



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

00181
423
243

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

ESTUDIO DE TECHOS DE EDIFICIOS
CONSTRUIDOS PARA OPERAR EN FORMA PASIVA

TESIS DE DOCTORADO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN ARQUITECTURA CON ESPECIALIDAD EN TECNOLOGIA

por

José Diego Morales Ramírez

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Cap. 1	INTRODUCCION	1
	1.1.- Descripción del Problema	4
Cap. 2	ANTECEDENTES	8
Cap. 3	OBJETIVOS E HIPOTESIS DE TRABAJO EN EL MODELO	17
Cap. 4	ESTUDIO TEORICO DEL PROBLEMA	19
	4.1.- Planteamiento Analítico del Problema	19
	4.2.- Planteamiento Simplificado del Problema	27
Cap. 5	ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROBLEMA	39
	5.1.- Descripción de la Techumbre	40
	5.2.- Estudio en el Prototipo	41
Cap. 6	RESULTADOS	44
	6.1.- Resultados Experimentales	44
Cap. 7	CONCLUSIONES	68
	REFERENCIAS	74
	ANEXO A .- GRAFICAS DEL EXPERIMENTO	78
	ANEXO B .- DESCRIPCION DE LA INSTRUMENTACION EMPLEADA PARA LOS EXPERIMENTOS	103
	ANEXO C .- GLOSARIO DE TERMINOS	113

CAPITULO 1

INTRODUCCION

El objetivo fundamental de la Arquitectura es el de generar espacios habitables a los seres vivos (humanos-animales-plantas), en los cuales puedan desarrollar sus actividades y funciones metabólicas de manera óptima. Para lograr este objetivo se requiere tomar en cuenta una gran cantidad de variables. Cuando se diseñan espacios para el humano, se involucran en este caso variables de tipo psicológico, cultural y espiritual.

Existe para cualquier tipo de proyecto, una serie de aspectos que deben tomarse en cuenta, uno de ellos es la protección de las inclemencias del medio ambiente que la Arquitectura debe proporcionar al usuario. Sin embargo, en las casas-habitación modernas, es común observar que los habitantes de climas templados suelen pasar la mayor parte del día en el exterior de su vivienda, ya que ahí están más confortables que en el interior de la misma, con lo cual la habitación deja de cumplir con una de sus funciones básicas [1]. En el caso de los lugares de trabajo: oficinas, fábricas, talleres etc., situados en climas extremosos, los usuarios están obligados a permanecer en el interior de los mismos, quedando sujetos con esto a soportar ambientes agresivos a la salud, o en su defecto, cuando en este caso se recurre al uso del clima artificial se consume gran cantidad de recursos del usuario y del estado [2].

De acuerdo a lo anterior se puede apreciar que, en el desarrollo de un proyecto, generalmente no se toma en cuenta los requerimientos físicos del usuario respecto a las condiciones ambientales como: temperatura, humedad, velocidad del aire e iluminación; necesarios para que desarrolle sus funciones metabólicas con un mínimo esfuerzo, y se optimice con esto su productividad en las actividades que realice dentro de la edificación [3]. Puede observarse además que, generalmente, se emplea el mismo tipo de diseño

arquitectónico para la costa y para el altiplano de nuestro país. Por lo tanto la variable que es necesario estudiar a detalle, para este tipo de requerimientos, es el clima del lugar donde se ubicará la edificación, para tomar ventaja de sus características y lograr la condición de comodidad más cercana posible a la ideal en el interior [4].

Un area de investigación de la energía solar es el aprovechamiento de ésta para lograr la optimización del control térmico en el interior de edificios.

En el Laboratorio de Energía Solar (LES) del IIM-UNAM, en el Proyecto de Sistemas Pasivos del Grupo de Transferencia de Energía y Masa, se desarrollaron esfuerzos tendientes a generar conocimiento y tecnología para el diseño térmico de edificios. Ya que no basta con decir, que si se abre una ventana al sur, se captará radiación solar durante el invierno; o que si se abren ventanas a una habitación del lado del viento dominante, el edificio se enfriará. El problema es establecer un balance que nos permita predecir el campo de temperaturas en la habitación y su historia en el tiempo. Para poder lograrlo, se parte de la tecnología desarrollada en aire acondicionado y calefacción de manera artificial. Sólo que los datos usados en estos problemas difieren de los que se tienen en climatización natural, debido básicamente a que en un edificio sin clima artificial, las condiciones de temperatura y humedad del aire, así como su velocidad en el interior, son una respuesta en función del clima; en cambio en un sistema con clima artificial, la temperatura, humedad y velocidad del viento, las controla el equipo para tal fin. Por otro lado, el orden de magnitud del campo de velocidades en ambos sistemas es diferente uno del otro, con el consiguiente efecto en los coeficientes de convección que se emplean para el cálculo [5]. Además, se ha demostrado que para acondicionar un edificio es conveniente tomar en cuenta el almacenamiento de calor en los materiales del mismo cuando se calculan las cargas térmicas [5]. Pero en un edificio con climatización natural, no es posible calcular nada, si no se toma en cuenta el almacenamiento, y su efecto en el tiempo (transitorio) que presentan las condiciones del medio ambiente.

Con base en lo anterior, es necesario que al diseñar un edificio, se tome en cuenta siempre al clima, y que la decisión de poner o no aire acondicionado debe ser una consecuencia del cálculo. El objetivo al diseñar, debe ser obtener un edificio confortable de máxima eficiencia energética. En esta dirección, el edificio más eficiente es el edificio con climatización natural, que emplea cero energía a lo largo del año para este propósito [6].

A partir de la información sobre intensidad y duración de la radiación solar global, directa y difusa, y otros elementos climatológicos locales como: temperatura, humedad y vientos dominantes, se puede diseñar edificaciones con los requerimientos necesarios para resolver problemas de climatización, tales como ventilación, enfriamiento y calentamiento de edificios.

Se ha comprobado que mediante sistemas de climatización pasiva es posible alcanzar condiciones de comodidad térmica para el humano en las edificaciones, evitándose así el empleo de dispositivos que consumen una buena cantidad de energéticos como son el petróleo y la electricidad [7,8], que además de ahorrarlos, al consumirlos en menor cantidad su impacto al ambiente disminuye, motivo este último que es tan importante como el primero. Esto es posible en la mayor parte del territorio nacional, donde la temperatura diaria oscila alrededor de la de comodidad del humano.

Los edificios deben diseñarse de acuerdo al tipo de clima, y disponer los materiales de construcción en forma estratégica en la edificación, en forma armoniosa a los cambios climatológicos que se presentan en la región [9].

Un ejemplo de lo anterior se desarrolló en los edificios que albergan el Laboratorio de Energía Solar situado en Tecmixco, Morelos. El anteproyecto fue elaborado por un grupo de académicos del Instituto de Investigaciones en Materiales, uno de los cuales es el autor del presente trabajo y posteriormente fue llevado a proyecto y edificación bajo la supervisión del Dr. Diego A. Sámano Tirado. Las instalaciones donde se ubica el LES fueron

diseñadas y construidas para operar como un sistema pasivo en un clima cálido semiseco que caracteriza a la región de Temixco, Morelos. El edificio cuenta con 4400 M² de área techada y sistemas que hacen que el interior tenga un clima de comodidad aún en época donde se presenta la mayor temperatura. Otro ejemplo de la aplicación de las técnicas desarrolladas es el edificio de Gobierno del Instituto Nacional de la Salud de la Secretaría de Salud, con 16,000 M² de área construida, el cual fue diseñado por el Arq. Orso Nuñez y el grupo de sistemas pasivos considerando climatización natural. Se simuló en computadora para tomar decisiones cuantitativas sobre el edificio, durante la fase de proyecto [10].

1.1 Descripción del Problema.

Entre los sistemas pasivos con que cuentan los edificios del LES se tienen los sistemas escudo y descarga de calor a la radiación solar, que se ubican en los techos de las oficinas de los investigadores, muros dobles con descarga de calor en la fachada poniente de los edificios, y muros dobles cerrados en las fachadas oriente y poniente del auditorio. Estos sistemas están formados por cavidades en sentido ascendente, las cuales conforman los techos inclinados y muros, con o sin aberturas en la parte superior e inferior de éstos.

Los sistemas mencionados se evaluaron de manera cualitativa al comenzar a funcionar las instalaciones del LES. Durante esta etapa se observó que, en la época cálida, mientras en el exterior del edificio se sentía incomodidad durante el día, en el interior de éste la sensación es de comodidad.

En una segunda etapa se realizó una evaluación de los edificios, midiendo temperatura y humedad del aire exterior e interior, radiación solar incidente, así como las temperaturas de los muros o techos; estas temperaturas han mostrado ventajas significativas respecto a otras construcciones tradicionales, y el costo extra es mínimo, incluso en el caso de los cubículos en los que se empleo vigueta y bovedilla con una disposición

especial, el costo fue menor que empleando losa de concreto [9].

El sistema de techumbre de los cubículos despertó un interés especial para ser estudiado más a detalle, ya que, de todos los sistemas de descarga de calor del LES, es la superficie con mayor tiempo de exposición a la radiación solar, sin embargo en el interior de los cubículos no se aprecia un aumento de la temperatura ambiente.

Con base en lo anterior se hicieron mediciones de temperatura a lo largo de un día (16 de mayo de 1988), en dos lugares de la techumbre de uno de los cubículos, uno en la superficie exterior y otro en la interior por el lado del plafón del cubículo, y se compararon estas temperaturas con la del ambiente durante el mismo día (figura 1.1).

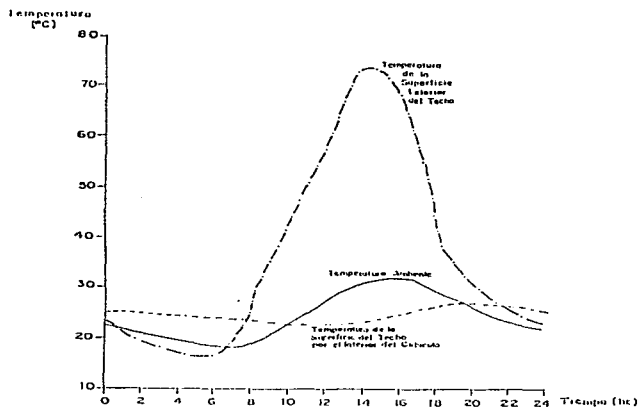


FIGURA 1.1.- COMPARACION DE TEMPERATURAS DEL TECHO DE UNO DE LOS CUBICULOS DEL LES CON LA DEL AMBIENTE DURANTE EL DIA 16 DE MAYO DE 1988.

Con base en los resultados de las mediciones anteriores se observó que existe una diferencia de más de 40 °C entre las superficies exterior e interior de la techumbre, alrededor de las 14:00 horas; ya que en la superficie exterior la temperatura máxima es de 75 °C a dicha hora, mientras en la superficie interior la temperatura máxima es de 28 °C, 6 horas después. Por otra parte, la temperatura del plafón oscila durante el día cercana a la del ambiente. Durante la madrugada la temperatura en la superficie exterior está por abajo de la del ambiente mientras que la del plafón está por arriba de la del ambiente y, en las horas con mayor calor, la temperatura del plafón permanece por abajo de la del ambiente y tiende a incrementarse ligeramente al final del día. Con base en estos resultados se le denominó al sistema "Techo Escudo" a la radiación solar, ya que no es apreciable la transmisión de calor provocada por el sol, hacia el interior del cubículo.

Lo anterior llevó a pensar que el aire en el interior del ducto, que es calentado por la radiación solar recibida en la placa superior del mismo durante el día, tiende a salir por flotación natural por la parte superior del ducto, y que la transmisión de calor por convección es mínima; esto se puede probar haciendo un balance de energía en el sistema para calcular como se dá la transmisión de calor en el mismo.

El problema para el cálculo de estos dispositivos, es que no existen reportados coeficientes de convección, ni del papel que ésta juega en el transporte de calor, ya que las cavidades están formadas por muros cuya capacidad de almacenar calor es importante [11,12].

A partir del marco de referencia anterior, se propuso desarrollar un estudio a detalle del "Techo Escudo" por medio del cual se pudieran obtener los coeficientes de convección y las recomendaciones de diseño en este tipo de techumbres. Para lograr lo anterior se plantearon objetivos e hipótesis de trabajo que se presentan en el capítulo 3 de la tesis.

El estudio se inició desarrollando un planteamiento analítico simplificado del problema, en donde se idealiza el sistema, proponiéndolo

formado por dos placas planas paralelas inclinadas, con circulación de aire entre ellas. El desarrollo y los resultados de este planteamiento se presentan en el capítulo 4 de la tesis.

Paralelamente a lo anterior se realizó un estudio experimental, utilizando como prototipo el techo de uno de los cubículos del LES, el cual se instrumentó instalándole sensores de temperatura en diversos lugares; esta información se complementó con datos meteorológicos de radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad y dirección del viento. Los datos se estuvieron recabando durante dos años y medio y se seleccionó parte de estos para analizar a detalle. El análisis y los resultados de este estudio se presentan en los capítulos 5 y 6 de la tesis; en este último se planteó también la comparación de los resultados del estudio experimental con los del planteamiento analítico del problema.

Finalmente las conclusiones del estudio se presentan en el capítulo 7 de la tesis incluyendo el proceso de cálculo de los coeficientes de convección del prototipo estudiado y las recomendaciones de diseño para este tipo de techumbres.

En el capítulo siguiente (capítulo 2) se hace un análisis de los estudios relacionados con los fenómenos de transferencia de calor y mecánica de fluidos en la cavidad llena de aire, así como en las placas de aglomerados pétreos que forman el techo.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES.

De la investigación efectuada directamente en bibliotecas hasta el momento, se han encontrado referencias de aplicaciones de Energía Solar en edificios dirigidas al calentamiento de los mismos, debido a que la gran mayoría provienen de lugares situados en otras latitudes; en estas referencias se presenta generalmente el uso de las techumbres para soportar dispositivos solares conteniendo algún fluido que, después de ser calentado por la radiación solar, se distribuye de alguna manera en la habitación transfiriéndole el calor captado.

Los antecedentes que se tienen del problema analizado en la presente tesis, son de los sistemas de aislamiento a las condiciones del medio ambiente practicados en la Arquitectura Vernácula en nuestro país, a través de los aticos ventilados en donde generalmente se emplea como plafón una manta de cielo que está separada del techo formando el espacio ventilado. Los techos que se rellenaban con terrado constituyen otro ejemplo de sistemas de aislamiento al medio ambiente; en este caso se empleaba una capa de tierra sobre el techo del edificio para retardar el paso de calor por conducción al interior del mismo; ambos sistemas proporcionan un adecuado aislamiento a las condiciones del medio ambiente en clima cálido, sin embargo no se tienen referencias de que se hayan efectuado estudios en donde se les analice cuantitativamente.

Por otra parte, se consultaron bancos de información con referencias de artículos publicados en todo el mundo, y se encontraron 13 referencias de estudios sobre techumbres en los cuales se analizan, teórica o experimentalmente, dispositivos para que de alguna manera se obtenga un aislamiento a las condiciones del medio ambiente. Estos trabajos se presentan a continuación agrupados de acuerdo al tema específico que trata cada uno de

ellos.

2.1.- Transferencia de Calor en Techos Huecos de Concreto.

Sodha, M.S.; Singh, U.; Kumar, A.; Tiwari, G.N.; presentan un estudio teórico del efecto de una hoja de metal en la parte media del hueco formado en una losa de concreto aligerada, una cara de la losa esta expuesta a la radiación solar y al aire ambiente y la otra está en contacto con el aire de la habitación a una temperatura constante. Se obtiene la distribución óptima de espesores de concreto en el lado interior y el exterior para una nivelación máxima de la carga térmica; se ha visto que esto se logra cuando el espesor de la cara exterior del concreto es tan pequeña como sea posible. Estos resultados han sido comparados también con los resultados correspondientes en losas de concreto de hueco sencillo y doble hueco. [13].

Sodha, M.S.; Kumar, A.; Srivastava, A.; Tiwari, G.N.; presentan un estudio teórico, derivando una expresión explícita de la variación periódica del flujo térmico a través de un techo multicapa hueco aislado, el cual tiene una cara expuesta a la radiación solar y aire ambiente y la otra está en contacto con el aire de la habitación a temperatura constante. Para obtener la colocación óptima de aislamiento y espaciamiento, se hizo el cálculo numérico del flujo de calor a través del techo multicapa hueco aislado, para un día caluroso típico (26 de mayo de 1978) en Delhi. Aquí se ve que para un espesor total dado de concreto, se almacena la mejor nivelación de carga térmica, cuando la capa exterior sea tan pequeña como sea posible. Se discute también el efecto de una película de agua en flujo caliente dentro del edificio. [14].

