

# CONTROL GRÁFICO Y ANALÍTICO MEDIANTE MODELOS 3D DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LA LUZ SOLAR.

Andrés de Mesa  
Joan Quilez  
Joaquín Regot

## RESUMEN:

Si bien el control de la luz solar en el ámbito de la construcción y la arquitectura ha sido un fenómeno ampliamente analizado a lo largo de la historia, es un tema que solamente desde hace unas décadas ha podido ser evaluado a través de nuevas herramientas gráficas.

Las posibilidades que ofrece la informática gráfica dan una nueva dimensión al análisis y el cálculo de las relaciones entre el sol y la arquitectura.

Este artículo pretende mostrar una nueva forma para analizar y calcular la energía que incide en entornos arquitectónicos mediante la posibilidad de creación de espacios virtuales basándose en el modelado tridimensional informático.

Para este fin se ha desarrollado una aplicación informática compuesta por tres módulos que se basa en la elaboración de una bóveda solar tridimensional y en el control de la obstrucción que produce un entorno arquitectónico en la bóveda para un punto del espacio predefinido. El primer módulo permite crear la bóveda solar para un determinado rango de fechas y horas como base del cálculo energético. El segundo módulo determina la obstrucción, y el tercero permite calcular la cantidad de energía que recibe un punto del espacio a lo largo de un lapso de tiempo definido por el usuario. El resultado del cálculo se puede mostrar gráfica o numéricamente.

## ANTECEDENTES E IDEAS.

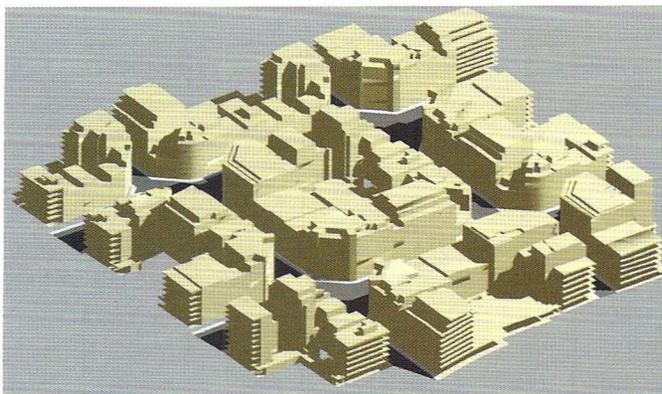
La aplicación de métodos gráficos para controlar la incidencia de rayos solares en entornos arquitectónicos es relativamente

reciente si tomamos en cuenta la necesidad que ha existido de utilizar el sol como fuente de energía para conseguir una mayor habitabilidad de los espacios naturales y construidos. Hoy en día, todo lo que está relacionado con parámetros medioambientales ha adquirido una gran importancia debido al uso y abuso de las diferentes fuentes energéticas. Este problema ha producido un nuevo estímulo en la investigación de todo lo que está relacionado con las fuentes energéticas naturales.

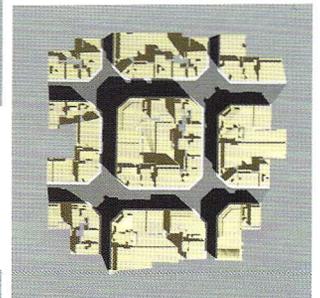
Este trabajo es la continuación de las investigaciones que venimos realizando sobre este tema en el Departamento de Expresión Gráfica de la ETSA de Barcelona. La primera de ellas corresponde a la comunicación: Una nueva alternativa al estudio de la obstrucción solar en los espacios urbanos presentada en el

VI Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica de Pamplona en Mayo 1996. Y la segunda corresponde a un trabajo presentado en eCAADe (Liverpool Septiembre 1999), con el título: Sunlight energy graphic and analytic control in 3D modelling. En esta comunicación ya se apuntaba la necesidad de utilizar los sistemas informáticos para resolver este tipo de problemas, debido a su gran capacidad para reproducir este tipo de fenómenos en entornos tridimensionales virtuales y que permiten controlarlos gráficamente y numéricamente al mismo tiempo.

