CONTROL CLIMATICO DE LOS ESPACIOS ABIERTOS EN EXPO'92

Ramón Velázquez, Servando Alvarez, José Guerra
Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos
E.S.I.I. de Sevilla

PRESENTACION

Este documento es una síntesis de los trabajos orientados al tratamiento higrotérmico de los espacios abiertos integrados en el recinto de la Exposición Universal de Sevilla (EXPO'92). Su finalidad es ofrecer una visión panorámica de lo que se ha convenido en denominar Técnicas Bioclimáticas. Por esta razón, su contenido abarca principalmente el marco general del trabajo, su metodología básica, las actuaciones más relevantes, consecuencias del mismo y algunos resultados ilustrativos.

En su redacción se ha procurado huir de un excesivo tecnicismo y formulismo matemático con la intención de hacerlo asequible a profesionales alejados de una especialización en Transmisión de Calor, pero, por otro lado, involucrados en el diseño arquitectónico o urbanístico de espacios abiertos.

Estos trabajos han sido desarrollados por un grupo multidisciplinar dirigido por el Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos perteneciente a la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla. La supervisión ha corrido a cargo del Departamento Técnico de EXPO'92 (quien igualmente lo ha subvencionado) habiéndose contado con la colaboración del Instituto de Energías Renovables del CIEMAT, que ha permitido la utilización del programa S3PAS, que en su día confeccionó para tal entidad el mismo equipo director de los trabajos aquí expuestos.

EL CLIMA DE SEVILLA

La Exposición Universal tendrá lugar durante los meses de abril a octubre de 1992.

En la tabla 1 se resumen las variables climatológicas más representativas del clima exterior de la ciudad en dicho período. A los datos incluidos en la mencionada tabla se pueden añadir los siguientes:

- La época más calurosa abarca los meses de junio a setiembre, con una temperatura máxima absoluta registrada de 45°C.
- El 1% de las horas de este período (29 h) presenta temperaturas superiores a 37,8°C., el percentil del 2,5% arroja valores por encima de 36,4°C y hay que contar con niveles de 35°C en el percentil del 5% (144 h).

Los datos anteriores se refieren al aeropuerto de Sevilla, no existiendo un recalentamiento adicional del recinto debido a las siguientes circunstancias:

a.- La beneficiosa influencia de los dos brazos del río y a las 16 ha. de lámina de agua del Lago.

b.- La abundante arboleda y masa vegetal.

c.- La acertada decisión de la Organizadora de prohibir vertidos térmicos al medio ambiente evitándose así la formación de **islas de calor**.

Aún contando con todos estos efectos beneficiosos, los datos climáticos muestran con claridad que, durante las horas centrales del día, las condiciones térmicas no son favorables para uso de los espacios abiertos, a no ser que en parte de los mismos se actúe de manera que tales condiciones sean suavizadas. Este ha sido el origen y la finalidad de los trabajos recogidos en este documento.

LOS ESPACIOS ABIERTOS

Como es fácil adivinar, el espacio abierto es toda zona no confinada por una edificación.

No obstante y a pesar de este aspecto esencial común a todo espacio abierto, no todos ellos representan las mismas características, existiendo connotaciones diferenciales que permiten una clasificación en tres categorías.

- Por "Zona de paso" se entiende el

	Temperatura media máxima (°C)	Temperatura media mínima (°C)	Humedad absoluta media (g/kg)	Humedad relativa media (%)*	Radiación media de las máximas** (W/m²)
Abril	22,9	9,9	8,1	45	772
Mayo	26,0	12,1	9,8	47	825
Junio	31,2	15,6	11,1	39	840
Julio	35,3	17,3	12,3	34	863
Agosto	35,1	17,7	12,3	35	827
Septiembre	31,4	16,0	12,3	43	725

* Coincidente con las temperaturas máximas.
** Sobre superficie horizontal.

Tabla 1.

espacio cuya funcionalidad es la de actuar como vial para el visitante; a lo largo de ella discurrirá el flujo principal de personas en su traslado de un edificio a otro.
Estos viales de concepción arquitectónica variada tendrán una dimensión oscilante entre 3 m. y 8 m. de ancho y se estima que la permanencia del ocupante dentro de esta zona no supere los 15 minutos, siendo su actividad la propia de un paseante relajado.

- Las "Zonas de estancia" se diferencian apreciablemente de las anteriores: su objetivo es ofrecer lugares para el descanso, la restauración ligera, la contemplación de espectáculos cortos y aleatorios, etc. Para ello, la dimensión de tales zonas cubrirá superficies de dimensión característica máxima entre 20 m. y 40 m., presumiéndose que cualquiera que sea el uso específico de cada zona, el visitante adoptará una actividad de tipo sedentario.
- Finalmente, las "Zonas adyacentes" son simplemente los espacios de conexión entre los anteriores.

Esta clasificación inicial permite hacer un primer desmembramiento del objetivo inicial: el tratamiento a introducir en cada una de las zonas debe estar acorde con la funcionalidad de las mismas.
Debido a ello, se ha asignado en algunos casos una "intensidad de acondicionamiento" alta en las zonas de estancia, media en las de paso, y baja en las adyacentes.
A pesar del carácter puramente cualitativo e indefinido de esta clasificación, la misma se ha revelado útil a lo largo del desarrollo del trabajo.

MARCO GENERAL DEL TRABAJO

Los apartados que siguen quieren revelar aspectos que no son fácilmente explicables en los capítulos dedicados a las facetas técnicas del acondicionamiento de los espacios.
Pero sería igualmente difícil captar la pretensión, alcance y problemática de aquello que se ha intentado resolver en ausencia de lo que, al menos parcialmente, han constituido las condiciones de contorno de los problemas tratados.

Tecnología y Cultura

Sería una omisión importante dejar de manifestar que el estudio realizado, en sus raíces más profundas, no es más que una simbiosis entre las tecnologías y conocimientos del siglo XX y algunos de los patrones culturales de nuestra región.
Sevilla, al igual que otras provincias andaluzas, es rica en contenidos culturales, a través de los cuales se han combatido secularmente los rigores de sus largos y a veces extremados veranos.
Nuestras calles, plazas y edificios históricos más representativos, muestran e integran numerosas técnicas que dulcifican los rigores del estío andaluz. Toldos, velas, pérgolas, fuentes, estanques, arboledas y vegetación, son algunos de estos recursos que con tanta frecuencia pueden, aun hoy día, contemplarse en el hábitat urbano de la región.
Estas sencillas, pero efectivas soluciones, únicas disponibles en los tiempos pretéritos, fueron guiadas por la intuición de sus diseñadores y mejoradas con la experiencia que permitía el paso del tiempo. Sería interesante analizar, si la mejora del clima urbano favoreció y facilitó la convivencia en los espacios abiertos y comunes en nuestros pueblos y ciudades, y si ello supuso un factor significativo en el desarrollo del carácter social de sus habitantes, tan abierto al contacto y a la hospitalidad.
La mayor parte de las soluciones propuestas en este documento se basan en los mismos recursos que, por intuición, empleaban nuestros predecesores. Con su implantación, se aspira a propiciar un ambiente urbano en el recinto de la Exposición, proclive al contacto humano, al intercambio cultural, enriquecedor para los participantes, hasta el punto que uno de los logros de la EXPO'92, cuyo tema monográfico es la Era de los Descubrimientos, sea el redescubrimiento de esta riqueza cultural que supone el acercamiento respetuoso entre las personas.
Por tanto, en la base del acondicionamiento de los espacios abiertos, subyace no sólo la intención de una mejora de las condiciones climáticas naturales de la Isla de la Cartuja para hacer más atractiva la permanencia en el recinto, sino también la intención de que el entorno microclimático favorezca la comunicación social entre los asistentes.