Sodha, M.S.; Srivastava, A.; Tiwari, G.N.; presentan una investigación teórica de la transferencia de calor periódica a través de un bloque de concreto con doble hueco, una de las caras está expuesta a la radiación solar y aire de la atmósfera mientras que la otra está en contacto con el aire del cuarto a temperatura constante. Aquí se ve que la máxima carga nivelada ocurre cuando el espesor de los dos espacios son iguales (5 cm); se obtiene

también para parámetros típicos una diferencia de 12 hrs. entre el máximo y el mínimo flujo térmico y temperatura solar. [15].

Sodha, M.S.; Singh, U.; Kumar, A.; Tiwari, G.N.; presentan el estudio del efecto en el desempeño térmico de techos y muros con un hueco sencillo, un doble hueco y un hueco aislado, al colocarse una hoja reflectora en el espacio de aire intermedio. Una cara de los techos o muros esta expuesta a la radiación solar y al aire ambiente y la otra está en contacto con el aire del cuarto a temperatura constante. Estos resultados se comparan también con las predicciones hechas en el caso de cuando una película de agua se mantiene en el techo o muro. Aquí se ve que el uso de una hoja reflectora en techos y muros con hueco sencillo y doble hueco es más económica -y proporciona un mejor funcionamiento- que el sistema de película de agua. [16].

2.1.1.- Transferencia de Calor en Modelos de Prueba para Techos.

Rudd, A.; presenta un estudio experimental en un techo diseñado, construido y operado en el Centro de Energía Solar de Florida. Se le ha llamado "La Prueba de Facilidad Diurna", y fue diseñado para obtener información la cual pueda ser usada para verificación y perfeccionamiento del modelo analítico para el concepto de mejorador de desecación de frío radiante (DESRAD). Los efectos del potencial de calor solar y enfriamiento nocturno, se simulan en un ambiente interior controlado y se toman mediciones a lo largo y entre las superficies límite. El aire liberado a la sección de prueba se controla para tolerancias cerradas en temperatura, humedad y porcentaje de flujo. Pueden simularse condiciones de estado permanente, cambios por etapas, cambios funcionales o condiciones climáticas reales. Se tomaron mediciones exactas por dentro y por fuera de la sección de prueba para determinar la cantidad de transferencia de calor y masa a través del sistema. El sistema "Facilidad" esta controlado completamente por computadora. El software que lo controla emplea una metodología de control de autoafinación proporcional-integrada, la descripción de ambos conceptos y el "Facilidad" se presentan a lo largo del trabajo con datos de verificación en el modelo. [17].

Bauman, F.S.; Place, J.W.; Anderson, B.; Thornton, J.; Howard, T.C.; presentan un estudio experimental de las mediciones de iluminación y radiación solar hechas en un modelo a escala de edificio que contiene un techo inclinado formado por un doble panel de vidrio de cara al sur. Para controlar deslumbramientos y propiedades de dispersión de la luz solar directa sobre el plano de trabajo, se usa un buen vidrio difusor para el panel exterior de la apertura del techo. Las mediciones fueron hechas con objeto de investigar el funcionamiento de este sistema de luz diurna bajo condiciones de cielo claro en respuesta a cambios en una variedad de opciones de diseño interior. Los resultados indicaron que con áreas de vidrio modestas el sistema de apertura del techo provee una iluminación en el plano de trabajo que es más adecuada en cantidad y uniformidad. Se describen en este artículo la facilidad del experimento exterior y el edificio modelado a escala. Se presentan y discuten los resultados del experimento en el modelo a escala. [18].

Chen, Chiou-Horng; Krokosky, E.M.; presentan una técnica de elemento finito para calcular tanto en estado permanente periódico como en estado transitorio la transmisión de calor, a través de techos o muros de edificios con una o varias cubiertas, debida a la radiación solar para cualquier localidad en los Estados Unidos. La radiación solar, distribución de temperatura en los materiales y la transmisión de calor a través de las cubiertas se han comparado con otros métodos de computación y con el campo de resultados, y se ha observado que existe compatibilidad entre estos. [19].

2.1.2.- Techos con Dispositivos Integrados para Control de la Transferencia de Calor.

Spena, A.; presenta una simulación de la respuesta térmica de un edificio para deportes usando dispositivos de energía solar activa y pasiva. Se propone un colector de aire en el techo, el cual se integra con un sistema de colectores solares planos para agua. Los resultados se presentan en términos de las tendencias de temperatura del aire interno. [20].

Givoni, B.; describe un sistema que llama el Techo Trampa de Radiación, el cual utiliza la energía solar para calentar el edificio en invierno y la radiación nocturna para enfriarlo en verano, la trampa de radiación consiste en una capa de aislamiento fija separada del techo plano y vidriado, protegido por un panel altamente aislado, en el espacio sur entre el techo y el aislamiento fijo. Esta capa de aislamiento fija está cubierta por hojas metálicas corrugadas, pintadas de blanco, las cuales sirven como radiadores nocturnos en verano. La trampa de radiación está integrada con el edificio, tanto termica como arquitectónicamente. En el invierno la energía solar penetra a través del vidrio y es absorbida directamente en el techo, el cual sirve como un colector combinado, como almacén de calor para una noche y como sistema de distribución de calor, en verano la penetración de la radiación solar durante el día se previene por el panel altamente aislado. [21].

2.2.- Techos con Manejo de Agua para controlar la Transferencia de Calor.

Chen, Bing; Kasher, John; Maloney, John; Gunther, Raymond; Sloup, Charles; Hopkins, Brian; Kratochvil, Jay; Bourne, Richard C.; presentan un revestimiento aislante, hecho por Dow Chemical para aplicaciones en techos, que flota sobre un estanque por sí mismo. En la noche, durante el verano, una bomba sumergida en el estanque mueve el agua sobre el techo. Por el doble proceso de evaporación y radiación por el cielo nocturno, el agua se enfría. Esta agua fría emigra entonces por inclinación al estanque, a través de las hendiduras del aislamiento flotante. Durante el invierno, el agua del estanque del techo se calienta empleando un sistema de calentamiento solar pasivo de termosifón. [22].

Sodha, M.S.; Govind; Bansal, F.K.; Kaushik, S.C.; presentan una investigación de la reducción del flujo de calor por el flujo de agua sobre un techo aislado; la superficie de agua está expuesta a la radiación solar periódica y aire atmosférico, mientras que la superficie inferior del techo está en contacto con el aire del cuarto a temperatura constante (correspondiente a las condiciones del aire del edificio). La ecuación de

conducción de calor característica de la distribución de temperatura en el techo aislado, se ha resuelto usando las condiciones límite periódicas apropiadas. [23].

2.3.- Techos Huecos Ventilados como Escudo a la Radiación Solar.

Permiakov, S.I.; Mazhevnikov, B.S.; Tabunshchikov, Y.A.; presentan edificios con grandes áreas de techo, tal como los edificios industriales, expuestos a una radiación solar intensa en las regiones cálidas del Asia Central. Se dan las fórmulas para el cálculo de las fluctuaciones de temperatura debidas a la transferencia de calor a través de la estructura, la radiación solar a través de ventanas y los efectos de la ventilación. Los experimentos con agua fría en los techos de fabricas textiles en la región de Tashkent han mostrado varios problemas, pero han sido más efectivos en controlar el sobrecalentamiento que la alternativa de techos ventilados. Las fórmulas se han desarrollado para calcular las fluctuaciones de calor que entra, tanto a través de los techos ventilados como de los que están rellenos de agua. [24].

Shih, Jason C.; Fairrey, Philip W.; presentan un estudio experimental sobre muros ventilados y techos de "casa-fría" que consisten en interponer cubiertas adicionales de muros o techos entre la envolvente tradicional del edificio y el medio ambiente exterior. La nueva cubierta esta separada de la envolvente del edificio por un espacio de aire el cual usualmente se ventila al aire del medio ambiente. El objetivo primario de esta construcción es eliminar o reducir drásticamente los efectos de la carga térmica solar en la envolvente del edificio. Se presentan recomendaciones para aplicar en nuevos edificios y reajustar estructuras existentes. [25].

Aguirre, J.; Sámano, D.A.; Morales, J.D.; Alvarez, G.S.; Vazquez, B.; presentan un estudio experimental y teórico de la cavidad formada por los huecos de las bovedillas con las que están construidos los techos de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar, en este sistema la placa superior del techo está en contacto con la radiación solar periódica y el aire del

medio ambiente, y la placa inferior que forma el plafón esta en contacto con el aire del interior del cubículo; el sistema está ventilado como un medio de descargar el calor que recibe por medio de la radiación solar la placa superior del techo. Se presentan las ecuaciones del cálculo del flujo de calor, un estudio numérico para determinar la temperatura y velocidad del aire en el interior del ducto, gráficas y tablas de las temperaturas medidas en distintos puntos del sistema, así como el diseño de un modelo de prueba para realizar mediciones del flujo de aire en el ducto en condiciones controladas de laboratorio. [26].

Sámamo, D.A.; Alvarez, G.S.; Vazquez, B.; Morales, J.D.; presentan un estudio, experimental y teórico, del flujo de aire dentro de la cavidad formada por las bovedillas con las que están contruidos los techos de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar en Temixco, Morelos; esta cavidad se mantiene ventilada para descargar el calor que recibe la placa superior del techo debido a la radiación solar. Se presentan los resultados del planteamiento analítico, tablas y gráficas de las mediciones efectuadas en el prototipo así como datos meteorológicos de temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa del lugar donde se desarrollo el estudio. [27].

2.4.- Trabajos Directamente Relacionados con el Estudio.

De acuerdo a la relación anterior, se observa que de todos los trabajos, únicamente los últimos cinco están relacionados directamente con el tema tratado en la presente tesis, Shih, Janson y Fairey, Philip [24], presentan recomendaciones de diseño para aplicar en edificios nuevos o ajustar en estructuras existentes, una cubierta ventilada que reduzca los efectos de la carga térmica solar en la envolvente de un edificio, pero no incluye un planteamiento analítico encaminado a la solución de la convección natural en la cavidad que forma la cubierta propuesta con la envolvente del edificio.

Permiakov, S.I.; Mazhevnikov, B.S.; y Tabunshchikov, Y.A. [25], presentan las fórmulas que desarrollaron para calcular las fluctuaciones de calor que entra a través de grandes cubiertas para edificios industriales, en zonas cálidas, comparando las cubiertas que se solucionan por medio de ventilación con las que se rellenan con agua; en este caso se trata exclusivamente el problema de la transferencia de calor, sin tener tampoco un planteamiento encaminado a la solución de la convección natural para las cubiertas ventiladas.

Los restantes dos trabajos [26,27], presentan el planteamiento analítico y los datos recabados en el estudio experimental, del techo de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar del IIM-UNAM en Temixco, Morelos, la techumbre se colocó inclinada respecto a la horizontal y está construida a base de vigueta y bovedilla, el sistema se mantiene ventilado por aberturas en el extremo inferior y superior del techo. Estos trabajos están encaminados a obtener los coeficientes de convección natural en la cavidad, sin llegar a plantear su solución. El autor del presente trabajo es coautor en ambos reportes. [26,27].

2.5.- Conclusiones de la Revisión Bibliográfica.

i).- El problema conjugado del flujo de aire en la cavidad ventilada que forma el "Techo Escudo" no ha sido resuelta, ni tampoco el de la convección natural en la misma cavidad que se calienta y enfría, de manera alternada en el tiempo.

ii).- No existen datos validados del coeficiente de convección natural que se presenta en la cavidad que se estudia, tampoco de los campos de velocidad de aire en la misma. Existen sin embargo, en el régimen de capa límite, datos analíticos de la convección natural en canales planos inclinados que Sámano [26,27] propuso como representativos de la pared inclinada en una cavidad y que es necesario corroborar experimentalmente.

iii).- Es necesario resolver el problema conjugado completo, de conducción de calor en estado transitorio en el sólido, acoplado con la convección natural dentro de la cavidad. Los datos mencionados en ii) pueden servir para validar una solución numérica.

iv).- No existen recomendaciones para el diseñador de techos, ni herramientas que le permitan calcular los beneficios que obtendrá de estos.

CAPITULO 3

OBJETIVO E HIPOTESIS DE TRABAJO EN EL MODELO SIMPLIFICADO

Objetivo general:

El objetivo general de este estudio es conocer el comportamiento de los sistemas de descarga de calor mencionados, por medio del análisis experimental y teórico del problema. Este estudio incluirá variación de parámetros geométricos y de frontera. Así se contribuirá con información para el diseño de los techos "escudo" de las construcciones en la República Mexicana, empleando los materiales y mano de obra disponibles en el mercado local.

Objetivo particular.

Obtener recomendaciones de diseño, que permitan dimensionar sistemas de techo escudo a la radiación solar, y coeficientes para el cálculo de convección de calor para rangos de variación climatológica existentes en la República Mexicana.

Hipótesis de trabajo en el modelo simplificado (análisis teórico):

- i) El flujo de calor en el sistema es en estado permanente.
- ii) El flujo de calor por conducción en el sólido es unidimensional.
- iii) Junto a la pared superior se desarrolla un flujo por convección natural en régimen de capa límite.

iv) El intercambio de calor por radiación infrarroja más convección puede ser representado de una manera lineal con la diferencia de temperaturas.

Hipótesis de trabajo en el prototipo (análisis experimental)

i) El flujo de calor en el sistema es en estado transitorio.

ii) El flujo de calor por conducción en el sólido es tridimensional.

iii) Junto a la pared superior se desarrolla un flujo por convección natural en regimen de capa limite.

iv) El intercambio de calor por radiación infrarroja más convección puede ser representado de una manera lineal con la diferencia de temperaturas.

CAPITULO 4

ESTUDIO TEORICO DEL PROBLEMA.

En el presente capítulo se desarrolla primero un planteamiento analítico del problema, donde se muestran las ecuaciones que rigen el flujo y los parámetros adimensionales representativas del fenómeno así como las ecuaciones para la radiación solar y la temperatura ambiente. En la segunda parte del capítulo se propone una simplificación del modelo por medio de la cual se obtiene una primera solución al problema, se desarrollan las ecuaciones para obtener las temperaturas a lo largo del canal; en la superficie exterior de la placa superior, en la superficie interior de la misma placa y en la capa límite donde se desarrolla el flujo de aire por convección natural. Al final del capítulo se grafican los resultados de este análisis.

4.1 Planteamiento Analítico del Problema.

El problema en estudio consiste en un túnel lleno de aire formado por dos placas planas, las cuales componen la pared o techo escudo; el sistema, por un lado tiene interacción con el clima del medio ambiente y por el otro está en contacto con el aire del cuarto (Figura 4.1).

La cavidad formada entre las placas, con fines de estudio, se puede definir como bidimensional, y tiene forma rectangular. La dirección de la gravedad forma un ángulo θ con respecto a la línea perpendicular a la placa plana.

Las dimensiones de la cavidad son H en el sentido perpendicular y L en el sentido longitudinal. Se escogió el sistema coordenado x - y mostrado en la figura 4.1.

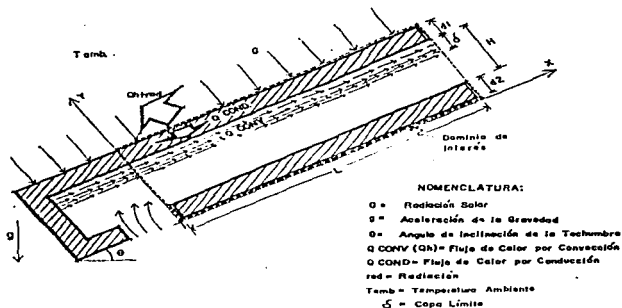


FIGURA 4.1.- ESQUEMA DEL CANAL FORMADO POR UN TECTO ESCUDO.

En una primera etapa de la investigación el flujo de aire en la cavidad, que se obtiene como producto de la flotación, se considera en régimen laminar y en estado permanente.

Por el lado de la cavidad, la placa superior intercambia calor con el aire de ésta. Por el lado superior de dicha placa, se da la interacción con el medio ambiente, que consiste en: i) flujo de calor por convección con el aire exterior cuya temperatura fluctúa de manera periódica, ii) flujo de calor por radiación solar, cuya intensidad tiene una variación periódica (en ambos casos el periodo es un día), y iii) intercambio de calor con el medio ambiente, debido a la radiación de onda larga emitida por la superficie exterior y el medio ambiente. Sin embargo en esta primera etapa de la investigación, se consideraron las condiciones exteriores de un momento dado (estado permanente).