A partir de esta idea, lo que se proponía en esta primera aproximación era la utilización de modelos tridimensionales de recorridos solares con carácter virtual que permitan analizar las obstrucciones y la incidencia del sol



**Entorno Urbano**  
"Eixample" de Barcelona.  
Proyecto de  
Ildefonso Cerdà  
(1860-1909)



Control gráfico y analítico  
en modelos 3D.



en volumetrías de entornos arquitectónicos. El principio aplicado era muy sencillo, una vez elaborados los modelos 3d de un entorno arquitectónico o urbano, haciendo uso de la gran capacidad cuantitativa y cualitativa de los sistemas informáticos para generar imágenes en perspectiva cónica, mediante las propias proyecciones de este sistema gráfico de representación se podía controlar directamente la obstrucción producida por el entorno arquitectónico sobre el modelo tridimensional de recorridos solares a lo largo de todo el año para una determinada posición de análisis. Sin embargo, este proceso se limitaba a un control visual con carácter cualitativo de las obstrucciones solares, sin poder llegar a obtener una cuantificación exacta de la incidencia de los rayos solares sobre el entorno analizado. [Fig-01]

La manera de enfocar este problema puede dar lugar a diferentes alternativas a la hora de resolverlo. Una de ellas, es la propuesta de Edna Shaviv, A. Yezioro y I. Guedi Capelutto de la Faculty of Architecture and Town planning de la Technion - Israel Institute of Technology. En este trabajo, la incidencia del sol en la arquitectura y en los entornos urbanos se estudia desde la posición del sol. Frente a nuestra propuesta, esta metodología tiene la desventaja de que a partir de ella se obtiene la información de la incidencia solar para un periodo de tiempo puntual, lo que implica procedimientos reiterativos si se quiere obtener información para un periodo prolongado de tiempo (días, semanas, meses,...) Aunque por otro lado este procedimiento tiene la gran ventaja, y es que permite analizar la incidencia del sol de una sola vez para la totalidad del entorno físico estudiado sin necesidad de restringirse al análisis de zonas parciales o puntuales.

Nuestra forma de enfrentar el problema es diferente. Ésta consiste en el estudio de entornos urbanos o arquitectónicos a partir de posiciones puntuales lo más representativas posibles que permitan obtener la totalidad de las horas de sol a lo largo de todo el año para cada una de ellas. Este procedimiento implica evaluar la incidencia del sol para una posición

específica a partir de la cuantificación de todas las horas solares que no quedan obstruidas por las volumetrías existentes respecto a un punto de análisis. Este es un fenómeno que se puede controlar muy fácilmente si se realiza la visualización del recorrido del sol desde el punto de estudio.

Sin embargo, para hacer este tipo de análisis es necesario generar previamente un modelo tridimensional cuantificable del recorrido solar lo suficientemente versátil para poder aplicarlo a cualquier posición en la esfera terrestre atendiendo a su latitud y orientación. La elaboración de un modelo mediante puntos que simulan posiciones solares y que aplica una discretización del recorrido del sol nos ha parecido la solución más idónea, no sólo por que permite relacionarlo directamente con la volumetría tridimensional del entorno analizado, sino por que también permite cuantificar fácilmente las obstrucciones de los rayos solares que produce el entorno físico sobre el punto de análisis. Y como consecuencia, es un modelo a través del cual se puede obtener simultáneamente y con mucha precisión representaciones gráficas y numéricas de las obstrucciones producidas por la volumetría interpuesta entre el punto de análisis y la fuente energética. [Fig-02]

Pero, por otro lado, si se quiere realizar una evaluación mucho más exhaustiva de la energía producida por los rayos de sol, este modelo también debe tener en cuenta la orientación del plano de recepción respecto a la dirección de los rayos solares que inciden sobre el punto de análisis, puesto que sólo así se puede aplicar la corrección correspondiente a la inclinación de la incidencia de los rayos solares sobre el plano de recepción. Y al mismo tiempo, el modelo, debería permitir calcular la reducción de energía que se produce cuando el rayo solar atraviesa la atmósfera. Un cálculo que se realiza fácilmente asignando un parámetro de reducción a la cantidad de energía, y que viene determinado por la distancia de desviación que hay entre el punto de emisión del rayo y la posición que corresponde al cenit del espacio que se está analizando.