TRADICION E INNOVACION

Como se ha puesto de manifiesto previamente, la mayor parte de las soluciones propuestas para el acondicionamiento de los espacios abiertos, utiliza los mimos recursos (sombra, agua y vegetación) que las soluciones tradicionales.
El estudio (cuya síntesis se ofrece en este documento) arranca, pues, de una arraigada tradición cultural a la que se aplica un proceso de innovación.
En una primera etapa, se trató de discernir en las soluciones tradicionales lo que era fundamental y lo que era accesorio, ya fuera por motivos de carácter estético o bien por las limitaciones tecnológicas de la época.
Posteriormente, se trató de reutilizar y mejorar los conceptos fundamentales con el soporte que proporcionan las tecnologías actuales.
La simulación físico-matemática y la experimentación subsiguiente, tienen este carácter innovador y, gracias a estos procedimientos instrumentales (tan característicos de nuestra civilización) se pueden predecir y evaluar con anticipación los resultados de las soluciones estudiadas.

Optimización económica

En el estudio de las diferentes soluciones se ha utilizado una metodología basada en la simulación de los sistemas térmicos y su posterior experimentación para comprobar la fiabilidad de los modelos fisicomatemáticos.
La metodología empleada permite no sólo realizar una prognosis fiable de las posibles soluciones, sino también una optimización económica de las mismas. Así por ejemplo, el estudio de la influencia sobre el confort térmico de las características físicas y geométricas de cada solución, permite optimizar la elección de los diferentes materiales. En concreto, con la modelización del comportamiento térmico de las zonas cubiertas, se pueden especificar con garantía las característi-

cas del material de la protección. Al oscilar el coste por metro cuadrado de estos materiales en la relación 100 a 1, se puede conseguir una reducción significativa en el coste de las protecciones, acotando las especificaciones de los diferentes materiales de acuerdo con los valores fijados en la modelización. Por otra parte, el análisis de las condiciones en que son aplicables las diversas soluciones, basado en la simulación de los diferentes elementos, permite aplicar cada técnica de una forma selectiva, reduciendo la inversión necesaria. Por ejemplo, el análisis del comportamiento térmico de los pavimentos ha mostrado que sus características térmicas afectan especialmente a la sensación de bienestar en zonas no protegidas de la radiación solar. Se pueden, pues, incorporar soluciones basadas en pavimentos convencionales en muchas zonas del recinto, obstruyendo la radiación solar mediante árboles o protecciones, descartando así soluciones con un coste superior.

Limitaciones de las condiciones de confort alcanzables

En los espacios abiertos de EXPO'92 no se pretenden alcanzar condiciones termohigrométricas tales que los visitantes puedan experimentar una sensación de bienestar equiparable a la que se da en recintos interiores climatizados. Esto es así por dos razones: en primer lugar, es prácticamente imposible, desde un punto de vista físico, lograr dicha meta mediante tecnologías pasivas. En segundo lugar, no es viable económicamente tal pretensión a través de técnicas convencionales, dada la magnitud de la superficie a tratar.

Por lo tanto, al hablar de acondicionamiento climático de los espacios abiertos en EXPO'92, es más adecuado hacerlo en términos de suavizar, atemperar, dulcificar o mejorar aún cuando, debido al arraigo del vocablo confort térmico, se haga uso frecuente del mismo.

Por último, no hay que cometer un error de perspectiva: las técnicas bioclimáticas constituyen un "medio para", y no pueden erigirse en un fin en sí mismo.

Las técnicas bioclimáticas son técnicas acompañantes o más bien incorporadas en el diseño arquitectónico, urbanístico, paisajístico y estético de EXPO'92. Ha correspondido a los equipos de diseño definir, limitar, excluir o potenciar unas técnicas frente a otras en aras de lograr un conjunto equilibrado.

El equipo técnico que ha desarrollado las posibles técnicas a emplear ha querido mostrar las vías más adecuadas, advertir sobre la inconveniencia de ciertos tipos de diseños, sugerir posibilidades de integración y, en definitiva, exponer el muestrario de técnicas disponibles, aceptando la autoridad superior de quienes tenían por misión lograr una concepción holística del entorno.

EL CONFORT EN LOS ESPACIOS ABIERTOS

El objetivo genérico del trabajo ha sido la mejora de las condiciones ambientales en los espacios abiertos.

Se observa fácilmente que la definición anterior es puramente cualitativa y no ofrece guía alguna para establecer una metodología.

De aquí que el primer paso a cumplimentar sea analizar bajo qué condiciones una persona puede sentirse confortable cuando está situada en un recinto abierto.

Para ello se ha establecido una "Situación de referencia" constituída por un hombre medio situado en un espacio abierto no cubierto sometido a unas condiciones climáticas exteriores correspondientes a las 14 horas solares de un día de verano en Sevilla, con un percentil de temperatura seca del 1% condiciones que superarán en rigor climático al 99% de las horas de verano.

Los flujos de calor intercambiados entre el organismo y el ambiente exterior determinan un balance neto positivo hacia el organismo, el cual lo compensa y equilibra mediante un efecto de sudoración.

La cantidad de agua evaporada por el organismo se ha tomado como magnitud del grado de disconfort experimentado por el ocupante.

La situación de confort ideal se obtendría cuando, en ausencia de sudoración, se produjera un flujo térmico negativo sobre el ocupante que igualara

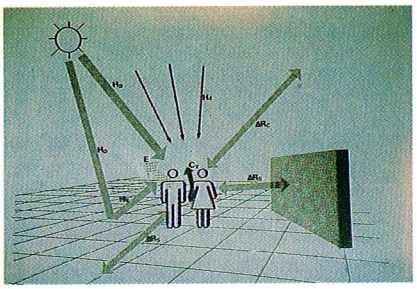

Fig. 1.- Flujos de calor en el cuerpo humano.

al calor neto generado por el organismo.

En la figura 1 se representan los diferentes flujos de energía correspondientes al caso de referencia.

En particular, los términos que intervienen son los siguientes:

- H: es la radiación solar incidente sobre el ocupante, suma de la directa (H_D), difusa (H_d) y reflejada por otras superficies (H_r).
- R: es el intercambio radiante de onda larga constituido por la transferencia con el suelo y superficies que rodean y ven al ocupante, (R_s) así como el intercambio con la bóveda celeste (R_b).
- Cv: representa la transferencia convectiva con el Medio ambiente.
- V: incluye las pérdidas de calor por las vías respiratorias.
- E: engloba a las pérdidas por evaporación, fruto de la sudoración.

En la tabla 2 se cuantifican los valores típicos de los flujos energéticos más importantes pudiéndose derivar las siguientes consecuencias:

a. De los componentes controlables del Balance, la Radiación Total (directa, difusa y reflejada) constituye el factor más importante, contribuyendo con más de la mitad de las ganancias térmicas del ocupante.
b. Por el contrario, la temperatura ambiente cuyo efecto sólo aparece en el término convectivo, tan sólo determina el 7% de dichas ganancias.
c. La sudoración se establece automáticamente en función de los mecanismos reguladores del organismo, lo que dará una medida de su esfuerzo adaptativo y, en consecuencia, del grado de confort o disconfort.