ECUACIONES QUE RIGEN EL FLUJO.

El dominio bajo estudio para la convección natural es el espacio bidimensional x-y delimitado por $0 \leq x \leq L$, y por $0 \leq y \leq H$, con dos regiones

de propiedades termofísicas diferentes. Una de ellas es el fluido, el cual se considera como newtoniano con la aproximación de Boussinesq. La otra es la región del sólido, en la cual se consideran las propiedades termofísicas constantes. En este espacio conjugado se plantea que $u(x,y)$, $v(x,y)$, $p(x,y)$ y $T(x,y)$ representen los campos de velocidades, presión y temperatura respectivamente, en el dominio.

REGION DEL FLUIDO.

Las ecuaciones de conservación en esta región para un flujo laminar en estado permanente con la aproximación de Boussinesq son:

Continuidad:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Cantidad de Movimiento:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v + g\beta (T-T_0)$$

Energía:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{K}{\rho C_p} \nabla^2 T$$

Donde ρ, μ, β, K , y C_p , son la densidad, viscosidad, coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica y calor específico en el fluido. g es la constante de la aceleración de la gravedad, y T_0 la temperatura de referencia. ∇^2 es el Laplaciano en las dos dimensiones.

Las condiciones de frontera que impone el clima sobre la superficie exterior de la placa superior, se expresan:

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial x} = G(t)\alpha + h_{\infty} (T_{\infty}(t) - T) - \sigma \epsilon [T'^4 - T'^{\infty}(t)^4]$$

Donde $G(t)$ es la radiación solar, α la absorptancia de la superficie exterior, h_{∞} el coeficiente de convección exterior, σ la constante de Stefan-Boltzman, ϵ la emitancia de la pared, T_{∞} la temperatura en el aire exterior y T' y T'^{∞} las temperaturas absolutas en el sólido y el aire respectivamente.

ECUACIONES Y PARAMETROS ADIMENSIONALES.

Para obtener los parámetros adimensionales representativos en el problema, se proponen las siguientes expresiones para las variables de normalización. v/L es la velocidad representativa, L , la distancia característica. $\rho v^2/L^2$, es una presión representativa. y ΔT , el cambio representativo de la temperatura, que es el doble de la amplitud de la oscilación de la temperatura en el aire exterior ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$).

VARIABLES ADIMENSIONALES.

En el presente estudio se proponen las siguientes variables adimensionales, que se piensa son las representativas del fenómeno:

$$U = \frac{u}{v} \quad V = \frac{v}{v} \quad X = \frac{x}{L} \quad Y = \frac{y}{L} \quad \theta = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad P = p \frac{1}{\rho \left(\frac{v}{L} \right)^2}$$

Sustituyendo en las ecuaciones el valor de las variables respectivas, se obtienen las ecuaciones adimensionales que se presentan a continuación:

REGION DEL FLUIDO:

Continuidad:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

Cantidad de Movimiento:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \nabla^2 U$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \nabla^2 V + Gr (\theta - \theta_0)$$

Energía:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \theta$$

GRUPOS ADIMENSIONALES:

Los grupos adimensionales que resultan de la adimensionalización de las ecuaciones son:

Número de Grashof

$$Gr = \frac{g \Delta T \beta L^3}{\nu^2}$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

Número de Fourier

$$Fo = \frac{K_s}{\rho_s C_s \omega d^2}$$

Número de Rayleigh

$$Ra = Gr Pr$$

Parámetros adimensionales de Geometría

Razón de Aspecto de la Cavidad = H/L

Relación Geométrica de la Pared = d/L

ECUACIONES PARA LA RADIACION Y TEMPERATURA:

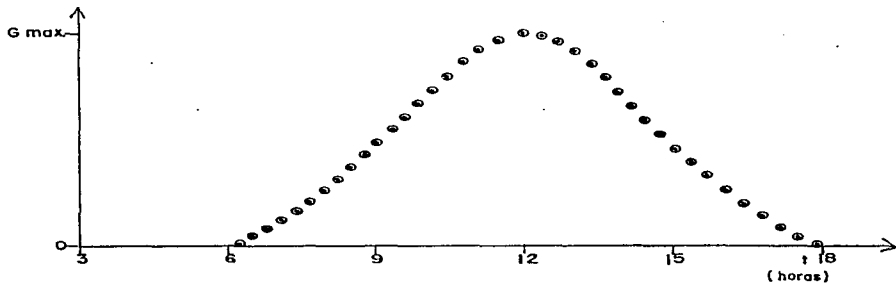


FIGURA 4.2.- RADIACION SOLAR INCIDENTE SOBRE EL TECHO.

La variación de la radiación solar que incide sobre la superficie del techo está representada en la Figura.4.2 y se puede escribir:

$$G(t) = G \text{ máx } f(t)$$

donde $G_{\text{máx}}$ es el valor máximo de la radiación solar que incide sobre el techo, y $f(t)$ es una función del tiempo que depende de las horas de insolación y se calcula con las expresiones siguientes:

$$f(t) = \begin{cases} \text{Sen}^{1.2} \left(\pi \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right) & \text{para } t_1 \leq t \leq t_2 \\ 0 & \text{para } 0 \leq t \leq t_r \text{ y } t_2 \leq t \leq \tau \end{cases}$$

donde t_1 y t_2 son los tiempos correspondientes al amanecer y el ocaso, que en el presente trabajo se tomaron a las 6 y a las 18 horas respectivamente. Con las ecuaciones anteriores se calcula el valor correspondiente al instante en que se estudia el sistema de escudo a la radiación solar.

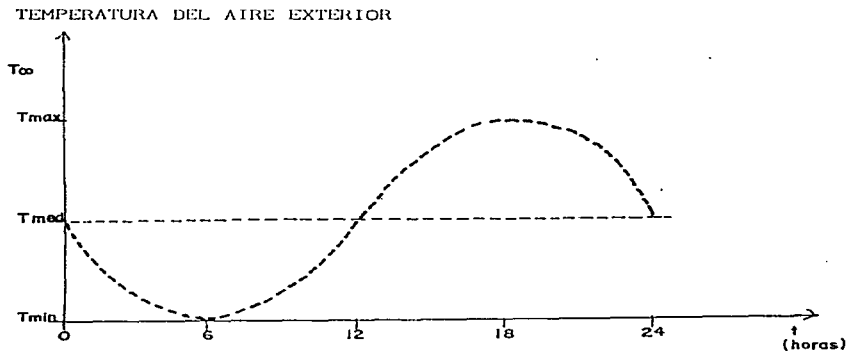


FIGURA 4.3. - TEMPERATURA DEL AIRE EXTERIOR.

La variación de la temperatura en el aire exterior se muestra en la figura 3 y se calcula con la expresión:

$$T_{oo}(t) = T_m + A \text{ sen } (\omega t - \pi)$$

donde los valores de T_m , A y ω se calculan por medio de las expresiones:

$$T_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

$$A = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}$$

donde τ es el periodo, T_{\max} y T_{\min} son las temperaturas máximas y mínimas en el aire exterior. Al igual que la radiación solar, las ecuaciones anteriores permiten calcular el valor de la temperatura correspondiente al instante de estudio.

En la siguiente sección se hará una simplificación del modelo, que permite una primera solución.

4.2 Planteamiento Simplificado del Problema.

Con objeto de poder establecer un planteamiento simplificado del problema, se propone considerar al sistema formado por dos placas planas paralelas inclinadas, con circulación de aire entre ellas (Figura 4.4).

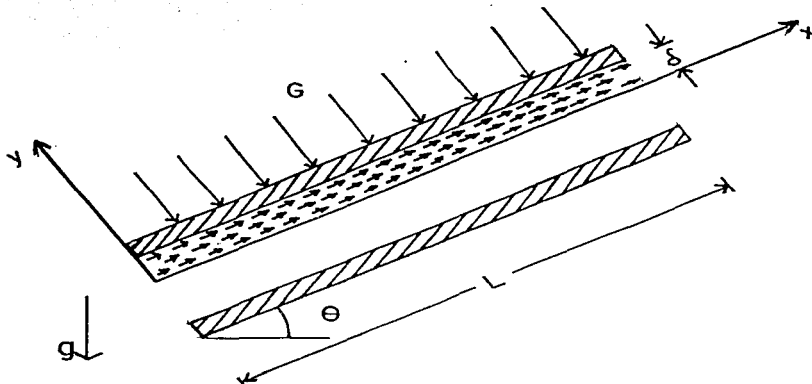


FIGURA 4.4.- MODELO DE "TECHO ESCUDO" SIMPLIFICADO.

Para el desarrollo analítico del modelo propuesto (Figura.4.4) se proponen las siguientes consideraciones:

- 1) Estado permanente.
- 2) Se simplifica el modelo a dos placas paralelas inclinadas.
- 3) Las placas tienen resistencia térmica (c/k).

4) La superficie externa de la placa superior con absorptancia $\alpha = 0.9$ (a la radiación global) recibe radiación solar con un flujo por unidad de área G .

5) De esta superficie externa, parte del calor es regresado a la atmósfera por convección más radiación; el resto se transmite hacia el interior del sistema.

6) El calentamiento del fluido por la placa superior, se lleva a cabo por convección natural debida a la flotación, y sólo se mueve una película delgada de fluido, el resto del aire se mantiene a la temperatura ambiente.

Con base en las consideraciones anteriores y de la figura 4.4 podemos entonces tomar como volumen de control de interés para la convección natural la región del fluido cuyo comportamiento se supone en régimen de capa límite:

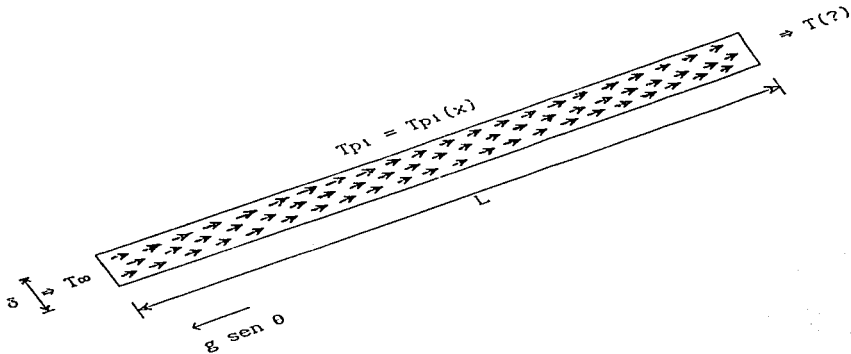
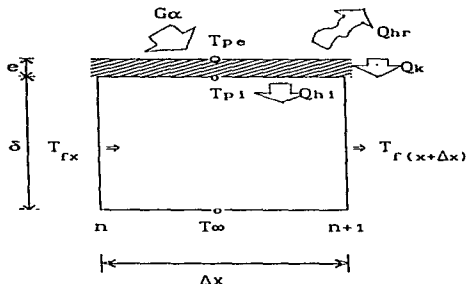


FIGURA 4.5. - VOLUMEN DE CONTROL

Tomando una fracción diferencial del volumen de control propuesto se puede establecer el siguiente balance de calor:



DONDE:

- $G\alpha$ = Radiación solar absorbida por la placa.
- Q_{hr} = Calor que el exterior de la placa cede al medio ambiente por convección.
- Q_k = Calor que se transmite al interior de la placa por conducción.
- Q_{hi} = Calor que la cara interior transmite al aire en contacto.
- T_{pe} = Temperatura de la placa en la cara exterior.
- T_{pi} = Temperatura de la placa en la cara interior.
- T_{rx} = Temperatura del fluido en la posición x .
- T_{∞} = Temperatura ambiente.

FIGURA 4.6.- SECCION DIFERENCIAL DEL VOLUMEN DE CONTROL

La ecuación para establecer el balance de calor queda entonces de la siguiente manera:

1) Balance de calor en la frontera exterior:

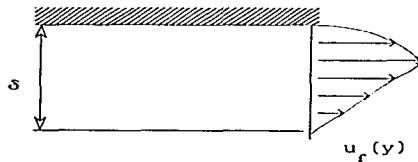
$$\underbrace{G \alpha b \Delta x}_{Q_{Sol}} = \underbrace{h_r b \Delta x (T_{pe} - T_{\infty})}_{Q_{hr}} + \underbrace{\frac{k}{e} b \Delta x (T_{pe} - T_{pi})}_{Q_k} \dots \dots \dots (1)$$

donde b corresponde al ancho del sistema de techo; e es el espesor de la placa y K la conductividad térmica.

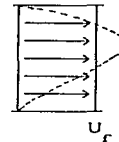
ii) Balance de calor en la superficie interior:

$$\underbrace{h_i b \Delta x (T_{pi} - T_{fx})}_{Q_{hi}} = \underbrace{\frac{K}{e} b \Delta x (T_{pe} - T_{pi})}_{Q_k} \dots \dots \dots (2)$$

iii) Para establecer el balance de calor en la región del fluido se plantea que idealmente existe una velocidad uniforme (U_r) que proporciona el mismo gasto volumétrico que en el caso real donde la velocidad del aire u_r varía con y .



Variación de la velocidad del aire considerándolo en régimen de capa límite.



Promedio propuesto para la velocidad del fluido.

FIGURA 4.7.- VELOCIDAD MEDIA DEL FLUIDO

Entonces, el balance de calor en el volumen de control discretizado del fluido queda de la siguiente manera:

$$\rho U_r \delta b c_p (T_{f_{x+\Delta x}} - T_{f_x}) = h_i b \Delta x (T_{p1} - T_{f_x})$$

tomando límite $\Delta x \rightarrow 0$

$$\rho U_r \delta c_p \frac{dT_f}{dx} = h_i (T_{p1} - T_{f_x}) \quad (3)$$

Despejando T_{p1} de (1) se tiene:

$$T_{p1} = \frac{\frac{G\alpha}{hr} + T_{\infty}}{Bi_r + 1} + \frac{T_{p1}}{Bi_r + 1} \quad (4)$$

y sustituyendo en (2) se obtiene:

$$T_{p1} = \frac{\left(\frac{G\alpha}{hr} + T_{\infty}\right) Bi_r}{Bi_1 Bi_r + Bi_1 + Bi_r} + \frac{Bi_1 (Bi_r + 1)}{Bi_1 Bi_r + Bi_1 + Bi_r} T_f \quad (5)$$

donde, los números adimensionales de Biot, se expresan como,

$$Bi_1 = \frac{e h_i}{K}$$

$$Bi_r = \frac{e h_r}{K}$$

Sustituyendo T_{p1} en 3, se tiene:

$$\frac{d T_f}{dx} + B T_f = A$$

donde A y B se escriben,

$$A = \frac{\left(\frac{G\alpha}{hr} + T_{\infty}\right) Bi_r}{Bi_1 Bi_r + Bi_1 + Bi_r} \frac{hi}{\rho U \delta cp}$$

$$B = \frac{Bi_r}{Bi_1 Bi_r + Bi_1 + Bi_r} \frac{hi}{\rho U \delta cp}$$

La ecuación diferencial anterior, tiene las siguientes condiciones a la frontera,

$$\text{cuando } x = 0 \quad Tr = T_{\infty}$$

$$\text{cuando } x \rightarrow \infty \quad Tr - \text{debe tener un valor finito}$$

En las ecuaciones 3 y 2, se observa que cuando la temperatura en el aire dentro del canal no cambia, $Tr = T_{pl} = T_{pe}$. La solución de la ecuación diferencial con las condiciones a la frontera señaladas es,

$$Tr = T_{\infty} + \frac{G\alpha}{hr} (1 - e^{-Bx}) \quad (6)$$

De esta manera, con las expresiones 4, 5 y 6, se calculan las temperaturas de la cara exterior e interior de la placa, y del aire en la capa límite respectivamente.

La temperatura del aire en la capa límite, en una región muy alejada del inicio ($x = \infty$) es,

$$(Tr)_{x=\infty} = \frac{G\alpha}{hr} + T_{\infty}$$

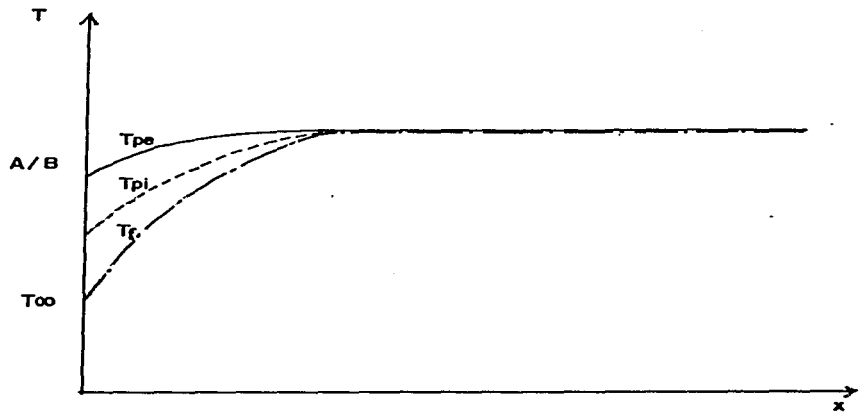


FIGURA 4.8.- TENDENCIA QUE PRESENTARAN LAS VARIACIONES DE LAS TEMPERATURAS DE T_r , T_{pi} y T_{pe} EN LA CAVIDAD.