De esta manera, nuestro primer trabajo sobre un método de análisis de la incidencia solar, (presentada en Pamplona), se convierte en la base de una segunda propuesta que, manteniendo el carácter gráfico de la primera, le añade la precisión numérica de cálculo necesaria tanto cuantitativa como cualitativa. Con este nuevo planteamiento, no sólo se obtiene la cantidad de horas de sol que recibe una posición específica con mucha precisión, sino que además esta información se complementa con la calidad de las horas de soleamiento que recibe un determinado entorno físico, y tiene la gran ventaja de que ambos parámetros pueden ser controlados mediante un sistema de análisis numérico y gráfico a la vez.

Este procedimiento para controlar la incidencia del sol de entornos físicos, basado en una simulación tridimensional de cálculo, puede tener diversas aplicaciones: la resolución de problemas constructivos del posicionamiento y orientación de paneles solares, el diseño de elementos arquitectónicos relacionados con ventanas, voladizos de aleros o protecciones solares, y el control de muchos otros tipos de elementos arquitectónicos o urbanos relacionados con el fenómeno del sol. Sin embargo, lo más importante, es que mediante este sistema se pueden establecer criterios mucho más apropiados para localizar o ubicar todo este tipo de elementos, si tenemos en cuenta las condicionantes que determinan el máximo aprovechamiento de la energía solar que se puede hacer con ellos, tanto en su captación como en su protección. Además, esta metodología permite prever las relaciones entre las formas y las localizaciones de los elementos arquitectónicos, a la hora de controlar la influencia de los rayos solares en los procesos de diseño de espacios urbanos, de tal manera que el diseñador pueda adecuar, con mayor seguridad, las necesidades del proyecto a los requerimientos energéticos.

## UNA APLICACIÓN MODULAR.

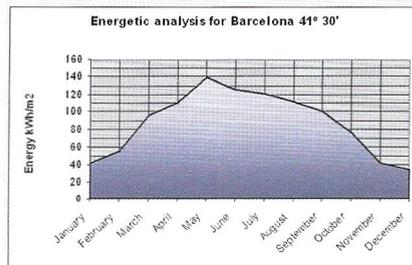
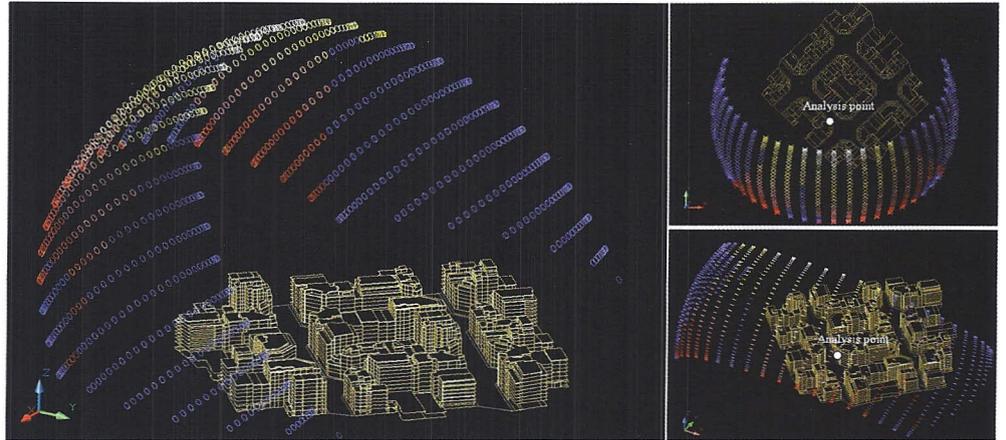
Para poder analizar, controlar y evaluar los valores energéticos correspondientes a las

diferentes posiciones del sol se ha desarrollado una aplicación informática que permite realizar la evaluación de este fenómeno determinando la cantidad de energía que puede recibir cualquier punto del espacio teniendo en cuenta la orientación del plano de apoyo de ese punto. A diferencia de otros trabajos muy notables, (como el programa ECOTECT elaborado por el Dr. Andrew Marsh 1994-2002), esta aplicación se ha desarrollado específicamente para el cálculo energético de la luz solar, pero su estructura permite utilizarla para todos aquellos casos en los que se relacione la posición del sol con un entorno arquitectónico o urbano.