CRITERIOS GENERALES DEL ACONDICIONAMIENTO

La tabla 2 contiene la estrategia genérica para abordar con éxito el acondicionamiento térmico de los espacios abiertos.
Para mejorar el confort basta con disminuir el nivel de sudoración, lo cual, a su vez, implica rebajar la contribución de las diferentes ganancias, si admiten la inversión de signo.
La tabla 3 resume tal estrategia y permite evaluar groseramente el grado de efectividad alcanzable con cada medida. La mencionada tabla requiere algunas precisiones:

a.- En términos generales, se pueden arbitrar tantas medidas potencialmente aplicables como resultan de combinar en número e intensidad las técnicas específicas mencionadas.

b.- En lo anterior está implícito que las diferentes medidas no suponen una yuxtaposición secuencial fija, ya que existen numerosas combinaciones que originan el mismo nivel de confort (este hecho se aclarará mas adelante en el caso de la rotonda). Parece claro, no obstante, que la obstrucción de la radiación directa es el inicio de cualquier estrategia de acondicionamiento y que la reducción de la temperatura es el último escalafón a emplear, dadas las magnitudes relativas con que contribuyen al balance.

c.- El número de variables sobre las que se puede actuar y la intensidad de la manipulación depende en cada caso de numerosos factores entre los que destacan:
- Las características del espacio a tratar (geometría, dimensiones, orientación, grado de confinamiento).
- Actividad de los ocupantes y tiempo previsto de permanencia en la zona.
- Efectividad y coste de las posibles técnicas a emplear.
- Posibilidades de integración de dichas técnicas en el área sin distorsionar su contenido estético.

	Componente del Balance	Cuantía (W)	Porcentaje	Controlabilidad externa
Ganancias sobre el ocupante	1.Metabolismo	60	24	No controlable
	2. Radiación total (directa + difusa + reflejada)	135	55	Controlable
	3.Intercambio radiante de larga	35	14	Controlable y susceptible de ser negativa
	4. Convección	15	7	Controlable y susceptible de ser negativa
	Total ganancias	245	100	
Pérdidas del ocupante	5.Intercambio con la bóveda celeste	25		
	6.Sudoración	220		Controlable su efectividad real
	Total de pérdidas	245	100	

Tabla 2.

ASPECTOS DIFERENCIALES ENTRE ACONDICIONAMIENTO DE ESPACIOS INTERIORES Y EXTERIORES

Aunque el objetivo en ambos casos es el mismo, existen aspectos diferenciales que conviene resaltar, como son los siguientes:

Influencia de la radiación incidente sobre el ocupante

En espacios interiores, por lo general los intercambios radiantes, tanto de corta como de larga, son despreciables. Por el contrario, en el acondicionamiento de exteriores, tal efecto no sólo está siempre presente sino que su cuantía es porcentualmente la mayor de todas las ganancias.
En consecuencia, el bloqueo efectivo de la radiación es la medida más eficaz hasta tal punto que no tiene prácticamente interés implementar técnica adicional alguna sin haber eliminado previamente el intercambio radiante en un porcentaje significativo.

Influencia del intercambio convectivo

En climatización convencional la técnica más usual para situarse en las bandas de confort es actuar controlando el grado higrotérmico del aire del local, lo que supone implícitamente que la transferencia convectiva es el capítulo más importante del Balance térmico.
Incluso cuando aparecen efectos radiantes se intentan compensar los mismos modificando las condiciones de diseño, o sea, incrementando las transferencias convectivas desde el ocupante al espacio.
Sin embargo, en el tratamiento de exteriores la fracción convectiva no es el parámetro determinante y, por tanto, las técnicas tendentes a lograr una re-

Medidas	Actuaciones genéricas	Reducciones típicas en ganancias (W)	Técnicas específicas
Reducción de la radiación solar	Obstrucción de las radiaciones directa y difusa Obstrucción de la radiación reflejada	40 a 70 25 a 50	Coberturas. Confinamiento Tratamiento de superficies adyacentes.
Reducción o inversión intercambio radiante de larga longitud de onda	Reducción de temperaturas de superficies circundantes	20 a 50	Suelos: pavimentos fríos, láminas de agua. Coberturas: riego, láminas de agua. Superficie vertical: cascadas, cortinas de agua.
Reducción o inversión intercambio colectivo	Reducción de temperaturas del aire Movimiento de aire enfriado	15 a 20	Confinamiento Enfriamiento sensible. Enfriamiento latente. Encauzamiento brisas Chorros de agua.

Tabla 3.

ducción de la temperatura ambiente sólo deben aplicarse tras haber agotado las restantes acciones.

Influencia de la velocidad del aire

Las técnicas convencionales de climatización tienden a evitar tanto las corrientes de aire como la existencia de zonas muertas no batidas por los flujos de aire

En el espacio abierto es tolerable y deseable el establecimiento de velocidades de aire en el plano de ocupación superiores a las que se dan en la climatización convencional; de este modo se garantiza la efectividad de la sudoración al poder evaporarse con más facilidad y se favorece el intercambio convectivo al aumentar el coeficiente de transferencia piel-aire circundante.

Por otro lado, en los espacios abiertos hay que disponer de algún tipo de control sobre las entradas parásitas de aire si se emplean técnicas encaminadas a la reducción de la temperatura ambiente.

De aquí que el dotar al espacio a tratar de un cierto grado de confinamiento sea esencial para el éxito de la reducción de temperatura.

Arquitectura e Ingeniería

Tal vez sea éste el punto diferenciador más importante entre ambos tipos de acondicionamiento.

En una edificación la concepción de la epidermis, misión de la Arquitectura, es, sin duda, el factor más determinante de la demanda energética a satisfacer por la instalación de climatización, objetivo de la Ingeniería. Es siempre deseable partir de una epidermis racionalmente concebida desde el punto de vista energético, pero hay que indicar que, incluso a falta de este requisito, se puede lograr en el interior una plena condición de confort, aunque sea a expensas de unos costes inadecuados.

Por el contrario, en los espacios abiertos los elementos estructurales, arquitectónicos y urbanísticos que conforman dichos espacios son, al mismo tiempo, los componentes tecnológicos de la instalación de climatización.

Basta observar las tecnologías específicas incluidas en la tabla 3 para comprobar que las cubiertas, láminas de agua, pavimentos, vegetación, confinamiento, etc. son, al mismo tiempo, elementos arquitectónicos e ingenieriles.

Por todo ello, puede afirmarse que es inviable el tratamiento térmico de los espacios abiertos sin una participación de la Ingeniería desde las primeras etapas del diseño arquitectónico.

Grados de confort alcanzable

Las técnicas actuales de climatización facultan para alcanzar en los espacios interiores condiciones termohigrométricas que garantizan una sensación de confort plena para el ocupante representativo.

Ello es así porque de alguna manera el diseño arquitectónico y el ingenieril no son variables dependientes.

En situaciones de exterior, tal como se ha mencionado anteriormente, la dependencia es tan fuerte que las técnicas de acondicionamiento no pueden implementarse de espaldas al diseño arquitectónico.

En numerosas ocasiones éste no admite los condicionantes o/y restricciones que impone la Ingeniería y como resultado de ello las condiciones finales del entorno quedan supeditadas a tales restricciones.

Teniendo presente tales limitaciones podría decirse que el objetivo en espacios abiertos es más bien atemperar, dulcificar y atenuar el rigor climático exterior que el alcanzar un grado de confort equiparable al de recintos confinados.

Metodología

La metodología empleada para resolver lo que genéricamente se ha denominado "cómo hacer" viene determinada principalmente por el punto de partida, por los objetivos propuestos y por las restricciones establecidas.

