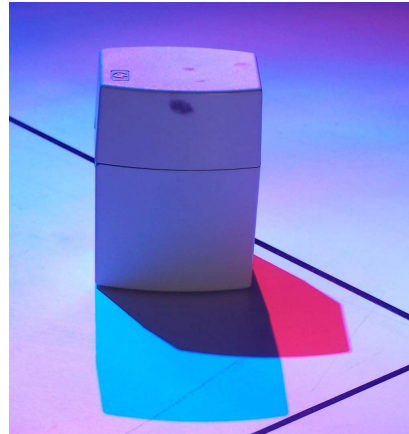
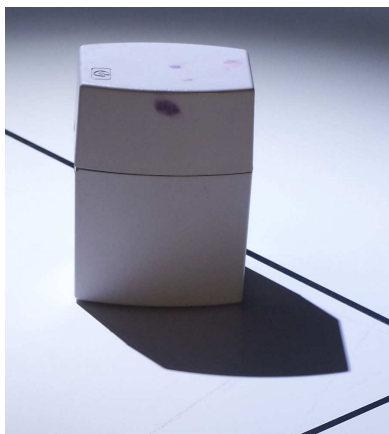


Figura 12 y 13: Simulación de un volumen simple con una fuente blanca y con dos fuentes monocromáticas.

### DISCUSIÓN

Se ha desarrollado la construcción de un simulador solar que permitirá disponer en la FAUD-UNC de un dispositivo para la ejecución de trabajos sistemáticos de evaluación del asoleamiento en maquetas, tanto por parte de alumnos de la carrera de arquitectura, como para futuros trabajos de investigación y aplicación profesional.

El utilizar fuentes de luces monocromáticas, centradas en los colores primarios, permite efectuar el análisis del modelo en simultáneo en las tres condiciones (solsticios y equinoccios) generando una sombra tricromática, producir las eventuales modificaciones al proyecto (modelo) y evaluar las interferencias que ellas generarían en tiempo real.

Del análisis geométrico se concluye que los errores que se producen, al carecer de fuentes luminosas de rayos perfectamente paralelos, son pequeños y tolerables para relaciones de radio (d) versus altura de modelo (h) superiores a diez. Esto conlleva que para este heliodón construido, la altura de la maqueta no debe superar los 20 cm, dimensión apta para trabajar en escalas de uso común en arquitectura.

Con respecto al error que se ocasiona por utilizar una fuente luminosa puntual este se podrá disminuir a partir de utilizar una técnica de compensación del error mediante el uso de un plano de trabajo que permita la variación de su altura con respecto a un elemento referencial. Esta variación estará en relación directa con la altura (h) del modelo en estudio.

## REFERENCIAS

- Cheung K. y Chung S. (1996). A Heavy Duty Universal Direct Sunlight Heliodon Assembled from Precision Machining Tools. EuroSun'96.
- Evans J., de Schiller S., Delbene C., Fernández A. y Leveratto M. (1992). Laboratorio de Estudios Bioambientales: Heliodon: su Uso y Aporte al Diseño. 15 Reunión de Trabajo de ASADES.
- Casado J., Martínez A., Gonzalo G. (1996). Diseño y Ejecución de un Simulador Solar. 19 Reunión de Trabajo de ASADES.
- Bodart m., Deneyer A., de Herde A. y Wouters P. (2006). Design of a New Single-Patch Sky and Sun Simulator. Lighting Research Technology, 38,1 pp. 73-89.

## ABSTRACT

The description of a device made at CIAL-FAUD-UNC for the simulation of solar trajectory and verification of sunlight in scale models is presented in this report. With the object of its design and construction, similar devices made in different centers and laboratories were analyzed and compared, adopting the most adequate model and typology to the existing functional availability and working conditions. An analysis methodology for the adjustment of the device and the definition of its application limitations were also developed, according to margins of error produced by the unavoidable divergence of light rays when using a specific source close to the model. The constructed simulator can be used for didactic applications, with enough versatility and working facility, and for the development of specific projects, not only for research but also for practical application. Due to the type of source used, the possibility of evaluating shadows projected in three simultaneous positions through the use of color has been incorporated.

**Keywords:** sunlight – simulation - heliodon