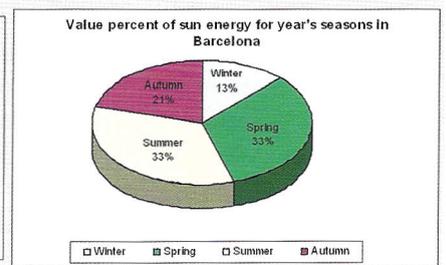
Una de las principales consecuencias del desarrollo de este trabajo ha sido observar como los sistemas informáticos han permitido un cambio sustancial en el método de trabajo para el control y análisis de la incidencia del sol sobre los cuerpos, superando claramente a la utilización de diagramas bidimensionales en los que se basa la metodología tradicional.

Si el interés final del trabajo hubiera sido el cálculo de la energía recibida por un plano, ya sea evaluándola numéricamente o visualizándola de modo gráfico, seguramente el trabajo se habría desarrollado de una manera muy distinta. Probablemente, se habría elaborado un único programa, que calculase directamente el valor numérico de la radiación recibida por el plano o a lo sumo, que además pudiera mostrar gráficamente la radiación recibida por uno o varios planos. Para nosotros, este tipo de propuesta no habría supuesto ningún avance en las técnicas de control medioambiental. Por esta razón, si bien el principal interés del trabajo ha estado centrado en el control gráfico de los recorridos del sol, el cálculo de la energía también es una parte muy importante del mismo y se ha desarrollado pensando en su posible utilización en otras aplicaciones. [Fig-03]

Como consecuencia el trabajo se ha elaborado a través de diferentes módulos de aplicación completamente independientes constituidos por pequeñas rutinas informáticas que han permitido resolver los problemas por par-



**Análisis para un punto de fachada en un chaflán Ensanche de Barcelona**

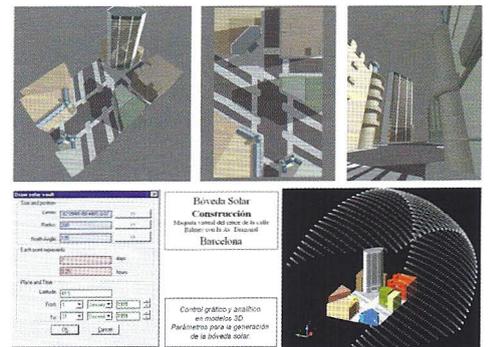


2

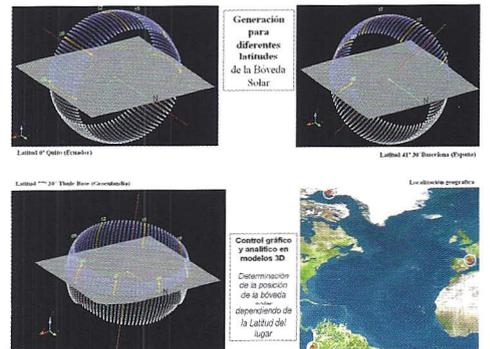
tes. Esta compartimentación del trabajo da lugar a que estos módulos se puedan utilizar en otros campos de actuación no estrictamente relacionados con problemas arquitectónicos o urbanos.

El primer problema, sin duda, fue resolver la parte fundamental de nuestro planteamiento: la sustitución de los clásicos diagramas solares por una entidad u objeto informático que simplificase el control de los recorridos solares. Aunque en principio este problema se resolvió con cierta facilidad, haciendo una transcripción de los diagramas bidimensionales a posiciones espaciales, el propósito fue ir más allá y conseguir un módulo informático capaz de generar un objeto que determinase con gran precisión, tanto la localización del sol para cualquier fecha y hora lo largo de todo el año, como el establecer cuantitativamente el valor de la radiación para cada posición.