La base de partida está constituída por las técnicas específicas relacionadas en la tabla 3.

Los **objetivos** propuestos quedan establecidos del siguiente modo:

- **Cuantificación**: Se debía obtener una evaluación cuantitativa de cada una de las técnicas específicas analizando su influencia individual sobre el confort.
- **Generalización:** La cuantificación anterior debería hacerse sin introducir restricciones que impidieran la aplicación de tal técnica a situaciones diferentes de las estudiadas.
  Así, por ejemplo, no se trata de cuantificar la eficacia de una cobertura en concreto sobre su capacidad para bloquear la radiación, sino más bien analizar las condiciones para ello de una cobertura cuya forma, material, color, permeabilidad luminosa, etc. fuera cualquiera.
- **Criterios de diseño:** Los objetivos de cuantificación y generalización tendrían que concluir en la elaboración de unos criterios de diseño que permitieran la guía del mismo.
- **Jerarquización:** En todo momento se debía tener presente que el futuro tratamiento de los espacios abiertos estaría integrado por un conjunto de las técnicas individuales inicialmente seleccionadas.

A su vez, dicho conjunto debía tener un carácter variable, esto es, la agrupación de técnicas potencialmente válidas para un espacio, no tendrían necesariamente que ser las mismas para un espacio diferente.

Esta jerarquización imponía no sólo evaluar cada técnica por separado, sino disponer de una herramienta de cálculo capaz de predecir con fiabilidad el comportamiento de los diversos conjuntos posibles.

Las principales restricciones a cada una de las técnicas son las de orden estético, funcional, económico y energético.

El procedimiento seguido ha sido el común a toda disciplina científica y consistente por tanto en la elaboración de un cuerpo teórico, que hay que contrastar con la experiencia para dotarlo de validez y capacidad de generalización.

En consecuencia, las etapas básicas han sido:

- **Modelización:** Consistente en el desarrollo de modelos matemáticos basados en los principios físicos que soportan a cada una de las técnicas específicas.
- **Experimentación:** Orientada por una parte a evaluar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de las diferentes técnicas ensayadas con especial énfasis en las de enfriamiento de aire y, por otra, a proporcionar datos para validar los modelos teóricos.
- **Validación:** En esta etapa se han contrastado los resultados pronosticados por cada modelo con los resultados reales medidos en una experiencia múltiple a escala real, ajustando el modelo cuando ha sido preciso.
- **Simulación:** Una vez validados los modelos individualmente, se procedió a un análisis de sensibilidad, variando los parámetros mas relevantes de cada técnica, obteniéndose de este modo información para:
  a.- Evaluar la influencia sobre el confort de cada parámetro.
  b.- Identificar las condiciones óptimas de funcionamiento de cada técnica.
  c.- Analizar la relación coste/beneficio de las mismas.
  d.- Obtener criterios generales de diseño.
- **Dimensionado de sistemas:** Completadas las etapas anteriores, se ha estado en disposición de la herramienta necesaria para acometer el diseño específico de cada espacio a partir de uno arquitectónico previo elaborado con los criterios previamente establecidos.

MODELIZACION

Entre los modelos desarrollados pueden mencionarse los siguientes:

a.- Confort térmico en espacios abiertos.
b.- Comportamiento térmico de coberturas.
c.- Determinación de sombras arrojadas por cobertura.
d.- Pavimentos enfriados.
e.- Enfrentamiento de aire mediante conductos enterrados.
f.- Estanques y láminas de agua con o sin pulverizadores o chorros.
g.- Enfriamiento evaporativo con unidades de tratamiento de aire convencionales.
h.- Enfriamiento evaporativo mediante evaporación de gotas **in situ** por convección natural: (microniza-dores en árboles o bajo pérgolas).
i.- Enfriamiento evaporativo mediante evaporación de gotas **in situ** por convección forzada: (torres frías).
j.- Enfriamiento evaporativo mediante evaporación de gotas **in situ** por convección forzada: (barreras húmedas).
k.- Movimientos de aire interzonales.

La obtención de modelos individuales validados no es suficiente, ya que cualquier tratamiento se conforma por la integración de varios componentes. Es, por tanto, precisa una herramienta capaz de establecer la conexión entre los diversos subsistemas y predecir el comportamiento conjunto de manera igualmente fiable.

Esta tarea ha corrido a cargo del programa S3PAS elaborado por la Cátedra de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Tal programa fue diseñado por encargo del Instituto de Energías Renovables del CIEMAT y expresamente cedido para el presente trabajo.

El programa S3PAS no solamente se emplea como soporte para la interconexión de los modelos individuales, sino que también incluye otros subsistemas desarrollados con anterioridad a este trabajo.

En cualquier caso, el S3PAS modela el intercambio térmico y aeráulico entre el aire en la zona tratada y los espacios adyacentes, suministrando los resultados globales de los subsistemas implicados.

EXPERIMENTACION
LA ROTONDA BIOCLIMATICA

Se ha realizado un montaje experimental a escala real que contiene los elementos mas significativos que formarán parte de los espacios abiertos: zonas de paso de diferentes tamaños y con diferentes coberturas, un estanque con chorros y fuentes de diversos tipos, y especialmente, una zona de estancia de 900 m^2. denominada rotonda bioclimática (Fig.2) en la que se han ensayado, entre otras, las técnicas naturales de enfriamiento de aire. En lo que sigue de esta sección, se pondrá especial énfasis en los experimentos realizados en la rotonda.

Descripción geométrica

La rotonda bioclimática ha sido diseñada teniendo en cuenta el tamaño, funcionalidad y aspecto estético pretendidos para las zonas de estancia que se distribuirán por toda la EXPO'92.

Especialmente está formada por tres niveles unidos por escaleras y enmarcados por un cuadro de 31 m. de lado. Los dos niveles inferiores son círculos concéntricos de 24 y 16 m. respectivamente y constituyen la zona útil para los ocupantes. La diferencia de altura entre cada dos niveles es de 80 cm por los que circula agua en forma de cascada. La rotonda está cubierta por una cobertura de PVC blanco (13% de transmisividad) con forma de pirámide truncada abierta por la parte superior.

Como se mencionó previamente, el objetivo de la rotonda es servir de espacio físico para realizar experimentos. Como consecuencia, incluye un conjunto considerable de técnicas y estrategias orientadas al acondicionamiento climático de los espacios abiertos.

Estrategias de acondicionamiento

La clasificación se hará de acuerdo con los diferentes criterios de acondicionamiento establecidos en el transcurso del trabajo (tabla 4):

Enfriamiento evaporativo

Cuando se ponen en contacto aire caliente y agua se produce la evaporación de ésta última, utilizando para ello energía transferida desde el aire que, como consecuencia, se enfría.

La intensidad de la evaporación sube a medida que crece la superficie de contacto entre los dos fluidos, lo que puede conseguirse mediante gotas de pequeño diámetro o utilizando un medio poroso.

Con base en el principio físico mencionado, en la rotonda se han ensayado los siguientes sistemas:

- Unidad de Tratamiento de Aire. UTA (Fig.4). Concepto: Enfriamiento evaporativo en relleno. El aire movido por un ventilador atraviesa un relleno que se mantiene permanentemente húmedo. A determinadas horas del día, el aire es postenfriado en el conducto enterrado de distribución. Con el fin de asegurar una temperatura apropiada del terreno en contacto con el conducto, se procede a su enfriamiento haciendo funcionar el ventilador durante la noche, aprovechando las bajas temperaturas del aire en estas horas.
- Micronizadores en árboles (Fig.5). Concepto: Evaporación de gotas (convección natural). Se incorporan a los árboles micronizadores que inyectan agua a presión a través de orificios de muy pequeño diámetro, lo que produce una niebla artificial alrededor del ramaje. Las gotas, cuyo tamaño medio es del orden de 20 micras, se evaporan en contacto

Fig. 2.- La rotonda bioclimática.