2a. Ley de Newton (Balance de cantidad de movimiento).

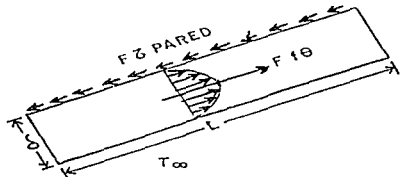


FIGURA 4.9.- BALANCE DE FUERZAS.

De acuerdo con la 2ª Ley de Newton, la fuerza de flotación se balancea con la fuerza de rozamiento, cuando se obtiene el estado permanente. Entonces:

$$\Sigma F = 0 = F_r - Fr_0 \quad (7)$$

donde, F_r es la fuerza de rozamiento y Fr_0 es la fuerza de flotación en la dirección longitudinal de la placa.

La fuerza de flotación se expresa como:

$$Fr_0 = L \delta b \rho_\infty g \operatorname{sen} \theta - \int_0^L \delta b \rho(x) g \operatorname{sen} \theta \, dx$$

donde, $\rho(x)$ es la densidad en el aire de la capa límite, y su valor se expresa como función de la temperatura como sigue:

$$\rho(x) = \rho_\infty [1 - \beta (Tr(x) - T_\infty)]$$

entonces

$$Fr_0 = \delta b g \operatorname{sen} \theta \beta \int_0^L (Tr(x) - T_\infty) \, dx$$

Sustituyendo el valor de Tr , de la ecuación 6 e integrando, se tiene

$$Fr_0 = \delta b g \operatorname{sen} \theta \beta \frac{G\alpha}{hr} \left[L + \frac{1}{B} (e^{-BL} - 1) \right] \quad (8)$$

La fuerza de rozamiento, es

$$F_r = b L f \frac{\rho U_c^2}{2}$$

donde f es el factor de rozamiento que se estima con la figura 4.5 en la página 63 de Rohsenob y Choi [28], y para este caso:

$$f = \frac{23.88}{Re}$$

donde el número de Reynolds (Re) se expresa

$$Re = \frac{\rho U_r D_h}{\mu}$$

D_h es el diámetro hidráulico (= 4δ) y μ es la viscosidad dinámica del aire, entonces:

$$Fr = 2.985 \frac{b L \mu}{\delta} U_r \quad (9)$$

Sustituyendo los valores de (8) y (9) en (7), se tiene la ecuación para calcular el valor de U_r

$$U_r = \frac{\delta^2}{2.985} \frac{g \sin \theta \beta}{L \mu} \frac{G\alpha}{hr} \left[L - \frac{1}{B} (e^{-BL} - 1) \right] \quad (10)$$

El valor del espesor de la capa límite, se calcula con lo propuesto por Sámano para la solución de capa límite con flotación de "Batchelor" [29].

$$\delta = \frac{L \sin \theta}{\sqrt[4]{Ra}}$$

donde Ra es el número de Rayleigh

Caso real o típico

A continuación se analiza un caso típico para lo cual se escogió el

siguiente grupo de valores:

$$G = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$\rho = 1.295 \text{ Kg/m}$$

$$\alpha = 0.9$$

$$c_p = 1.0065 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$h_r = 17 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad [29]$$

$$K_{aire} = 0.02545 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$K_p = 0.5767 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$\delta = \frac{L \operatorname{sen}\theta}{\sqrt[4]{Ra}}$$

$$\frac{h_i \delta}{K_{aire}} = 8.23 \quad (\text{Rohsenob y Choi})$$

$$h_i = 11.477 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\beta = 0.003501 \text{ 1/ } ^\circ\text{C}$$

$$g = 9.81 \text{ m/seg}$$

$$L = 6.5 \text{ m}$$

$$\theta = 9^\circ 35'$$

$$\mu = 1.9142 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/ms}$$

$$T_{\infty} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo de Bi_l y Bi_r

$$Bi_l = \frac{0.1 \cdot 11.477}{0.5767} = 1.99$$

$$Bi_r = \frac{0.1 \cdot 17}{0.5767} = 2.99$$

SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES.

1).- Se propone U_r y se calculan A y B.

2).- Se calcula el valor de U_f en (10)

3).- Se compara el valor de U_f calculada con U_f propuesta.

i).- Si son iguales es la solución.

ii).- Si no son iguales; no es la solución y habrá de hacerse una

segunda iteración donde el U_f propuesto es el calculado en esta iteración.

Se inicia el cálculo con el valor de U_r propuesto = 0.5 m/seg

A = 38 157.1057 B = 489.5628 $U_r = 0.437$ m/seg

Se propone $U_r = 0.4$ m/seg

A = 47 695.8514 B = 611.9535 $U_r = 0.437$ m/seg

Se toma como valor de $U_r = 0.44$ m/seg

CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL CANAL

La distribución de temperaturas se calcula para la superficie exterior y la superficie interior de la placa superior del "Techo Escudo", así como para el fluido dentro de la capa límite por medio de las ecuaciones 4, 5 y 6, el cálculo se efectúa a cada metro de acuerdo a la posición en la que se colocaron los termopares dentro del canal, en el caso de la temperatura del fluido se efectúa un cálculo más a los 6.5 m, para comparar este valor con el obtenido experimentalmente a la salida del aire en el ducto.

Los valores que toman las variables están dados de acuerdo al clima de Temixco, Morelos y a los materiales de construcción del "Techo Escudo". Para la temperatura ambiente se consideró un valor de 25°C que corresponde a una temperatura característica del lugar al inicio del día en la época cálida.

Al resolver las ecuaciones mencionadas se obtuvieron los valores máximos para las tres temperaturas, a partir del segundo valor calculado, a un metro de distancia de la entrada del ducto, dicho valor fue el mismo en todos los casos y es además el valor asintota según se observa en la figura 4.10.

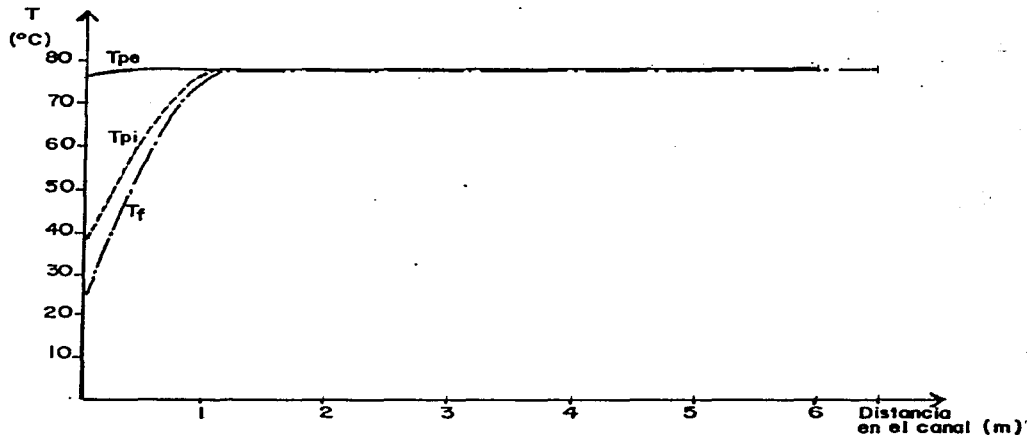


FIGURA 4.10.- DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL CANAL PARA T_{pe} , T_{pi} y T_f .

CONCLUSIONES DEL ESTUDIO TEORICO DEL PROBLEMA.

El valor de la velocidad del aire en la capa límite resultó con un valor más alto al que se espera medir experimentalmente; sin embargo el valor convergió y a partir de éste la distribución de los valores de las tres temperaturas bajo estudio, tuvieron un comportamiento muy cercano al que se espera obtener experimentalmente, con valores más bajos en la cara interior de la placa y en el fluido, por la resistencia al paso del calor que proporciona la capa de concreto que forma esta placa.

CAPITULO 5

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROBLEMA.

Para la realización del estudio experimental se escogió el techo de uno de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar del IIM-UNAM en Temixco Morelos, de acuerdo al objetivo planteado en el presente trabajo.

La elección del cubículo se hizo procurando que fuera representativo del conjunto, por lo cual se consideró que su ubicación estuviera dentro de la zona media de éste, sin que ocupara necesariamente la parte central del eje escogido (figura 5.1). De esta manera no existe ninguna ventaja especial en cuanto al aprovechamiento de los vientos dominantes respecto al resto de los cubículos del conjunto.

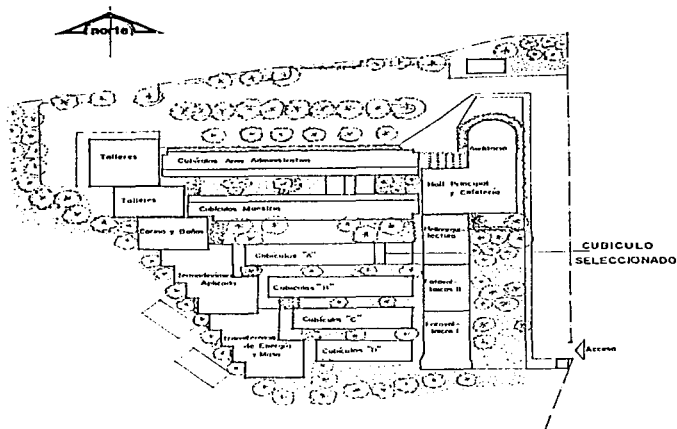


FIGURA 5.1 - PLANTA DE CONJUNTO LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR, TEMIXCO, MOR. IIM-UNAM.

5.1.- Descripción de la Techumbre.

El techo del cubículo que se usó para el estudio experimental, está construido a base del sistema prefabricado de vigueta y bovedilla, que coincide con el planteamiento del objetivo general del presente trabajo, de obtener sistemas de descarga de calor para clima cálido usando los materiales y mano de obra disponibles en el mercado local.

El techo está inclinado y tiene una orientación norte sur, la parte más baja da hacia el sur y la más alta hacia el norte, el ángulo de inclinación es de $9^{\circ} 35'$ respecto de la horizontal. Esta inclinación hacia el sur se aprovecha, por medio de un cantiliver de 1.90 m aproximadamente, para sombrear los pasillos de circulación anexos a los cubículos, y es también en el extremo sur donde se adaptó la entrada de aire para el sistema, rompiendo la cara interior de la segunda bovedilla y colocándole tela de mosquitero para evitar el paso de alimañas. En el extremo contrario (norte), se colocó el sistema de vigueta y bovedilla directamente sobre la trabe sin la cadena de cerramiento que se acostumbra colar para cerrar este sistema constructivo, de tal manera que en este extremo quedó abierta y se le colocó, en este caso también, tela de mosquitero. La capa de compresión que se cuela en la parte superior de este sistema se dejó que sobrepasara 60 cm por fuera de la fachada norte, y se remató este volado con un faldón, con el cual se protege la abertura de la bovedilla contra la entrada de lluvia y también se logra evitar con esto el paso del sol a través de la ventana en esta fachada durante el solsticio de verano que es cuando el sol tiene su máxima inclinación hacia el norte (5° respecto de la línea imaginaria del cenit para la latitud de Temixco, Morelos).

En la figura 5.2 se muestra un corte de esta techumbre con la indicación de los puntos donde se tomaron medidas de temperatura de manera periódica.

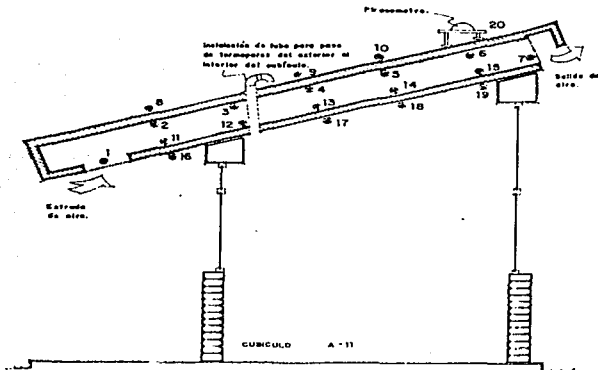


FIGURA 5.2.- CORTE ESQUEMATICO DEL TECHO ESCUDO CON LOS PUNTOS DONDE SE REGISTRAN LAS TEMPERATURAS Y LA RADIACION SOLAR.

5.2.- Estudio en el Prototipo.

La figura 5.2 muestra los lugares que se escogieron para el registro de las temperaturas en el sistema de techumbre escudo a la radiación solar.

El criterio para la distribución de los termopares se hizo con base en mediciones previas esporádicas que se habían efectuado en la techumbre de otro de los cubículos del Laboratorio. Con los datos obtenidos en estas mediciones previas se determinó que las separaciones más adecuadas, para la colocación de termopares, son las de 1m aproximadamente ya que con esto se obtienen datos suficientes para determinar a nivel experimental el rango de variación de temperaturas dentro del canal.

Con base en lo anterior se puede observar en la figura 5.2 que los termopares dentro de la cavidad se colocaron a separaciones de 1m

aproximadamente a partir de la entrada de aire a ésta, y se tomaron mediciones tanto por la parte interior de la placa superior como en el punto equivalente del plafón. Con esta información de temperaturas dentro del canal se podrán tener elementos que permitan evaluar el efecto de la convección en el interior del sistema.

Por otra parte se colocaron también tres termopares por la parte exterior del sistema, donde recibe la radiación solar directa y difusa, con el objeto de observar si el efecto convectivo por la parte exterior es importante a lo largo del proceso de transferencia de calor.

Finalmente se colocaron también cuatro termopares en el plafón del cubículo y dos más: uno en la entrada de aire y otro en la salida, con lo cual se tiene cubierto el sistema para evaluar el funcionamiento como techo escudo a la radiación solar.

En una primera etapa de pruebas se tomaron las temperaturas cada media hora, conectando los 19 termopares a un conector de canales múltiples y de este a un medidor digital de temperaturas (marca doric) donde se obtenían de manera digital las temperaturas del prototipo. La temperatura ambiente se midió de un termómetro colocado en la ventana del cubículo.

Este sistema de medición tiene el inconveniente de que, al ser manual, está condicionado al horario de trabajo, o de lo contrario tener que pasar por lo menos un día completo junto al sistema para tener la variación completa de temperaturas a lo largo de un día; lo cual fue hecho durante un fin de semana, graficando posteriormente las lecturas (figura 5.3).

En una segunda etapa de mediciones se instaló un sistema de adquisición de datos al que se le conectaron los 19 termopares para medir temperaturas, más un piranómetro para medir radiación solar instalado en el techo del cubículo. Se instaló también en el interior del cubículo un termohidrógrafo para medir temperatura y humedad ambiente.

Como durante los dos primeros meses del año de 1990 no se tomaron lecturas por medio del sistema de adquisición de datos, se utilizaron las lecturas efectuadas durante 1991 para incluir las gráficas de temperaturas y de parámetros climáticos de un día tipo de cada uno de estos dos meses en la serie de gráficas presentadas en el anexo A.

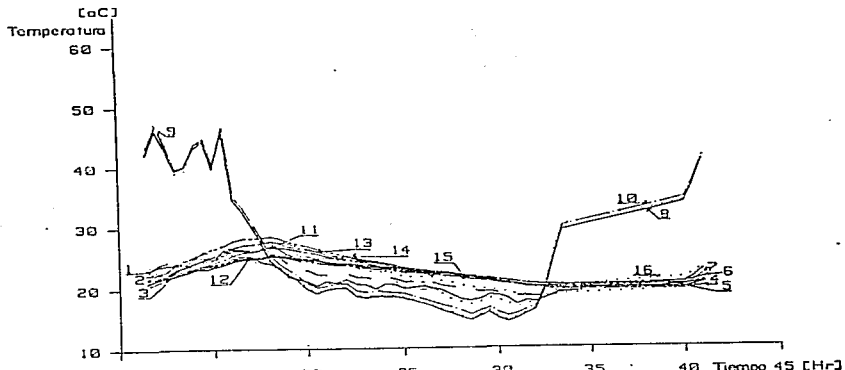


Figura 5.3 - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE LOS DIAS 13 Y 14 DE ENERO DE 1990.