El segundo paso fue determinar el cálculo de la obstrucción sobre la bóveda de recorridos solares de los elementos interpuestos entre ésta y el punto de análisis. Una vez determinado un punto arbitrario, si se quiere conocer la energía que puede recibir, se debe



3



4

saber la cantidad de horas de radiación que recibe su plano de soporte. Este proceso se agiliza debido al planteamiento en la elaboración del objeto que representa la bóveda solar tal como se ha expuesto en el párrafo anterior.

El último problema fue resolver el cálculo de la energía recibida por el punto de análisis. Este no ha sido el problema más difícil de solucionar ya que es muy fácil calcular el ángulo entre dos vectores espaciales y aplicar la corrección del valor mediante el coeficiente que determina la cantidad de espacio atmosférico que tiene que atravesar el rayo de sol antes de incidir sobre el punto de análisis.

Los tres módulos de la aplicación resuelven por completo el problema del cálculo y análisis de los valores energéticos producidos por la luz solar. Además se han programado cuatro rutinas informáticas de soporte que permiten seleccionar de la bóveda solar, determinar la posición de su centro, su orientación y su latitud, mostrar los datos asignados a cada de sus puntos como son la altura y el azimut, el día, mes y año asignado, la hora y el minuto etc.

### “SUNVAULT”: EL MÓDULO DE GENERACIÓN DE LA BÓVEDA SOLAR.

Al estudiar el análisis energético producido por la radiación solar en un entorno, se deben establecer las características de aproximación de cálculo con las que se quiere trabajar. Por esta razón la lo primero que se debe hacer es determinar los parámetros con que se define la resolución de la bóveda solar y adap-

tarlo a aquellas necesidades que se requieran para cada caso. Para ello, el programa muestra una cuadro de diálogo, (Draw solar vault), que permite definir exactamente el modelo deseado. [Fig-04]

En las casillas correspondientes al tamaño y posición, (Size and position), se puede determinar la colocación, las medidas y la orientación de los recorridos solares respecto al entorno de análisis. El centro de la bóveda solar, (Center), se debe colocar en el punto de análisis, cuestión imprescindible para evaluar la obstrucción de rayos solares como se expondrá más adelante. El tamaño del radio (Radius), si bien es un parámetro bien conocido, necesita de una explicación para centrar el proceso de análisis que se va a realizar. El modelo que se genera mediante este programa y que se ha denominado como bóveda de recorridos solares, es un modelo abstracto, ya que de todos es sabido que es la Tierra la que se mueve al rededor del sol y no viceversa. Por esta razón el tamaño que da al radio es solamente un parámetro que determina su relación respecto al entorno de análisis, y se deberá colocar de manera que lo circunde totalmente. La orientación de la bóveda, (North Angle), queda definida por el valor dado al ángulo que forma el eje de la bóveda solar con respecto al sistema de coordenadas con que se ha determinado el modelo del entorno de análisis.

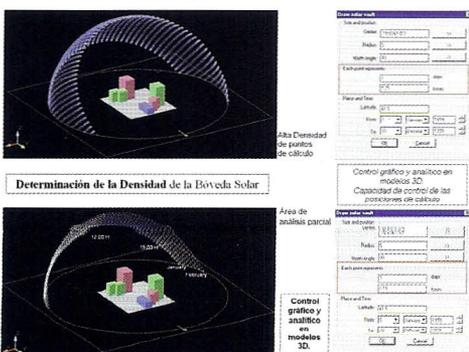
En el segundo grupo de casillas, (Each point represents), se define la discretización de los puntos que determinan la bóveda solar respecto a la precisión de cálculo que se quiere alcanzar. Si se escoge que cada punto represente 30 días, la bóveda queda representada por 12 anillos de puntos que representan un año completo. Si cada punto representa media hora, cada anillo se completa con 48 puntos.