CRITERIOS	ACCIONES
1. Control de la radiación solar	Coberturas (directa + difusa). Confinamiento (reflejada).
2. Reducción de la temperatura de las superficies circundantes	Enfriamiento de la cobertura mediante riego. Enfriamiento del pavimento mediante agua circulando bajo él (Fig. 3).
3. Reducción de la temperatura del aire	Enfriamiento evaporativo (descrito a continuación).

Tabla 4.

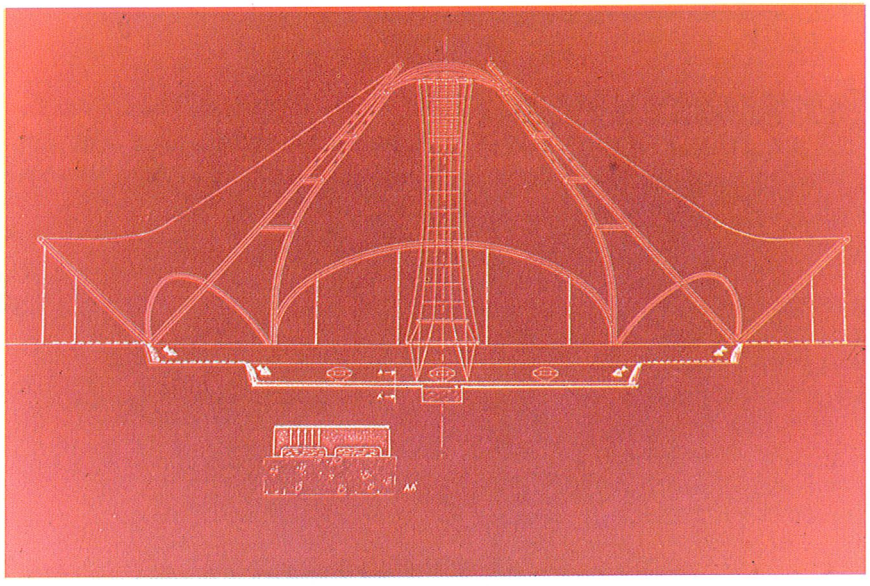

Fig. 3.- Pavimentos fríos y cascadas.

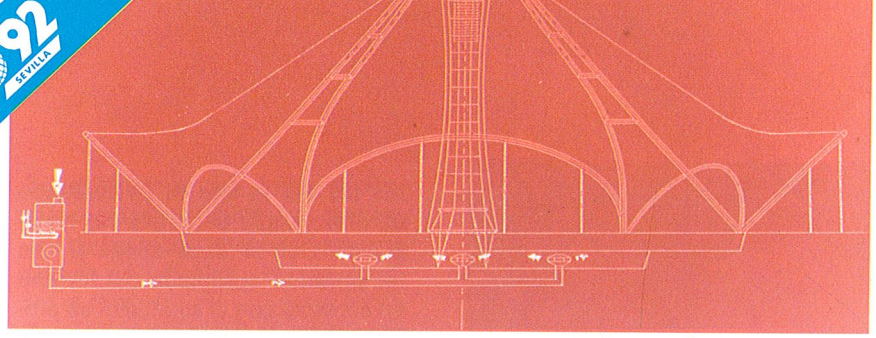

Fig. 4.- Unidad de tratamiento de aire.

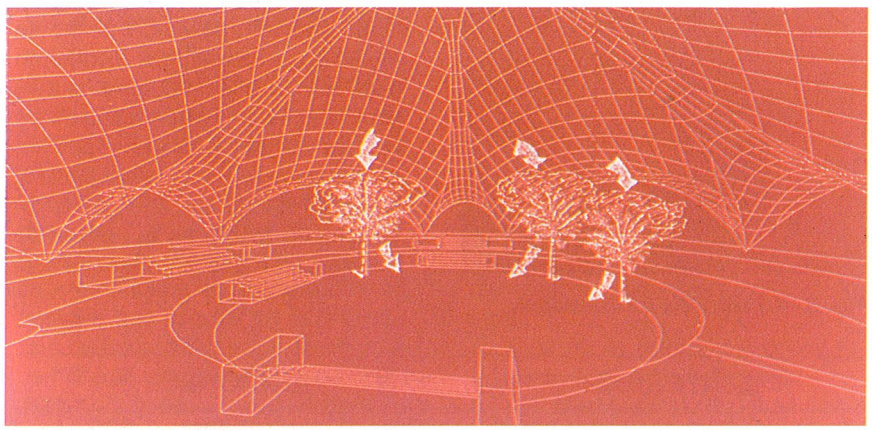

Fig. 5.- Micronizadores en árboles.

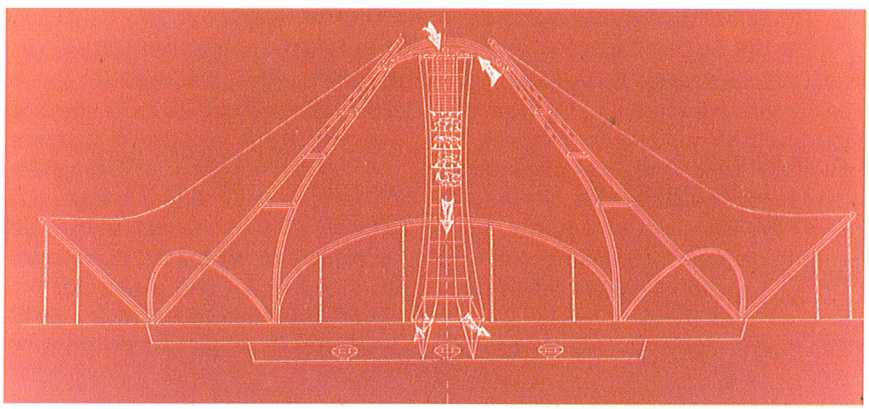

Fig. 6.- Micronizadores en torre.

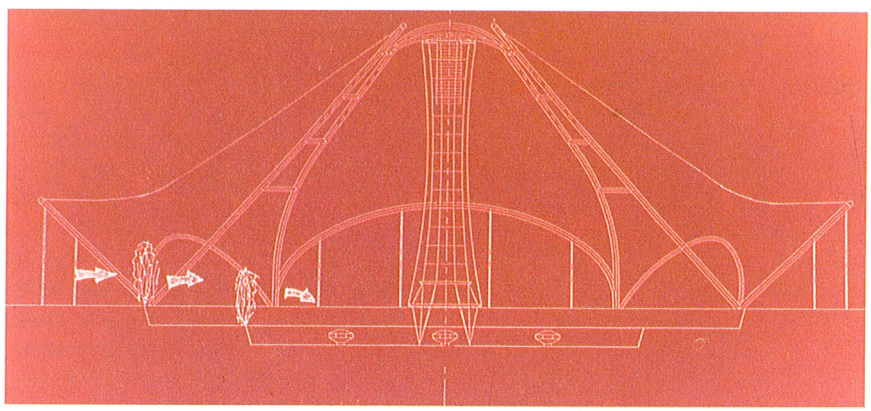

Fig. 7.- Barrera húmeda.

con el aire caliente circundante, tomando la energía necesaria de dicho aire que, en consecuencia, se enfría. Puesto que el aire frío es más pesado que el caliente, se origina un flujo continuo descendente de aire enfriado hacia la zona ocupada.