CAPITULO 6

RESULTADOS

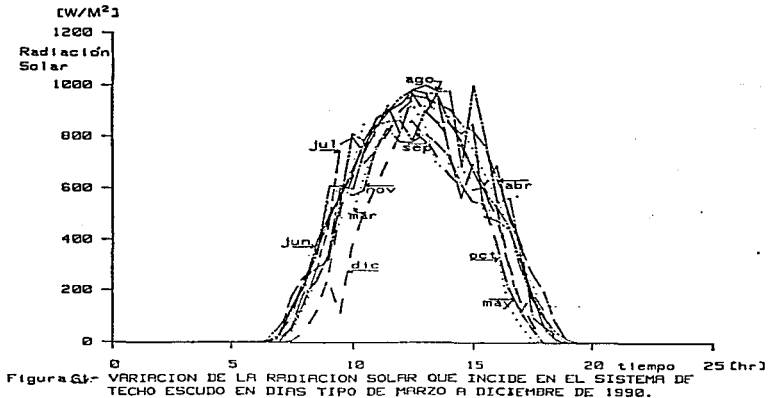
En el presente capítulo se discuten los resultados del estudio efectuado al sistema de descarga del "Techo Escudo". Primero se analiza el estudio experimental presentado en las gráficas del anexo A, incluyendo las variables climáticas registradas. En seguida se establece una comparación entre los resultados del estudio experimental y los del planteamiento analítico del problema, para establecer finalmente, con base en lo anterior, la validez de las hipótesis planteadas al inicio de la tesis.

A partir de los resultados anteriores se plantea, en la segunda parte del capítulo, el proceso de cálculo de los coeficientes de convección que se aplican en el caso específico del prototipo analizado. Finalmente, en la tercera parte del capítulo, se establecen las recomendaciones de diseño para techumbres inclinadas en las que de alguna manera se tenga una doble placa con el espacio intermedio ventilado, para su aplicación en zonas geográficas con clima similar al descrito en esta tesis.

6.1.- Resultados Experimentales.

Los parámetros climáticos bajo los cuales se desarrolló el estudio en el prototipo, presentaron características muy definidas a lo largo del año 1990-91.

Una de estas variables, la radiación solar global, presentó valores máximos del orden de 1000 watts/m^2 , durante la mayor parte del año (figura 6.1).



La humedad relativa presentó valores definidos también en dos etapas del año, durante mediados del invierno a principios de la primavera, los valores máximos promedio son del orden del 50%, incrementándose a partir de mayo a valores máximos promedio de entre 80 y 90%, permaneciendo en estos rangos hasta noviembre (figuras A1d, ... A12d del anexo A).

La dirección e intensidad del viento se registró mediante un sensor marca DIGITAR, y los valores se leyeron en una carátula digital. Este sistema no contó con una interfaz conectada al sistema de adquisición de datos, por lo cual las lecturas esporádicas que se hicieron se registraron de manera manual en la bitácora del proyecto, y no se presentan gráficas de estos valores en este capítulo. Los valores de velocidad del aire que se obtuvieron en estas lecturas están en el rango de 2 a 2.5 m/seg y la dirección del viento dominante durante el día proviene del sur-sureste. Esto corroboró los datos que se tenían de la variable climática en anteriores mediciones que se habían efectuado en el lugar, previas a la construcción del LES.

La temperatura ambiente se leyó mediante un sensor protegido con

una cubierta de aluminio, con el objeto de que no le afectara la radiación emitida y reflejada por los alrededores; y fue instalado en el exterior del cubículo de pruebas.

Los valores obtenidos de esta variable climatológica muestran que la mayor parte del año oscilan alrededor del rango de comodidad para el humano (22 - 28 °C), quedando por arriba de éstos, en el día, durante la primavera y por abajo en la madrugada durante el invierno (se presentan líneas adelante los valores obtenidos de este parámetro).

Dentro del cubículo la temperatura oscila durante el día, dentro del rango de comodidad [22-28 °C (ASHRAE Fundamentals 1981)], la mayor parte del año, quedando durante la primavera por arriba de este rango alrededor de las 15:00 horas, época en la que se presentan las humedades más bajas del año, así como las temperaturas ambiente más altas (figuras A1c a A12c del anexo A).

En el "Techo Escudo" la diferencia de temperaturas entre la superficie exterior de la placa superior y la del plafón (figuras A1b a A12b del anexo A), permanecieron con el mismo patrón de valores a lo largo del año, con diferencias de aproximadamente 30 °C entre estas superficies, ya que la temperatura promedio de máxima en la superficie exterior, es del orden de 60 °C, mientras que en la superficie del plafón, la temperatura máxima es del orden de 30°C; y en todos los casos: la temperatura del plafón oscila durante el día cercana a la del ambiente. Durante la madrugada, la temperatura en la superficie exterior está por abajo de la del ambiente, mientras que la del plafón, durante el mismo lapso de tiempo está por arriba de ésta y permanece por abajo de la del ambiente durante las horas con mayor calor tendiendo a incrementarse ligeramente al final del día.

Con objeto de visualizar a detalle los efectos comentados en el parrafo anterior, se elaboraron gráficas en las que se tomaron únicamente tres valores de temperaturas, dos de ellos son los valores promedio de las

temperaturas de las superficies exterior y del plafón del "Techo Escudo", y el tercero es la temperatura ambiente con base en la cual se normalizaron los otros dos valores de acuerdo a la ecuación 1.

$$T^* = \frac{T - T_{amb \ min}}{T_{amb \ max} - T_{amb \ min}} \quad (1)$$

donde:

T^* = Temperatura adimensional

$T_{amb \ min}$ = Temperatura del medio ambiente mínima

$T_{amb \ max}$ = Temperatura del medio ambiente máxima

T = Temperatura con dimensiones.

De estas gráficas se escogieron cuatro, correspondientes a la primavera, verano, otoño e invierno, como representativas de las épocas del año.

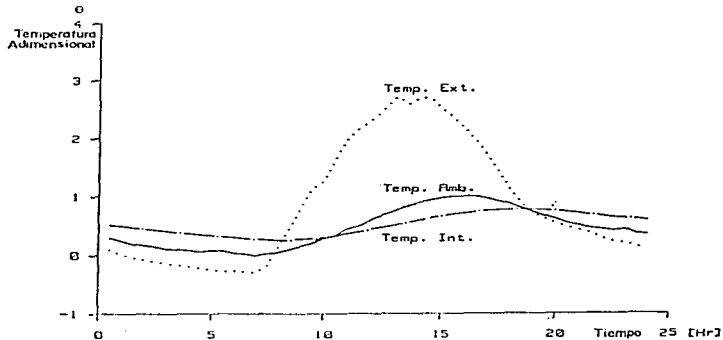
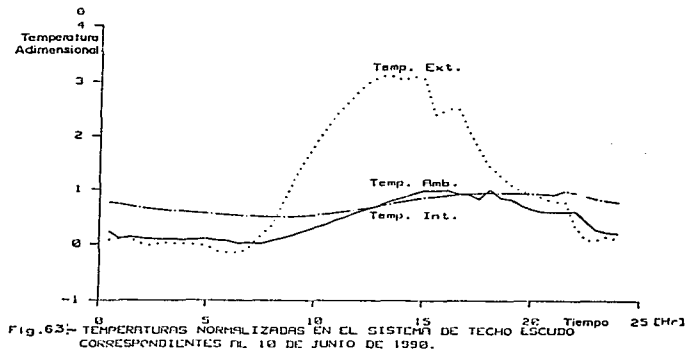


Fig. 6.2.- TEMPERATURAS NORMALIZADAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1990.

En la figura 6.2 se presentan las temperaturas correspondientes al 7 de marzo, donde se puede apreciar que el valor máximo en la temperatura ambiente

está desfasado con respecto al máximo de la temperatura del plafón y al de la temperatura de la superficie exterior, puesto que este último sigue la misma tendencia de la curva de radiación solar para ese día (figura A3a del anexo A), al estar expuesto a ésta. Se puede observar también que la temperatura de la superficie del plafón presenta una curva muy atenuada en la cual no se aprecian alteraciones con los cambios, registrados en la temperatura de la superficie exterior, ni con pequeños cambios de la temperatura ambiente, debido al fenómeno de almacenamiento térmico. [5]. Por otra parte, esta misma curva de la temperatura de la superficie del plafón, tiene valores por arriba de la del ambiente y de la superficie exterior durante la noche y la madrugada, continuando con esta tendencia hasta las 10:00 horas, permaneciendo después de esta hora y hasta las 18:00 horas, aproximadamente, por abajo de estos valores.



En la figura 6.3 correspondiente al 10 de junio, se observa que la temperatura de la superficie del plafón, en este caso, es ligeramente mayor que la tendencia mostrada durante los otros tres meses analizados. Lo

anterior es debido a que a partir de las 7:00 horas, aproximadamente, aumenta rápidamente la temperatura ambiente y la temperatura de la superficie exterior, en donde se nota que la nubosidad, que generalmente hay en esta época del año, se presenta hasta después del medio día, a diferencia, por ejemplo, de la gráfica de septiembre donde el efecto de la nubosidad se presentó antes del medio día, y se refleja en la temperatura de la superficie exterior. En el caso del mes de junio, después de las 20:00 horas se presenta un cambio brusco en la temperatura ambiente que se aprecia en la temperatura de la superficie del plafón en mayor medida que en los otros casos; lo mismo ocurre en la superficie exterior.

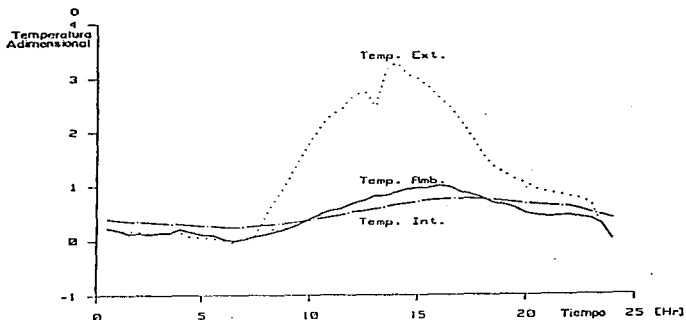


FIG.6.4 - TEMPERATURAS NORMALIZADAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1990.

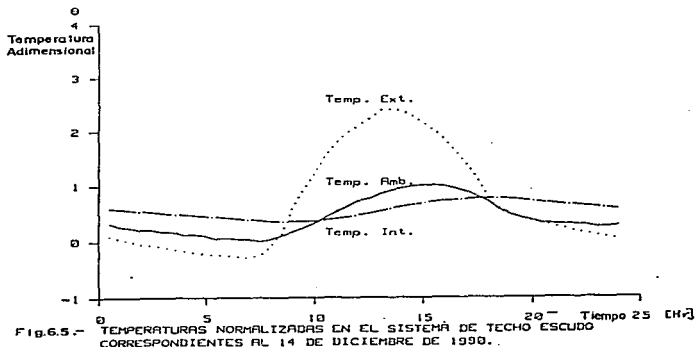


FIG.6.5 - TEMPERATURAS NORMALIZADAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO CORRESPONDIENTES AL 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

En las figuras 6.4 y 6.5 correspondientes al 14 de septiembre y 14 de diciembre respectivamente, se pueden observar los mismos efectos comentados en el párrafo anterior para el mes de marzo, ya que los valores de la temperatura de la superficie del plafón se mantienen por arriba o por abajo de los de la ambiente y de la superficie exterior durante, prácticamente, los mismos lapsos de tiempo que en el caso del mes de marzo; y la curva de temperatura de la superficie del plafón se mantiene atenuada para ambos casos, tanto en diciembre cuando se tienen las temperaturas más bajas del año en el ambiente durante la noche y la madrugada, como durante septiembre cuando estas temperaturas oscilan cercanas a la de comodidad durante la noche y la madrugada.

Todo lo anterior muestra que la capacidad de almacenamiento de calor en los materiales de construcción, empleados en este sistema, es importante y contribuye a mantener las condiciones de comodidad en el interior del cubículo a lo largo de las 24 horas del día.

Por otra parte las temperaturas que se registraron en la superficie exterior de la placa superior, muestran que en los dos meses con menor humedad relativa (40 y 45%), marzo y abril, el punto medio (9) (figura 6.8), registró la temperatura más baja, el punto inferior (8) una temperatura media y el punto más elevado (10) la temperatura más alta (figuras 6.6 y 6.7).

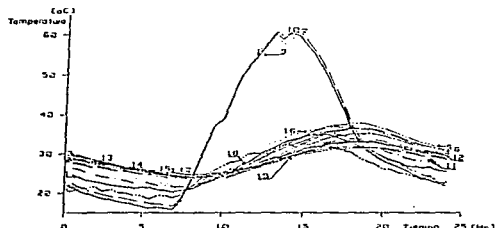


FIGURA 6.6. - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 7 DE MARZO DE 1950.

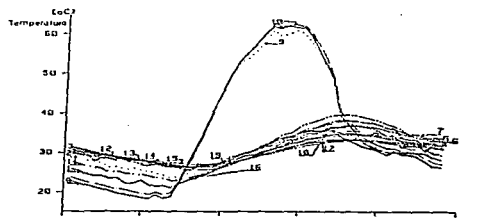


FIGURA 6.7. - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 8 DE ABRIL DE 1950.

Esta tendencia se puede explicar analizando el efecto convectivo del aire con esta superficie, junto con la curva de humedad que presentan los dos días representativos de cada uno de estos meses; el viento dominante tiene dirección sur-sureste, entonces el aire recorre la superficie exterior del techo en sentido ascendente (figura 6.8), ocurriendo que se presentará un fenómeno de convección de calor y humedad de la capa de aire que roza con dicha superficie; en cuanto a la humedad relativa, en ambos meses aumenta rápidamente al empezar la madrugada y llega a un punto máximo de alrededor del 50% a las 7:00 horas. Analizando el diagrama psicrométrico (figura 6.9) se localiza el punto que representa la condición del aire ambiente, al inicio del día en esa época del año, en el cruce de la temperatura de bulbo seco de 25 °C con la curva de humedad durante el mismo lapso de tiempo (45%), en este punto se tienen las características del aire ambiente al empezar a recorrer éste la superficie exterior de la techumbre (punto 8, figura 6.8), a partir de este punto, el aire que recorre la superficie del techo presentará el fenómeno de convección de calor y humedad por lo cual al llegar al punto 9 (figura 6.8) se corre en el diagrama a un porcentaje de saturación del 50% (menor temperatura), y como este es el valor máximo que alcanza la humedad en ese día, el punto 10 se localiza sobre la misma curva de humedad relativa, en un valor más alto al seguir aumentando la temperatura del aire por convección en su recorrido sobre la superficie exterior.

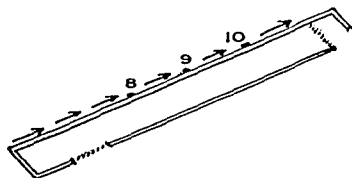


FIGURA 6.8.- RECORRIDO DEL AIRE SOBRE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" DE ACUERDO A LA DIRECCION DEL VIENTO DOMINANTE.

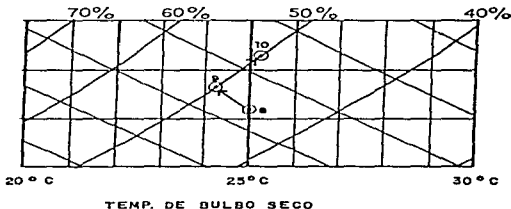


FIGURA 6.9.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" POR EL EFECTO DE LA CONVECCION DE CALOR Y HUMEDAD, DURANTE LOS MESES CON MENOR HUMEDAD RELATIVA DEL AÑO.

La tendencia anterior cambia durante los meses con mayor humedad relativa del año (de mayo, a octubre), durante esta época se puede observar en las figuras 6.10 a 6.15, que la temperatura del punto 8 es siempre más alta, el punto 9 registró en todos los casos para esta época del año el valor más bajo de temperatura y el punto 10 un valor intermedio.

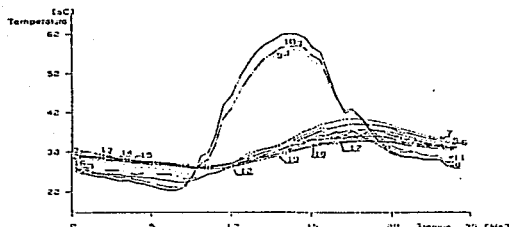


FIGURA 6.10.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE MAYO DE 1950.