La inclinación de la bóveda viene determinada por la latitud del lugar de análisis, (Place and Time), por lo tanto es un dato de obligado cumplimiento. Para completar la cantidad de puntos que definen la bóveda se debe indicar el periodo de tiempo de análisis, desde un solo día del año, un mes, tres años,

etc. ya que le repetición de las posiciones relativas entre un punto terrestre y el sol se ha considerado que se pueden repetir cada cuatro años. Con estos parámetros el programa representa la bóveda de recorridos solares tal y como se necesita para realizar el análisis y el cálculo energético de un determinado entorno arquitectónico. [Fig-05]

Es importante conocer los parámetros que se han utilizado en el programa que establece la representación de la bóveda solar, puesto que en el recorrido de la Tierra alrededor del sol, como mínimo, se tienen que considerar tres movimientos relevantes: La rotación diaria alrededor de su eje, su giro alrededor del sol y la precesión de los equinoccios con períodos de un día, un año y... casi 26000 años! Es difícil tener en cuenta todos estos movimientos reflejados con la máxima exactitud posible. Por ello, y desde una perspectiva eminentemente práctica, se ha decidido que era mucho más acertado representar los movimientos relativos Sol-Tierra teniendo en cuenta el calendario. Entre las propuestas del calendario Gregoriano (periodo de cálculo de 400 años con un total de 146099 días), o el Juliano (4 años con total de 1461 días), se ha optado por éste último, ya que el su error máximo es de una hora y media para un intervalo de análisis de 50 años, lo que es equivalente a  $0,016^\circ$  en el cálculo de la distancia al cenit. La consideración de establecer el periodo de repetición cada cuatro años (1461 días) frente a la posibilidad de tomar el año (365 días) como medida patrón es debido a querer establecer con mayor precisión las localizaciones del Sol respecto a la Tierra sobre todo para hacer cálculos en épocas pasadas o futuras, alejadas de las fechas actuales.

El modelo de representación de la bóveda solar generado como objeto tiene la ventaja de poder modificar sus parámetros métricos de posición (movimiento), tamaño (escala) y orientación (giro), manteniendo intactas sus propiedades internas, ángulos de radiación, posiciones relativas de los puntos de emisión etc. Estas características hacen posible la generación de una bóveda para un entorno



5

determinado y su reutilización en tantas localizaciones y orientaciones como se desee con el objeto de realizar los análisis pertinentes. Únicamente se tendrá que volver a generar la bóveda si se desea cambiar su precisión (cantidad de puntos de emisión) o se desea ubicar en otra latitud.

**“SUNOBSSTRUCT”: EL MÓDULO DE CÁLCULO DE OBSTRUCCIONES.**

[Fig-06]

Este módulo permite reconocer y analizar la obstrucción de los rayos solares, producida por la volumetría del entorno, sobre el punto de análisis. Si el punto de análisis se encuentra rodeado de volúmenes es necesario conocer que cantidad de sol puede recibir, ya que parte de los rayos emitidos por el sol serán obstruidos antes de incidir sobre el punto. Disponiendo de un modelo tridimensional del entorno, se pueden detectar las zonas de la bóveda solar que emiten rayos y que encuentran obstrucción antes de llegar al punto de análisis. Para resolver esta cuestión, el módulo detecta la intersección de los rayos solares con cualquier volumen del entorno, entre la bóveda y el punto de análisis. De esta manera, si existe obstrucción el punto de emisión queda representado en color gris y queda anulado a efectos de cálculo energético. Esta particularidad cromática nos permite hacer un análisis rápido, de carácter visual, sobre la cantidad de puntos que van a aportar energía a la zona de análisis al aparecer de distinto color todos aquellos puntos que han quedado anulados por la obstrucción del rayo que emiten.