- Micronizadores en torre (Fig.6). Concepto: Evaporación de gotas. Convección forzada mediante ventilador.
  Los micronizadores en este caso están distribuídos a lo largo de la torre en diferentes secciones. La evaporación de las gotas enfría el aire impulsado por el ventilador situado en el extremo superior de la torre. Las variables de diseño y control deben seleccionarse de forma que se maximize la potencia frigorífica a la vez que se evita la caída de gotas no evaporadas que podrían mojar a los visitantes.
- Micronizadores en anillos periféricos. Barreras húmedas (Fig.7). Concepto: Evaporación de gotas. Convección forzada producida por viento. A pesar del alto confinamiento existente en la rotonda, no basta para impedir la entrada de aire exterior en caso de viento. La única manera de evitar que el viento anule el enfriamiento del aire consiste en colocar una barrera que preenfríe el aire exterior antes de que penetre en el espacio tratado climáticamente. Las barreras están basadas en el enfriamiento evaporativo que experimenta el aire cuando atraviesa una o varias hileras de micronizadores.

Se evaluaron tres agrupaciones de subsistemas diferentes:

— **Agrupación I**
  - Enfriamiento de cobertura mediante riego.
  - Enfriamiento de aire mediante micronizadores en árboles.
  - Operación de la barrera húmeda en caso necesario.

— **Agrupación II**
  - Enfriamiento de cobertura mediante riego.
  - Enfriamiento de aire mediante:
    - UTA como elemento base.
    - Micronizadores en árboles como elemento de apoyo.
  - Operación de la barrera húmeda en caso necesario.

— **Agrupación III**
  - Enfriamiento de cobertura mediante riego.
  - Enfriamiento de aire mediante:
    - Micronizadores en torre como elemento base.
    - UTA como elemento de apoyo.
  - Operación de la barrera húmeda en caso necesario.

Ejemplos de resultados experimentales y validación

La planta piloto incluye un total de 96 sensores, 41 de los cuales están dedicados a la caracterización de la rotonda, registrándose temperatura y humedad del aire en diferentes secciones, temperaturas superficiales y temperaturas del agua.
Adicionalmente, una estación meteorológica registra la temperatura y humedad del aire en un espacio no perturbado, así como radiación solar global sobre superficie horizontal, velocidad y dirección del viento.
Se incluyen a continuación algunos resultados:

- La figura 8 pone de manifiesto la capacidad de enfriamiento de la torre fría (12.000 m^3/h. de aire), durante los días 16 y 17 de agosto de 1.989. En ella se representa la temperatura ambiente exterior y la temperatura del aire a la salida de la torre.
- La figura 9 nuestra el valor de la temperatura superficial del plano de la cobertura orientado al SO., (la orientación más desfavorable) durante los días 16 de agosto (con riego) y 17 de agosto (sin riego), así como la temperatura del aire ambiente exterior. Puede apreciarse cómo el riego origina una reducción de la temperatura superficial del orden de 16°C.
- Las figuras 10a y 10b muestran respectivamente la temperatura seca y la humedad relativa del aire de la rotonda a diferentes alturas utilizando el Agrupamiento I. Los registros corresponden al día 19 de Agosto de 1.990 con un punto de consigna para la humedad relativa del 65% entre las cotas 0,5 y 1 m.
- En el apartado de validación se presentan las figuras 11 y 12 que permiten comparar los resultados medidos con los calculados mediante los modelos teóricos desarrollados. La figura 11 se refiere a la temperatura superficial de la cobertura durante tres días consecutivos, mientras que la figura 12 compara el salto de temperaturas obtenido en la torre fría para diversos regímenes de funcionamiento de los micronizadores.

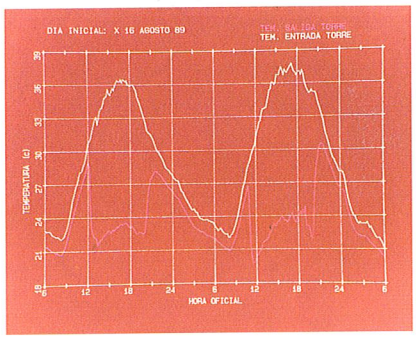

Fig. 8.- Enfriamiento de aire en la torre.

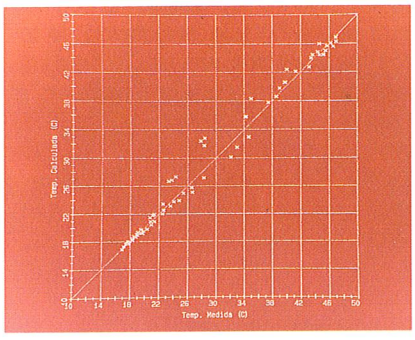

Fig. 11.- Temperatura de la cobertura medida (eje-x) y calculada (eje-y).

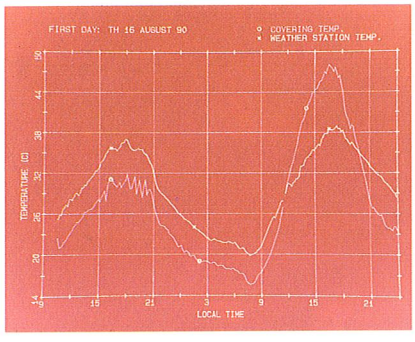

Fig. 9.- Temperatura de la cobertura con o sin riego.

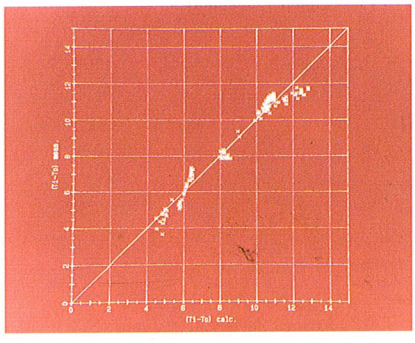

Fig. 12.- Caída de temperatura del aire en la torre. Valores medidos (eje-y) y valores calculados (eje-x).

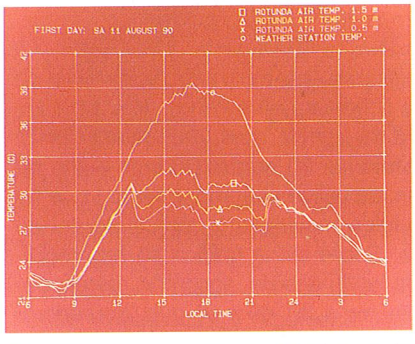

Fig. 10a.- Temperatura del aire en la rotonda (agrupamiento I).

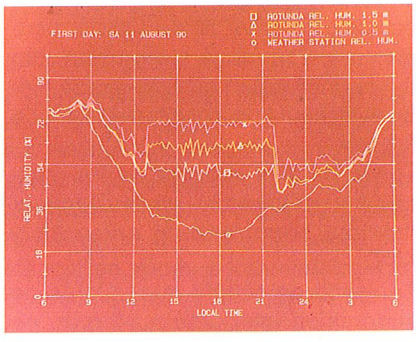

Fig. 10b.- Humedad relativa en la rotonda (agrupamiento I).