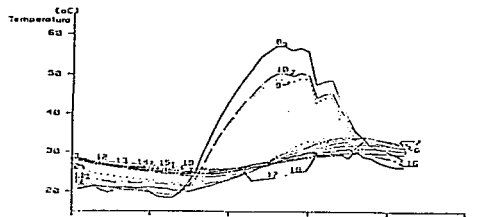


FIGURA 6.11.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JUNIO DE 1950.

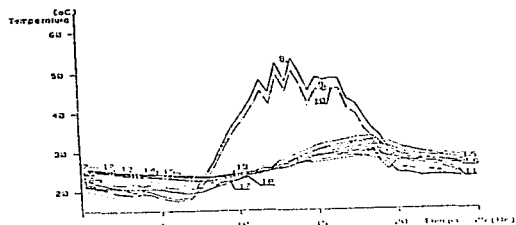


FIGURA 6.12.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 17 DE JUNIO DE 1950.

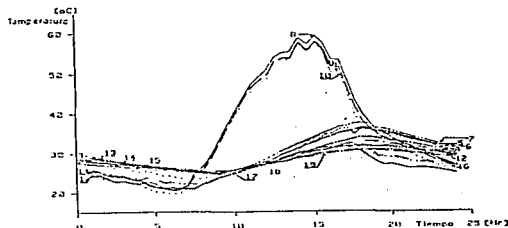


FIGURA 6.13.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 21 DE JUNIO DE 1950.

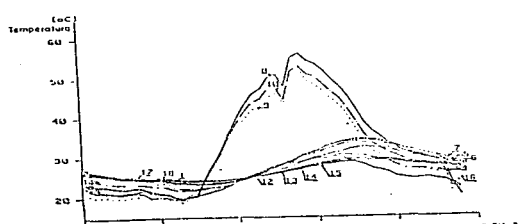


FIGURA 6.14.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 24 DE JUNIO DE 1950.

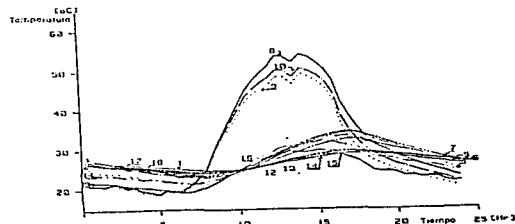


FIGURA 6.15.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 16 DE OCTUBRE DE 1950.

Analizando el diagrama psicrométrico (figura 6.16), la posición del aire ambiente al comenzar el día está en el cruce de la temperatura de bulbo seco de 25 °C con la curva de humedad del 70%; en estas condiciones comienza a recorrer la superficie exterior del techo (punto 8), y por la convección de calor y humedad, al llegar al punto 9 la condición del aire se corre en el diagrama a un porcentaje de humedad del 90% (menor temperatura) siguiendo por esta curva, al no haber aumento de humedad, hacia un valor más alto de temperatura (valor intermedio, punto 10).

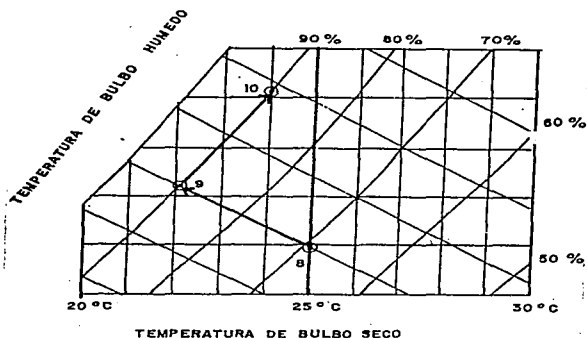


FIGURA 6.16.- TEMPERATURAS EN LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" DURANTE LA EPOCA DE MAYOR HUMEDAD.

En los meses de diciembre a febrero, la tendencia vuelve a cambiar y ahora el punto 8 tiene el valor de temperatura más bajo, el punto 9 el valor más alto y el punto 10 un valor intermedio (figuras 6.17, 6.18 y 6.19).

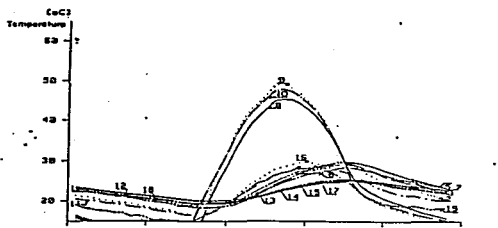


FIGURA 6.17 - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

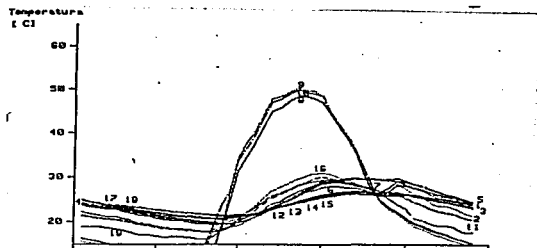


FIGURA 6.18 - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 14 DE ENERO DE 1991.

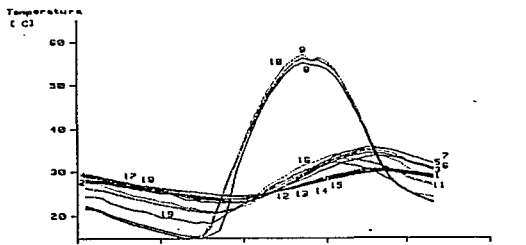


FIGURA 6.19 - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 12 DE FEBRERO DE 1991.

Durante estos tres meses se registraron valores de humedad relativa de aproximadamente 60% durante la madrugada, con un aumento hasta un valor máximo de entre 65 a 70% alrededor de las 7:00 horas, para disminuir en general rápidamente después de alcanzar este valor, (figuras A1d, A2d y A12d del anexo A). Analizando nuevamente el diagrama psicrométrico, la posición del aire ambiente al comenzar el día se localiza en el cruce de temperatura de bulbo seco de 20 °C, con la curva de humedad relativa del 60%, punto 8, a partir de este punto, el aire que recorre el techo se mantiene dentro del mismo rango de humedad, puesto que las curvas de humedad de estos meses tienen poca variación en las primeras horas de la mañana, hasta llegar a un valor de temperatura mayor por el calentamiento que recibe la superficie

exterior de la techumbre (punto 9), continuando el recorrido el aire y recibiendo un aumento de humedad se llega a un valor de temperatura intermedio (punto 10) (figura 6.20).

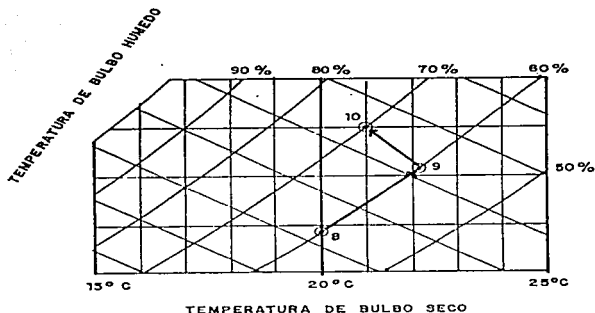
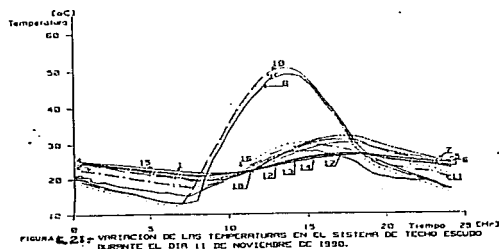


FIGURA 6.20.- TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" DURANTE EL INVIERNO (% DE HUMEDAD MEDIO)

En el mes de noviembre la tendencia en las curvas de las temperaturas de la superficie exterior del "Techo Escudo" va de menor en el punto más bajo (8) a mayor en el punto más alto (10) (figura 6.21).



Esta tendencia se explica revisando la curva de humedad relativa de estos meses (figura A11d del anexo A); en esta figura se aprecia que durante la madrugada la humedad relativa tiene un valor promedio de 80 %, el valor baja a un promedio de aproximadamente 70% después de salir el sol, y vuelve a subir a partir de las 16:00 horas aproximadamente, a un valor cercano al 80 % nuevamente. En el diagrama psicrométrico se mantiene entonces la condición de humedad relativa uniforme en un valor aproximado del 70%, y el aire en el recorrido por la superficie exterior del techo aumenta de temperatura por convección con éste con lo que se obtiene la ubicación de los puntos 9 y 10 dentro del diagrama (figura 6.22).

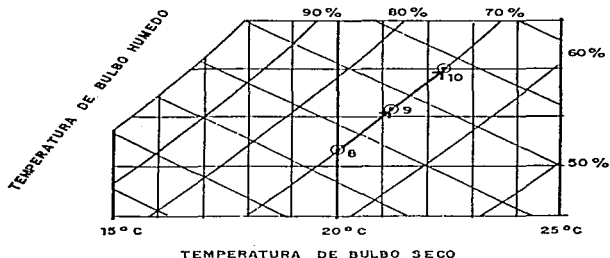


FIGURA 6.22. - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" POR EL EFECTO DE CONVECCION DE CALOR Y HUMEDAD DURANTE EL MES DE NOVIEMBRE.

Con objeto de analizar el efecto de las de temperaturas de la superficie exterior del "Techo Escudo" en el interior del mismo, se graficaron a detalle las curvas de las temperaturas de las superficies en el interior del ducto y las del plafón para tres meses representativos de las diferentes épocas climáticas del año; los meses escogidos fueron: marzo (cálido seco), septiembre (cálido húmedo) y diciembre (frío).

En el caso del mes de marzo puede apreciarse en la figura 6.23 correspondiente a las temperaturas de la superficie superior por el interior del ducto, que al comenzar el día, entre las 7:00 y las 10:00 horas el punto inferior es el más frío y que la temperatura va aumentando hacia la parte superior del ducto, esta tendencia cambia a partir de las 10:00 horas y hasta las 20:00 horas aproximadamente en donde se observa (figura 6.24) que la temperatura del punto 5 va aumentando hasta ser la más caliente de esta parte del ducto, el punto 2 tiene un valor intermedio y el punto 4 es el más frío de todos lo cual coincide con la tendencia que muestran los puntos correspondientes en el exterior (8,9 y 10) durante este mismo lapso de tiempo.

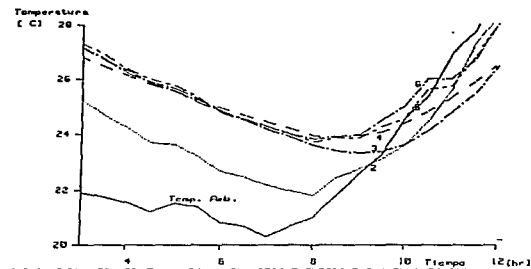


FIGURA 6.23 -TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1920.

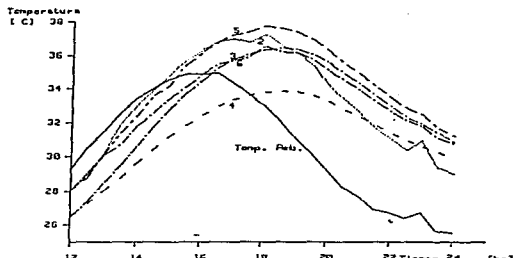


FIGURA 6.24 -TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1920.

Se puede observar también que el punto 2 es el que más se aproxima al valor de la temperatura ambiente y presenta mayor sensibilidad a los cambios de ésta debido a que está ubicado muy próximo a la entrada de aire al ducto. El punto 6 que debería tener la mayor temperatura por la tarde se mantiene muy próximo al valor del punto 3 debido a que la zona de la techumbre en donde está ubicado queda sombreada en las tardes por una estructura que sirve de apoyo a una serie de probetas de otro experimento que se desarrolla en el Instituto.

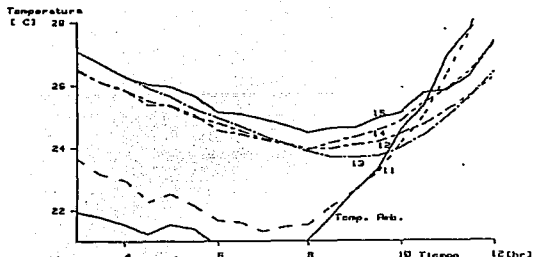


FIGURA 6.25.-TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE INFERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1950.

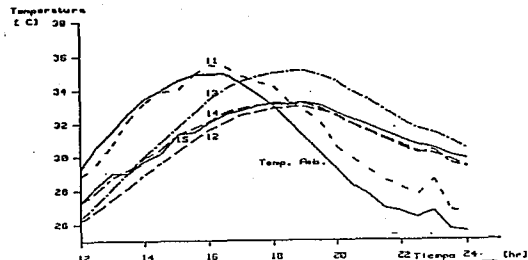


FIGURA 6.26.-TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE INFERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1950.

Comparando los resultados anteriores con los de las gráficas 6.25 y 6.26 que muestran las temperaturas de la placa inferior por el interior del ducto, para el mismo día (7 de marzo), se puede apreciar que el punto 11, que está ubicado en la proximidad de la entrada de aire, en el mismo eje del punto 2, presenta como este último mayor sensibilidad a los cambios de la temperatura ambiente, aunque en este caso se nota el efecto de escudamiento por parte de la placa superior ya que se calienta o se enfría menos que el punto 2; la temperatura en los demás puntos de esta superficie, durante la madrugada y las primeras horas de la mañana, tiene valores muy cercanos a los de la superficie superior; esta tendencia cambia para después del mediodía ya que el valor máximo promedio que alcanzan las temperaturas de los puntos 12, 14 y 15 esta tres grados por abajo de la temperatura máxima promedio de los correspondientes tres puntos de la superficie superior, en estos últimos los valores máximos se tienen a las 18:00 horas lo cual representa un desfase de dos horas respecto de la hora en que se presenta el valor máximo de temperatura ambiente, y a excepción del punto 4 todos los demás valores están a esta hora por arriba del valor de la temperatura ambiente,

mientras que en la superficie inferior, el valor máximo promedio tiene también un desfase pero en este caso de casi tres horas con respecto al valor máximo de la temperatura ambiente, a excepción en este caso (aparte del punto 11 discutido anteriormente), del punto 13 que es el de mayor temperatura a esta hora del día. Esto último puede explicarse por un efecto de convección natural en el interior del cubículo como se muestra en las figuras 6.27 y 6.28.

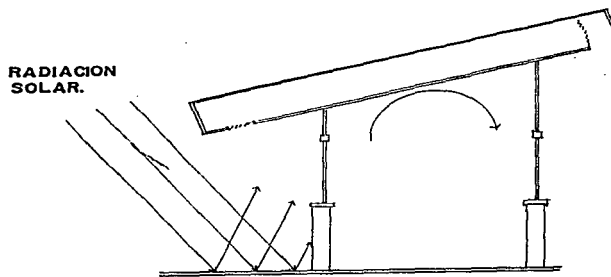


FIGURA 6.27.- CONVECCION DEL AIRE EN EL INTERIOR DEL CUBICULO DURANTE EL DIA.

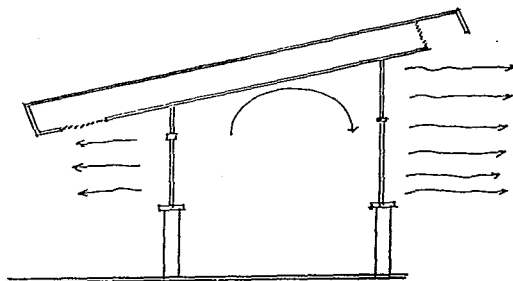


FIGURA 6.28.- CONVECCION DEL AIRE EN EL INTERIOR DEL CUBICULO DURANTE LA NOCHE.

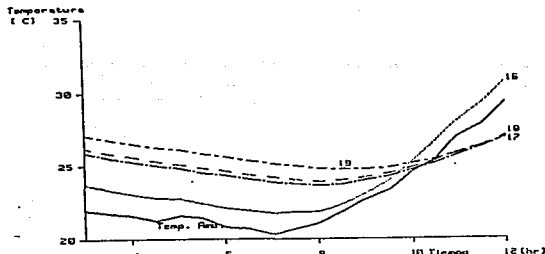


FIGURA 6.29.-TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL "TECHO OSCURO" POR EL LADO INTERIOR DEL CUBICULO CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1959.