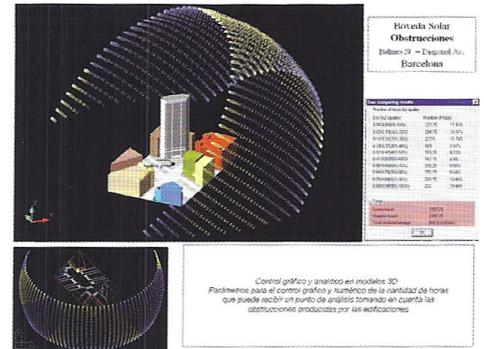
te se le debe indicar el plano que contiene al punto de análisis y cuáles son los puntos de la bóveda de posiciones solares que actúan como fuente energética sobre el lugar de análisis. El resultado visualiza un color para cada punto de los que conforman la bóveda de recorridos solares, que indican el valor de emisión energética que recibirá el punto de análisis. Naturalmente los puntos obstruidos, previamente calculados con el módulo anterior, no emiten energía y por lo tanto no influyen en el cálculo total. [Fig-07]

De esta forma, se puede obtener, no solamente la cantidad total de energía que recibe el punto sino también su distribución a lo largo del año. Este cálculo tiene en cuenta la reducción de energía que se produce por el recorrido del rayo a través de la atmósfera y su ángulo de incidencia sobre el plano de análisis. Con estas consideraciones podemos comprobar que, dependiendo de la posición del plano, la mayor cantidad de energía que puede recibir el punto no siempre corresponde a una posición determinada del sol sino que también depende de la orientación del plano receptor. El control de estos dos parámetros puede ser muy útil, por ejemplo, para decidir la posición de paneles solares en lugares particularmente difíciles y con zonas de obstrucción solar importantes. [Fig-08]

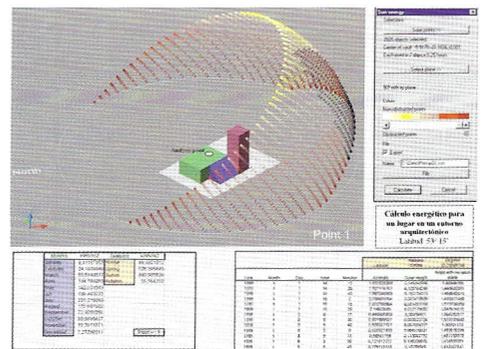
Aunque la representación gráfica de la energía mediante un sistema de colores semejante al del arco iris no es de carácter numérico, es un parámetro de análisis de acceso muy rápido para hacer una primera estimación del valor energético que puede recibir el punto analizado. El módulo de cálculo “Sunenergy” también puede mostrar los valores estadísticos de la cantidad de horas relacionados con el porcentaje de energía que reciben durante éstas con relación al cómputo total de energía. Estos datos muestran la uniformidad de energía recibida a lo largo de un período de tiempo. Este módulo también nos permite almacenar estos datos en un archivo que posteriormente se pueden analizar a través de una hoja de cálculo y establecer distintos tipos de gráficos comparativos. [Fig-09]

**“SUNENERGY”: EL MÓDULO DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA.**

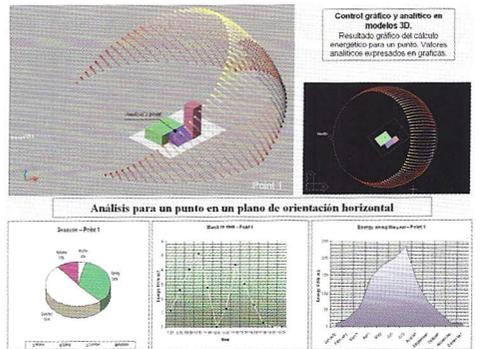
Este último módulo es propiamente el que permite calcular la energía recibida por un punto contenido en un plano con una orientación determinada. Este parámetro se debe tener en cuenta ya que es necesario para poder determinar con rigor la energía incidente en el punto. Para ejecutar este programa únicamente



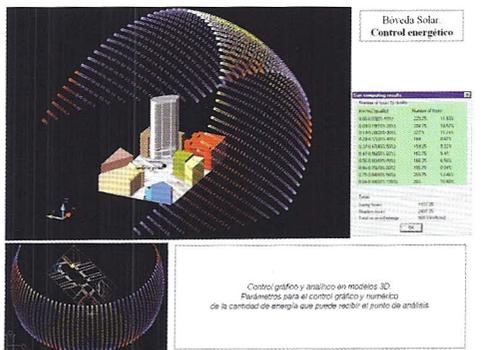
6



7



8



9