EVALUACION GLOBAL DE LAS CONDICIONES CLIMATICAS RESULTANTES

Los resultados globales de los experimentos deben ser evaluados en términos de confort.
Para conseguir unas determinadas condiciones de confort en espacios abiertos, se dispone de un total de cinco variables sobre las que se puede intervenir:

- Radiación solar.
- Temperaturas superficiales (cobertura, suelo y superficies verticales).
- Temperatura del aire.
- Velocidad del aire.
- Humedad relativa.

La línea de trabajo que se ha seguido para el diseño y la evaluación de todos los espacios abiertos y en particular para la rotonda, se basa en el análisis de las denominadas gráficas de isoconfort.

En cada gráfica y para unas determinadas condiciones de confort expresadas en términos de g/h de sudoración, se incluyen las variables que se quieren analizar. Se obtiene así un conjunto de curvas que contienen todas las combinaciones de la variables elegidas que originan la condición de confort requerida.

En el caso de la rotonda, se analizaron simultáneamente:

- temperatura de la cobertura,
- temperatura del aire,
- velocidad del aire.

Las restantes variables se toman con un valor constante y no aparecen debido a que:

a.- No se puede actuar sobre ellas debido a una decisión de diseño previamente tomada.

b.- Las técnicas potenciales para modificarlas serían poco efectivas.

Al primer grupo pertenecen la radiación solar controlada por una cobertura previamente decidida, cuya transmisividad es del 13%.

Al segundo grupo pertenecen la temperatura del suelo (el pavimento frío apenas tiene influencia sobre el confort si se va a reducir la temperatura del aire) y la temperatura de las paredes verticales (las cascadas son muy pequeñas y, por tanto, su efecto radiante sobre los ocupantes es insignificante). La humedad relativa aparece implícitamente en la gráfica ya que, al considerarse únicamente técnicas evaporativas para enfriamiento del aire, su valor viene condicionado.

La figura 13 muestra la gráfica de isoconfort resultante en la rotonda para 60 g/h. de sudoración y condiciones exteriores de diseño (38°C., 30% de humedad relativa). Dicha figura pone de manifiesto que, por ejemplo, para una velocidad del aire nula, se obtiene la misma sensación de confort con:

Temp. aire (°C)	Temp. cobertura (°C)
30	27
26	35
20	44

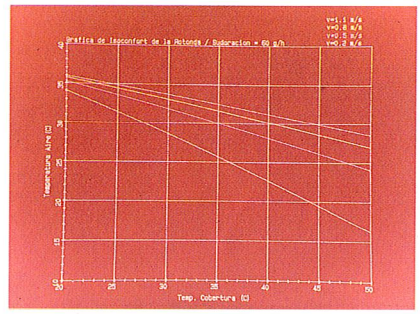

Fig. 13.- Gráfico de isoconfort (60 g/h).

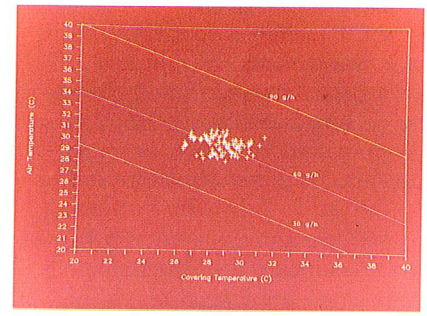

Fig. 14.- Resultados experimentales (agrupamiento I).

Asimismo, para una misma temperatura de cobertura (por ejemplo 34°C.), la misma sensación de confort se obtiene con:

Temp. aire (°C)	Velocidad aire (m/s)
26	0
30	0,5
32,5	1

Puesto que la temperatura de la cobertura sin tratamiento llega a valores del orden de 48°C., (Fig.11), es absolutamente imprescindible el riego de cobertura.

En la figura 14 se representan valores experimentales de la temperatura del aire y de la temperatura superficial de la cobertura durante los días 11, 12 y 16 de agosto de 1.990, desde las 12 hasta las 20 horas. Durante estos días, se utilizó el agrupamiento I que no origina movimiento apreciable del aire. Sobre dicha gráfica se han incluido las líneas de isoconfort correspondientes a 30, 60 y 90 g./h. de sudoración.

En la figura 15 se representa el mismo tipo de gráfica citado anteriormente, correspondiente en este caso a los días 25, 26, 27 y 28 de agosto, para los cuales se utilizó el Agrupamiento II que produce un movimiento de aire en el plano de ocupación del orden de 0,5 m/s.

Todos los días incluidos en las gráficas 9 y 10 tuvieron una temperatura máxima comprendida entre 36 y 40°C.

Teniendo en cuenta que valores de sudoración inferiores a 90 g./h. no producen una sensación de disconfort (**B.Givoni**, comunicación personal), se puede deducir que las técnicas utilizadas originan unas condiciones de confort suficientemente aceptables.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista conceptual y metodológico, el trabajo ha puesto de manifiesto:

a.- Existen notables diferencias entre el acondicionamiento convencional de locales y el tratamiento climático de los espacios abiertos, debiendo destacarse en éstos últimos la fuerte vinculación entre Arquitectura e Ingeniería, desde el comienzo del diseño, para lograr los objetivos perseguidos.

... Adicionalmente, una estación meteorológica registra la temperatura y humedad del aire en un espacio no perturbado, así como radiación solar global sobre superficie horizontal, velocidad y dirección del viento.

b.- La utilización de una determinada técnica para acondicionar un espacio abierto debe hacerse de modo extremadamente delicado, ya que un concepto que aparentemente es apropiado, puede tener un efecto irrelevante si no se cuidan los detalles del diseño.

c. La capacidad real de cada subsistema debe evaluarse siempre en términos del objetivo final (conseguir unas determinadas condiciones de confort) y en comparación con otros subsistemas alternativos.

d. Para determinar de modo consistente el interés de cada medida concreta en cada situación específica, se requiere un conocimiento previo basado en el proceso modelización/experimentación/simulación.

Desde el punto de vista de los resultados experimentales se ha comprobado que es posible suavizar y dulcificar las condiciones de habitabilidad de los espacios abiertos mediante el empleo de tecnologías blandas y naturales con un bajo coste. Igualmente se ha contrastado que tales técnicas son compatibles con los aspectos estéticos y funcionales requeridos por la Arquitectura y el Urbanismo.

Desde el punto de vista del alcance, hay que significar que probablemente ésta sea la experiencia más importante a nivel mundial acometida en este campo. No obstante es preciso destacar que la superficie tratada de 120.000 m^2. aproximadamente sólo representa el 5% del total de EXPO'92.

Por tanto, sólo en esa reducida extensión puede esperarse una mejora de las condiciones termohigrométricas, quedando el resto del recinto en las condiciones comunes del entorno climático sevillano.

Igualmente debe insistirse, una vez más, en que el grado de confort en los espacios tratados no puede identificarse con el concepto de confort actual en los recintos cerrados.

Finalmente, hay que reconocer que la materialización de estos trabajos y su incorporación a EXPO'92, han sido posibles como consecuencia de una serie de factores entre los que cabe destacar:

- La favorable posición de EXPO'92 en relación con el respeto hacia la Naturaleza.
- La adopción de un plan interactivo entre Arquitectura e Ingeniería desde las primeras etapas de diseño.

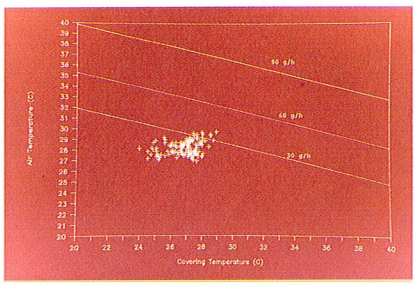

Fig. 15.- Resultados experimentales (agrupamiento II).