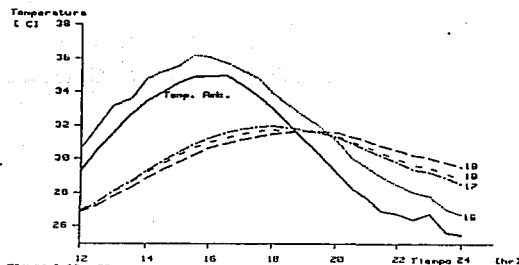


FIGURA 6.30.-TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL "TECHO OSCURO" POR EL LADO INTERIOR DEL CUBICULO CORRESPONDIENTES AL 7 DE MARZO DE 1959.

La convección natural del aire en el interior del cubículo mostrada en las figuras anteriores, tiene también un efecto en la tendencia de las curvas de temperaturas de los puntos de la superficie del plafón, como se observa en las figuras 6.29 y 6.30 en donde, durante la noche y la madrugada, el calor que se fue ganando durante el día fluye del punto más bajo al más alto, con un efecto de inercia térmica muy fuerte ya que se mantiene de esta manera toda la madrugada, que es cuando se tienen pérdidas de calor muy grandes, principalmente por el ventanal de la fachada norte. Durante estas horas el aire sigue fluyendo de la parte más caliente a la más fría y este efecto de enfriamiento se llega a manifestar en las temperaturas de esta superficie hasta después del medio día cuando el punto más bajo es el más caliente y el más alto el más frío, por otra parte las curvas de temperaturas de estos tres puntos se mantienen, sin embargo, muy cercanas entre sí y muy atenuadas con respecto a la temperatura ambiente, estando por arriba de ésta durante la madrugada y, en promedio 4 °C, por abajo durante la máxima registrada durante el día, mostrando un desfaseamiento con respecto a la hora en que se presenta ésta de aproximadamente dos horas. Por otra parte el punto 16 que está en esta misma superficie de la

techumbre, pero por fuera del cubículo, recibe durante el día (figura 6.27) la radiación reflejada y emitida por los alrededores, por lo cual tiene una tendencia muy próxima a la presentada por la temperatura ambiente, pero con valores mayores a ésta (figura 6.30) y por un efecto de inercia térmica continúa con esta tendencia durante la madrugada (figura 6.29). En los resultados obtenidos en esta parte de la techumbre no se aprecia algun efecto del calentamiento de la placa superior debido a la radiación solar que recibe durante el día.

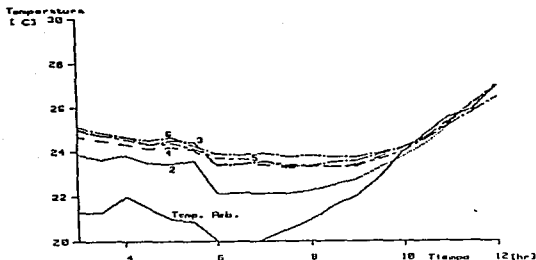


FIGURA 6.31 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEP. DE 1998.

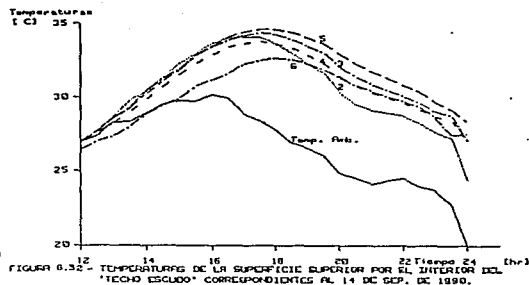


FIGURA 6.32 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEP. DE 1990.

En el caso del mes de septiembre (cálido húmedo), (figuras 6.31 y 6.32) la tendencia de las curvas de temperaturas de la superficie superior, por el interior del ducto, después de las 12:00 horas muestran que: el punto 2 es el más caliente de todos, el punto 5 tiene un valor intermedio y el punto 4 un valor menor, lo cual coincide con la tendencia de las curvas de temperaturas de la superficie exterior del techo durante este mismo lapso de tiempo en todos los meses de la época cálida húmeda (figuras 6.10 a 6.15); por otra parte, el punto 6 tiene nuevamente el valor menor de todas las temperaturas de esta superficie de las 11:00 a las 19:00 horas aproximadamente, lo que puede interpretarse como el sombreado que proporciona la estructura que se mencionó anteriormente. Para el punto 2 la tendencia cambia después de las 16:00 horas, pasando a ser el de menor valor, y siguiendo a la tendencia de la

temperatura ambiente, ya que, como se mencionó en el caso anterior, al estar más próximo a la entrada de aire es más sensible a los cambios del medio ambiente, el resto de los puntos continúan prácticamente con la misma tendencia durante la noche y la madrugada, notándose únicamente un cambio en el punto 6 que en las últimas horas de la madrugada pasa a ser el de mayor temperatura, manifestando con esto una alta inercia térmica. Otro efecto que se nota en las temperaturas de esta superficie es que durante toda la noche, la madrugada y la mayor parte del día están por arriba de la temperatura ambiente y únicamente entre las 10:00 y las 14:00 horas se sitúan cercanas o por abajo de esta.

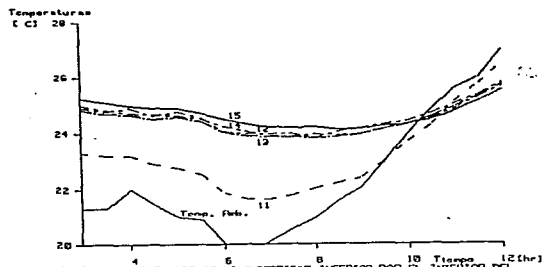


FIGURA 6.33 --TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE INFERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEP. DE 1990.

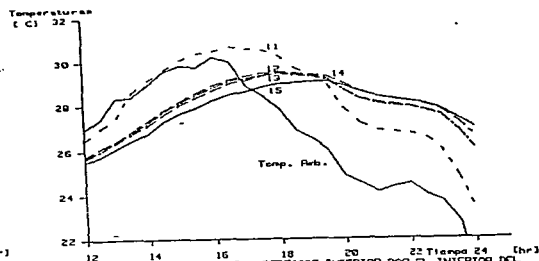


FIGURA 6.34 --TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE INFERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEP. DE 1990.

En la superficie inferior por dentro del ducto, figuras 6.33 y 6.34) se puede observar que la tendencia de las temperaturas está influida, también en este caso, por el efecto convectivo del interior del cubículo a lo largo del día, ya que aunque las curvas siguen una tendencia uniforme y muy próxima unas de otras, el punto más elevado de esta superficie (15) es el de menor valor durante el día (de las 10:00 a las 19:00 horas) y el de mayor valor durante la noche, lo cual puede estar siendo provocado por el efecto mostrado en las figuras 6.27 y 6.28; el punto 11 también en este caso sigue muy próximo la tendencia de la temperatura ambiente debido al mismo argumento de

su proximidad a la entrada de aire. Por otra parte la tendencia en general de las curvas de temperaturas de los demás puntos en esta superficie es de que están por arriba de la del ambiente durante la madrugada y por abajo de esta desde las 10:00 hasta las 16:00 horas aproximadamente.

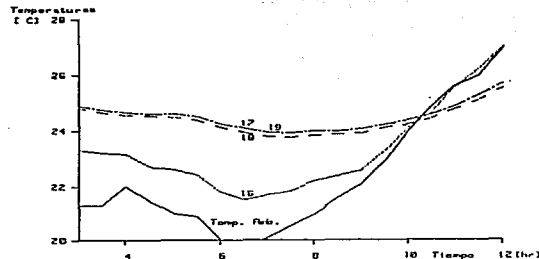


FIGURA 6.39. - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL "TECHO ESCUDO" POR EL LADO INTERIOR DEL CUBICULO CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEP. DE 1998.

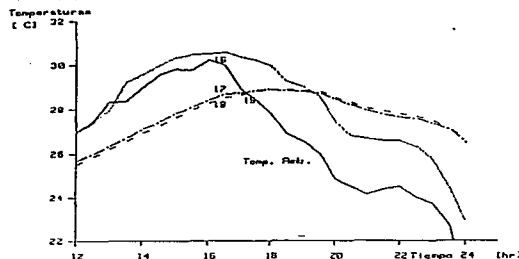


FIGURA 6.30. TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL "TECHO ESCUDO" POR EL LADO INTERIOR DEL CUBICULO CORRESPONDIENTES AL 14 DE SEP. DE 1998.

En las temperaturas del "Techo Escudo" por el lado del plafón mostradas en las figuras 6.35 y 6.36 se puede observar también el efecto de la convección del aire en el interior del cubículo ya que el punto más elevado de esta superficie tiene durante la madrugada el valor de temperatura mayor de todos los de esta superficie, muy próximo al valor del punto 17 y durante el día tiene el valor de temperatura menor, aunque muy próximo al del punto 18. Estos tres puntos en general, mantienen unas curvas de temperaturas muy uniformes y próximas uno de otro a lo largo de las 24 horas del día, oscilando en todo este periodo dentro del rango de comodidad para el humano (22 - 28 °C), y por lo tanto en este caso tampoco se aprecia algún efecto del calentamiento de la placa superior. Finalmente se puede observar en estas figuras, que la tendencia del punto 16 sigue en este caso también a la de la temperatura ambiente, por arriba de esta la mayor parte del tiempo debido a que, como se comentó en el caso anterior, recibe la radiación emitida y reflejada por los alrededores durante el día y conserva este efecto, por una alta inercia térmica durante la noche y la madrugada.

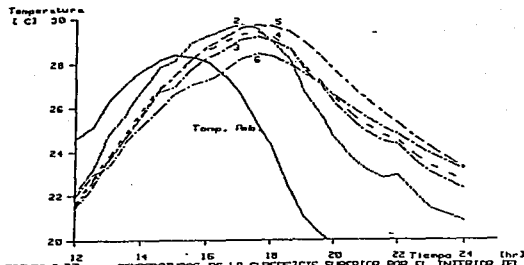


FIGURA 6.37 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

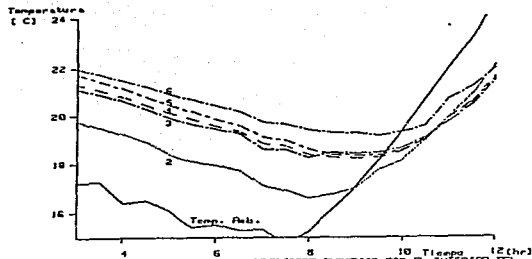


FIGURA 6.38 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE SUPERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

Finalmente en el caso del mes de diciembre, se puede observar en las figuras 6.37 y 6.38, correspondientes a las curvas de temperaturas de la superficie superior por el interior del ducto, que en este caso la tendencia de estas curvas varía ligeramente respecto de la tendencia de las curvas de temperaturas de la superficie exterior del techo, ya que en este caso se puede observar que durante la madrugada y hasta las 10:00 horas aproximadamente, la tendencia de las temperaturas va de menor valor en el punto más bajo (2) a mayor valor en el punto más alto (6). Esta tendencia cambia después de esta hora para los puntos 2 y 6 únicamente, lo cual confirma lo expuesto anteriormente por su cercanía con la entrada de aire el primero y por estar sombreado durante la tarde el segundo. Al final del día después de las 19:00 horas la tendencia empieza a cambiar y se empieza a manifestar hasta esta hora el flujo de calor hacia la parte superior de la techumbre para quedar las temperaturas en la misma secuencia de valores que tenían en la madrugada; a partir de las 16:00 horas y hasta las 10:00 horas del día siguiente todas las temperaturas de esta superficie están por arriba de la del ambiente con un desfase de aproximadamente 3 horas de diferencia en el tiempo en el que alcanzan el valor más alto con respecto a esta última, y entre las 10:00 y las 16:00 horas están por abajo de la del ambiente.

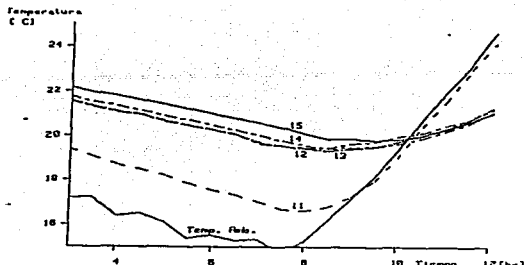


FIGURA 6.39 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE INFERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

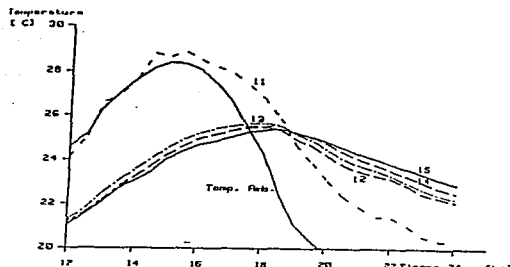


FIGURA 6.40 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE INFERIOR POR EL INTERIOR DEL "TECHO ESCUDO" CORRESPONDIENTES AL 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

En la superficie inferior dentro del ducto, se puede observar, en las figuras 6.39 y 6.40 que en este caso también las curvas de temperaturas de esta superficie siguen durante la madrugada y hasta las 10:00 horas aproximadamente, la tendencia de menor valor en el punto más bajo (11) a mayor valor en el punto más alto (15), cambiando la tendencia después de esta hora y hasta las 19:00 horas aproximadamente. Al pasar el punto 13 a tener el valor más alto y el 15 el más bajo, debido al efecto de convección del aire en el interior del cubículo comentado anteriormente, la tendencia vuelve a cambiar a partir de las 19:00 horas y para las 21:00 horas aproximadamente se tiene nuevamente la misma secuencia de valores de temperaturas que en la madrugada. La tendencia de las temperaturas de esta superficie con respecto a la del ambiente es la de estar por arriba de ésta desde las 17:00 horas aproximadamente, hasta las 10:00 horas del día siguiente quedando por abajo de ésta de las 10:00 a las 17:00 horas del día, a excepción de la temperatura del punto 11 que sigue la tendencia de la del ambiente.

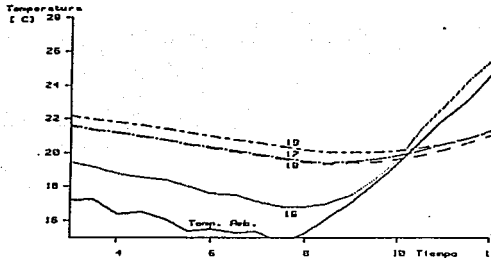


FIGURA 6.41 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL "TECHO ESCUDO" POR EL LADO INTERIOR DEL CUBICULO CORRESPONDIENTES AL 14 DE DIC. DE 1998.

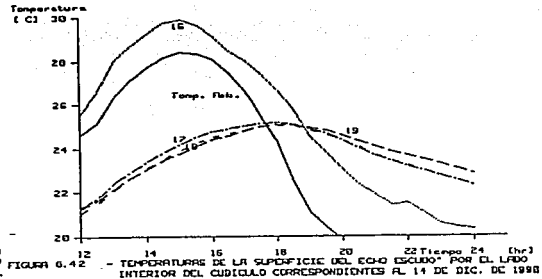


FIGURA 6.42 - TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL "TECHO ESCUDO" POR EL LADO INTERIOR DEL CUBICULO CORRESPONDIENTES AL 14 DE DIC. DE 1998.

Finalmente, en las figuras 6.41 y 6.42 se presentan las curvas de temperaturas de la superficie del plafón, en donde se puede apreciar que la tendencia de estas, en este caso está también afectada por la convección del aire en el interior del cubículo ya que durante la madrugada y hasta, aproximadamente, las 10:00 horas el punto más elevado (19), tiene la temperatura mayor cambiando a partir de esta hora para pasar a ser el de menor temperatura a partir de las 14:00 horas aproximadamente, hasta las 19:00 horas en la que llegan a un valor máximo todas las temperaturas de esta superficie (a excepción del punto 16) y el valor de este punto vuelve a ser el de mayor temperatura. Los otros dos puntos de esta superficie siguen una tendencia muy atenuada y permanecen en valores muy próximos uno del otro manteniéndose todo el tiempo en valores que oscilan alrededor de la temperatura de comodidad para el humano (22 - 28 °C). El punto 16 (pasillo) sigue en este caso también la tendencia de la temperatura ambiente en todo momento por arriba del valor de ésta.

Comparando los resultados experimentales con los del planteamiento analítico presentados en la figura 4.10 (cap. 4), en la cual las temperaturas de la superficie exterior T_{pe} , de la superficie interior T_{pi} y la del fluido, aumentan de manera gradual de la parte más baja a la más alta de la

techumbre, se puede concluir que esta tendencia sólo se presenta, en la superficie exterior del techo, cuando la transferencia de humedad entre la placa exterior del techo y el aire no es significativa, como sucedió en el caso del mes de noviembre, (el cual fue el único que presentó la tendencia del planteamiento analítico) [humedad relativa uniforme durante el día (70%)]; en los demás casos, al presentarse variaciones de humedad durante el día, la tendencia de la curva de temperaturas en la superficie exterior se altera respecto a la secuencia presentada en el planteamiento analítico.