Fig. 16.

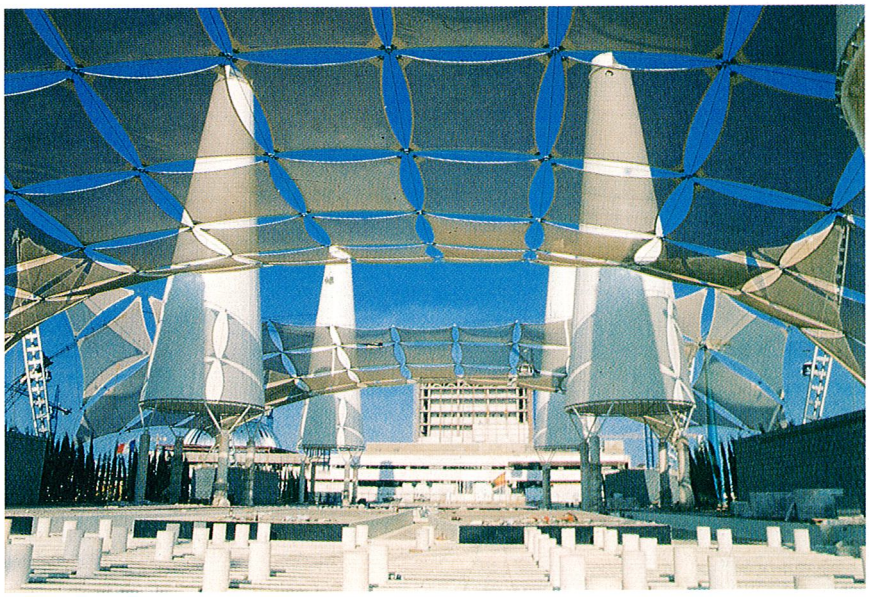

Fig. 17.

ANEXO.
ALGUNAS REALIZACIONES

El estado actual del trabajo permite afirmar que una gran parte de las técnicas de acondicionamiento propuestas estarán presentes en los espacios abiertos. La excepción la constituyen los pavimentos fríos que han sido descartados debido a su pobre eficiencia en zonas sombreadas y los conductos enterrados que no se incluirán por problemas de adecuación con las importantes obras de infraestructura que han debido terminarse con anterioridad al proyecto de acondicionamiento.

Salvando estas dos excepciones, los restantes subsistemas y técnicas se usan en versiones mejoradas y adaptadas a cada caso concreto. Citamos a continuación algunas actuaciones representativas.

En el capítulo de coberturas, se ha optado básicamente por el uso de la vegetación, debido a sus buenas propiedades que permiten conseguir valores bajos de transmisividad sin que la radiación absorbida suponga sobrecalentamiento al estar éste compensado por la propia transpiración de las plantas. No obstante, para que el buen comportamiento antes aludido sea efectivo, la vegetación debe producir una cobertura continua y uniforme. El crecimiento de las plantas se

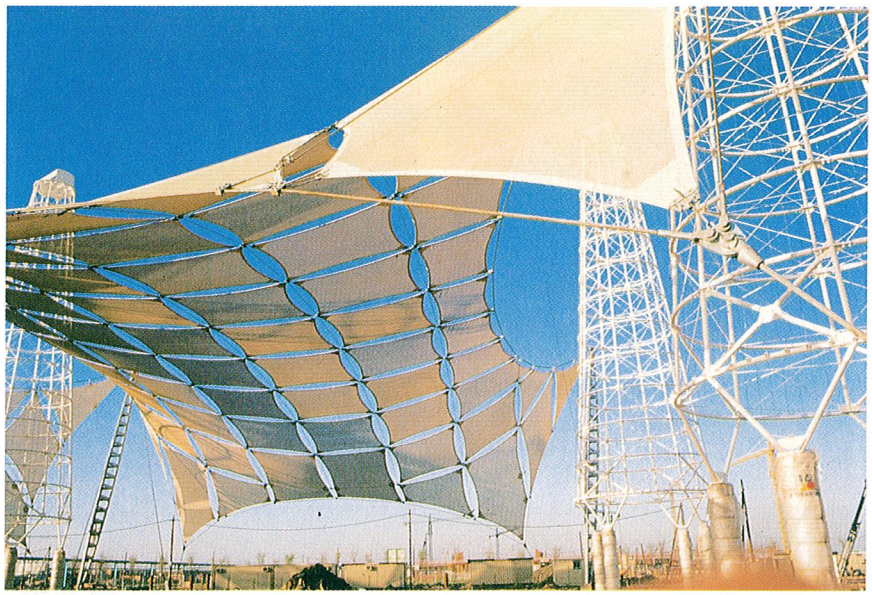

Fig. 18.

Fig. 19.

ha garantizado mediante el uso de la denominada "pérgola EXPO", que contiene jardineras situadas en la propia estructura de sombra, evitándose de esta forma el crecimiento desde el suelo. En los momentos actuales, 50.000 m^2. de pérgola EXPO (en módulo de 6 x 6 m y 12 x 6 m) se encuentran en un estado avanzado de desarrollo (Fig.16) en los futuros aparcamientos del recinto de la Exposición. Con posterioridad, estos módulos serán trasladados a los espacios abiertos y situados a diferentes alturas. Con independencia de la vegetación, se utilizan coberturas dobles como es el caso del apeadero del ferrocarril (Fig.20) y simples de PVC con riego controlado como en el Palenque.

Las láminas de agua (tanto en estanques como en forma de cascada) son una constante de todos los espacios abiertos. A título de ejemplo, citaremos la cascada de más de 400 m de longitud y 6 m de altura que recorre longitudinalmente la Avenida V.

Entre las técnicas de enfriamiento de aire, todos los subsistemas ensayados en la rotonda serán utilizados. Merece la pena destacar la presencia de las 12 torres frías de 30 m situadas

Fig. 20.

en la Avenida II. Estas torres frías incluyen en la parte superior un elemento captador de brisas (que sustituye al ventilador de la rotonda) y pueden proporcionar una potencia frigorífica superior a los 3,5 millones de frigorías/h. En las figuras 17 y 18 se muestra el estado actual de dichas torres antes de ser colocada la envuelta de PVC blanco.

Como ejemplo de acondicionamiento integral se encuentra el palenque (Fig.19). Esta zona de más de 8.000 m^2., incluye un espacio para espectáculos con capacidad para 1.500 espectadores, así como otros espacios de restaurantes y tiendas. La estrategia de acondicionamiento comprende:

- Cobertura de PVC blanco (13% de transmisividad) con riego controlado.
- Cinco unidades de tratamiento de aire provistas cada una de una sección de enfriamiento sensible y una de enfriamiento evaporativo.
  La sección sensible consiste en un intercambiador que utiliza agua fría procedente de los propios estanques del Palenque. Para evitar que dicha agua se caliente, los estanques disponen de surtidores que funcionan de forma ininterrumpida durante la noche.
- Barreras húmedas en todo el perímetro, formadas por una combinación de cortinas de agua y micronizadores.

Finalmente, citaremos una nube de agua situada en la Avenida de las Palmeras, que, producida mediante 1.340 micronizadores instalados en una esfera de 22 m de diámetro, permitirá la evaporación de unos 10 m^3./h de agua y, por tanto, la producción de casi seis millones de frigorías/h cuyo efecto podrá apreciarse en todo el entorno. ■