Por dentro del ducto y en el plafón, la tendencia de las curvas de temperaturas fue siempre diferente a la del planteamiento analítico, ya que en estos casos la alteraron los efectos de: escudamiento de la placa superior, el almacenamiento térmico de los materiales de construcción con la inercia térmica que conlleva, los efectos de la convección natural del aire por el interior del cubículo y la radiación emitida y reflejada por los alrededores en la zona del pasillo.

Con base en lo anterior la hipótesis iv del capítulo 3 no tiene validez, ya que el intercambio de calor por radiación infrarroja más convección no puede ser representado de una manera lineal con la diferencia de temperaturas, puesto que dicho intercambio está influido por las variaciones de la humedad en el ambiente durante el día.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que se cumplieron la mayor parte de los objetivos planteados al inicio de la tesis, ya que se conoció a detalle el comportamiento del sistema de descarga de calor del "Techo Escudo" característico de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar; edificio que fue diseñado y construido para operar en su conjunto como un sistema pasivo, y en el cual se usaron: los sistemas constructivos, los materiales de construcción y la mano de obra, disponibles en la región.

Para la determinación de los coeficientes de convección del "Techo Escudo", se concluye, a partir de los resultados del estudio experimental, que para poder calcularlos es necesario replantear el modelo analítico, de tal manera que se tome en cuenta el almacenamiento térmico de los materiales de construcción, por la inercia térmica que presentan en su respuesta a los cambios climáticos. En la superficie exterior del "Techo Escudo" es necesario tomar en cuenta las variaciones de la humedad ambiente durante el día; ya que el fenómeno de convección en el aire que recorre esta superficie se ve afectado de manera importante por dichas variaciones.

Lo anterior se plantea con objeto de poder interpretar analíticamente los fenómenos observados en el prototipo experimental y poder llegar con esto a definir los coeficientes de convección que se aplicarían en el caso específico de esta techumbre.

Por otra parte, para poder plantear coeficientes de convección que se puedan aplicar en otras techumbres escudo con un diseño y en un clima diferentes a las presentadas en esta tesis, es necesario construir un modelo en el cual, bajo condiciones controladas en el laboratorio, se puedan

efectuar variaciones en estos parámetros y se midan las velocidades del flujo de aire que se presenten dentro de la cavidad para cada una de las variaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio experimental, al diseñar un "Techo Escudo" se recomienda:

- Conformar, mediante una doble placa, un ducto que atraviese longitudinalmente al techo; la separación de las placas se recomienda que sea mínimo de 8 cm^(*) de tal manera que no se presente transmisión de calor a la placa inferior por convección o radiación de la placa superior.
- El espesor promedio de la placa superior, de aproximadamente 5 centímetros, del "Techo Escudo" es suficiente, de acuerdo a los resultados obtenidos, para proporcionar una protección contra la radiación solar en una edificación; la placa inferior puede tener un espesor menor, en este caso de aproximadamente 2 centímetros debido a que el plafón de los cubículos del LES tienen como acabado únicamente una capa de pintura.
- Se debe colocar la techumbre con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de tal manera que se asegure la descarga de calor por flotación natural del aire al calentarse, cuando no esté presente el viento dominante del lugar.
- Para lograr lo anterior se debe mantener ventilado el ducto, con un espacio de entrada de aire en la parte inferior del techo, y otro de salida por la parte superior del mismo. La orientación preferente de la techumbre, en este sentido, es aquella en la que el viento dominante del lugar entre por la parte baja del techo y salga por la parte alta durante el día.

(*) Peralte mínimo de los huecos de las bovedillas en los extremos de estas.

- El tamaño de las aberturas de ventilación utilizadas en este caso fue, como se mencionó en el capítulo 5, el que se obtuvo de romper la cara inferior de una bovedilla en el extremo inferior del techo en cada uno de los ductos que forma el sistema de vigueta y bovedilla y por la parte superior el área que forman los huecos de cada una de las bovedillas. Estas dimensiones se observó que son suficientes para obtener una adecuada ventilación del sistema, se observó también que en este caso al tener el plafón sin ningún recubrimiento el viento penetra por las pequeñas separaciones en las juntas de las bovedillas.
- En cuanto a la ubicación de la apertura de entrada de aire, se recomienda la de la zona de presión positiva máxima del viento, que en este caso es la esquina que forma el "Techo Escudo" con la trabe del muro sur del cubículo por el exterior de éste.
- Una de las maneras de formar un "Techo Escudo" es la de utilizar el sistema de vigueta y bovedilla, con las adaptaciones descritas en el capítulo 5 de la tesis; de esta manera se puede formar un "Techo Escudo" con cualquiera de los sistemas de vigueta y bovedilla que existen en el mercado.
- El diseño ideal para este tipo de techumbres es aquel en el cual las dos placas que lo forman tengan el menor contacto posible, de tal manera que la transmisión de calor por conducción sea mínima. En este sentido se recomienda efectuar un estudio experimental a la cubierta formada por medio de dos placas planas de asbesto separadas por una placa ondulada estructural de asbesto, propuesta por el Arq. Aguirre Cárdenas, debido a que las superficies de contacto que se tienen entre las placas es muy pequeña en relación a la superficie total de la placa.

Con base en las recomendaciones de diseño anteriores, se pueden desarrollar cubiertas escudo a la radiación solar de una infinidad de maneras, quedando sujeto esto únicamente a la imaginación del diseñador.

Respecto al funcionamiento del "Techo Escudo" en resumen se puede concluir que:

- * La temperatura en el plafón oscila durante todo el año dentro de los rangos de comodidad para el humano (22-28 °C).
- * El valor máximo de la temperatura en el plafón fue en todos los casos del orden de tres veces menor respectó al valor máximo de la temperatura en la superficie exterior del techo, con un desfaseamiento en el tiempo en que ocurrió cada uno del orden de tres horas. Lo anterior muestra, por una parte, el escudamiento que proporciona la cubierta exterior del techo al plafón del mismo, y por otra parte, la alta inercia térmica que presentan los materiales de construcción de la techumbre estudiada.
- * Las variaciones en el comportamiento de las curvas de temperaturas en la superficie exterior del techo debidas a las variaciones de la humedad ambiente, se llegan a manifestar también en esta misma placa por el interior del ducto pero en ningún caso afectan a la placa inferior del techo.
- * Las variaciones de la temperatura ambiente afectaron la temperatura de la superficie de registro dentro del canal cercana a la entrada de aire, en donde los dos sensores de temperatura -placa superior y placa inferior- situados en esta zona siguieron siempre la tendencia de la temperatura ambiente. Asimismo la temperatura del punto de registro ubicado en el plafón, pero por fuera del cubículo, en el pasillo exterior, se vió afectada, tanto por las variaciones de la temperatura ambiente, como por la radiación emitida y reflejada por los alrededores.

Lo anterior no se apreció que tuviera algún efecto en el comportamiento de las curvas de las temperaturas del plafón por el interior del cubículo. En estas curvas se observó una variación de orden de magnitud pequeña en su comportamiento, que está relacionada con el

efecto de la convección natural del aire en el interior del cubículo.

- * Todo lo anterior implica que la doble placa en una cubierta inclinada, con el ducto interior ventilado, proporciona una adecuada protección a la radiación y a las variaciones del medio ambiente, en un clima cálido semiseco; ya que no se llegaron a apreciar dichas variaciones en la superficie del plafón, durante las 24 horas del día.
- * Se plantea, por otra parte la dirección en la cual puede continuarse el presente trabajo, por medio de la elaboración de un modelo a escala del "Techo Escudo", en el cual puedan ser modificados los parámetros geométricos y las condiciones de frontera, de tal manera que, en condiciones controladas en el laboratorio, se pueda llegar a medir el flujo de aire dentro del canal para cada una de las variaciones que se lleguen a fijar y a partir de esto calcular los coeficientes de convección en cada caso específico.
- * Finalmente la comparación de los resultados del planteamiento analítico con los obtenidos en el estudio experimental mostraron que la tendencia de la variación de las temperaturas en el exterior T_{pe} , en el interior T_{pi} , y en el fluido T_r del canal mostrada en el planteamiento analítico, donde se obtuvo un aumento de la temperatura de manera gradual de la parte más baja de la techumbre a la más alta, solo se presentó en la superficie exterior del techo cuando la transferencia de humedad entre la placa exterior del techo y el aire no es significativa, ya que de presentarse variaciones de humedad durante el día la tendencia de la curva de temperaturas en la superficie exterior se altera respecto a la secuencia presentada en el planteamiento analítico.
- * Por dentro del ducto y en el plafón, la tendencia de las curvas de temperaturas fue siempre diferente a la del planteamiento analítico, ya que en estos casos la alteraron los efectos de: escudamiento de la placa superior, la inercia térmica que genera el almacenamiento térmico de los

materiales de construcción, los efectos de la convección natural del aire por el interior del cubículo y la radiación emitida y reflejada por los alrededores en la zona del pasillo.

REFERENCIAS.

1).- D.A. Sámano. "El IIM-UNAM en el Uso Eficiente de la Energía en la Edificación", 2ª Reunión Nacional Sobre Ahorro y Uso Eficiente de la Energía. Aspectos Tecnológicos, Comisión de Energéticos de la LIII Legislatura de la Cámara de Diputados, mayo 1988, Queretaro, Qro.

2).- D.A. Sámano y B. Vázquez. "Reporte Final de la Evaluación de las Casas Sonntlan-Mexicali. Aspectos Térmicos", Instituto SEDUE Contrato N° 85-COO-115-A. 2-UH IADE-AE-15.1.3, 1987.

3).- Guyton, A. Tratado de Fisiología Médica, Editorial Interamericana, 5ª Edición, México.

4).- D.A. Sámano, B. Vazquez y D. Morales. "Metodología para la Climatización Natural de Edificios en un Clima Cálido", Memorias del IX Seminario Nacional Sobre el Uso Racional de la Energía, pp. 41-48, C.F.E., PEMEX, México D.F., septiembre 1988.

5).- Akbari M., D.A. Sámano, A. Mertol, F. Bauman and R. Kammerud. "The Effect of Variable Convection Coefficients on Thermal Energy Storage Part I. Interior Partitions Walls", Energy and Buildings, Vol. 9, No. 3, pp. 195-212, Lausanne, Suiza, 1986.

6).- D.A. Sámano. "Sistemas Pasivos (Edificios Confortables de Máxima Eficiencia Energética)", Notas del Curso de Actualización en Energía Solar, pp. 212-245, IIM-UNAM-LES, Temlxco, Morelos, abril de 1988.

7).- D.A. Sámano. "Climatización Natural de Edificios en un Clima Cálido", Memorias del Simposio: La Vivienda y su Contexto Bioclimático, Galería Metropolitana UAM, julio de 1987.

8).- B. Vázquez. Modelo para Establecer el Comportamiento Térmico de un Auditorio, Tesis Profesional para la obtención del Título de

Ingeniero Químico, Facultad de Química UNAM, México, D.F. 1986.

9).- D.A. Sámano. "El Empleo de Elementos Aglomerados con Cemento en la Climatización Natural de Edificios", Revista IMCYC Vol. 25, N° 199, pp 41-54, 1987.

10).- D.A. Sámano, B. Vázquez y D. Morales. "Informe Final del Estudio para la Incorporación de Sistemas Pasivos en el Edificio de Gobierno del I.N.S." realizado bajo contrato con COES de la Secretaría de Salud, México, 1988.

11).- B. Vázquez. "Estudio de la Convección Natural en un Auditorio", Primer Congreso de Estudiantes del Proyecto de Maestría en Energía Solar de la UACG y P del CCHL, IIM-UNAM-LES, reporte del avance del proyecto de investigación para la obtención de la tesis de maestría, enero 1988.

12).- D.A. Sámano. Conducción de Calor Bidimensional en Estado Cuasiperiódico en Placa Plana., Tesis Doctoral, para la obtención del grado en Ingeniería de PFI., UNAM, 1989.

13).- Shoda, M.S.; Singh, U.; Kumar, A.; Tiwari, G.N.; "Maximum Thermal Load Levelling in a Double Hollow Wall/Roof". International Journal of Energy Research. Vol 5, N° 2, p.p. 191-200, 1981.

14).- Shoda, M.S.; Kumar, A.; Srivastava, A.; Tiwari, G.N.; "Thermal Load Levelling in a Multilayered Wall/Roof". International Journal of Energy Research. Vol. 5, N° 1, p.p. 1-9, 1981.

15).- Shoda, M.S.; Srivastava, A.; Tiwari, G.N.; "Thermal Performance of Double Hollow Wall/Roof". International Journal of Energy Research, Vol. 3 N° 4, p.p. 349-356, 1979.

16).- Spena, A.; "Air Solar Collecting Roof for a Low-Energy Sports-Hall Building". Commission of the European Communities, (Report) EUR 9437. Publ.

by Reidel Publ. Co., Dordrecht, Neth and Boston, Ma., USA, p.p. 448-454, 1984.

17).- Rudd, A.; "Description of an Indoor Test Facility for Evaluating a Roof Integrated Cooling Concept". American Soc. of Mechanical Engineers (ASME), New York, p.p. 219-223, 1990.

18).- Bauman, F.S.; Place, J.W.; Andersson, B.; Thorton, J.; Howard, T.C.; "Experimentally Measured Performance of a Linear Roof Aperture Daylighting System". ASHRAE, Transactions, p.p. 259-278, Atlanta, Ga., 1987.

19).- Givoni, B.; "Solar Heating and Night Radiation Cooling by a Roof Radiation Trap". Energy and Buildings, V. 1, N° 2, p.p. 141-145, oct. 1977.

20).- Chen, Chiow-Horng; Krokosky, E.M.; "Steady and non Steady Solar Heat Transmission Through Roofs". Materiaux et Constructions, Materials and Structures, V. 9, N° 49, p.p. 19-32, jan-feb 1976.

21).- Sodha, M.S.; Govind; Bansal, P.K.; Kaushik, S.C.; "Reduction of Heat Flux by a Flowing Water Layer Over an Insulated Roof". Building and Environment, V. 15, N° 2, p.p 133-140, 1980.

22).- Chen, Bing; Kasher, John; Maloney, John; Guenther, Raymond; Sloup, Charles; Hopkins, Brian; Kratochvil, Jay; Bourne, Richard C; "Evaluation and Testing of the Nebraska Modified Roof Pond for Severe Heating and Cooling Environments". Pergamon Press, New York, p.p. 476-480, 1986.

23).- Sodha, M.S.; Singh, U.; Kumar, A.; Tiwari, G.N.; "Effect of Using a Reflecting Sheet in an Air Gap on The Thermal Performance of Hollow Walls and Roofs". Applied Energy, V. 8, N° 1, p.p. 67-78, mar. 1981.

24).- Permiakov, S.I.; Mazhevnikov, B.S.; Tabunshchikov, Y.A.; "Effective Types of Roofs Designed for Hot Climate Conditions". Int. Symp. on Roofs and Roofing (ISRR), Proc, Brighton, Sussex, Engl., V. 2, pap. 47, 4 p., Sponsored

by Soc. of Chem. Ltd, London, Engl., 1974.

25).- Shih, Jason C.; Fairey, Philip W.; "Experimental Analysis of Ventilated Walls and "Ice House" Roofs in Warm Climates" Architectural Science Review, p.p. 73-76, Baton Rouge, La., 1987.

26).- Aguirre, J.; Sámano, D.A.; Morales, J.D.; Alvarez, G.S.; Vázquez, B.; "Estudio de Techos y Paredes de Edificios Construidos para Escudar la Radiación Solar". Proyecto N° IN-01-45-89, patrocinado por DGAPA-UNAM, Temixco, Morelos, 1990.

27).- Sámano, D.A.; Alvarez, G.S.; Vázquez, B.; Morales, J.D.; "Estudio Experimental y Numérico del Flujo de Aire en Techos y Paredes de Edificios Construidos para Operar en Forma Pasiva". Proyecto N° P220CCOR 892381, patrocinado por CONACyT, Temixco, Morelos 1990.

28).- Rohsenob and Choi, Heat Mass and Momentum Transfer. Prentice Hall, 1961.

29).- Sámano, D.A. Conducción de Calor Bidimensional en Estado Cuasiperiódico en Placa Plana. Tesis Doctoral, para la obtención del grado en Ingeniería, DEPI, UNAM 1989.

ANEXO A

GRAFICAS DEL EXPERIMENTO

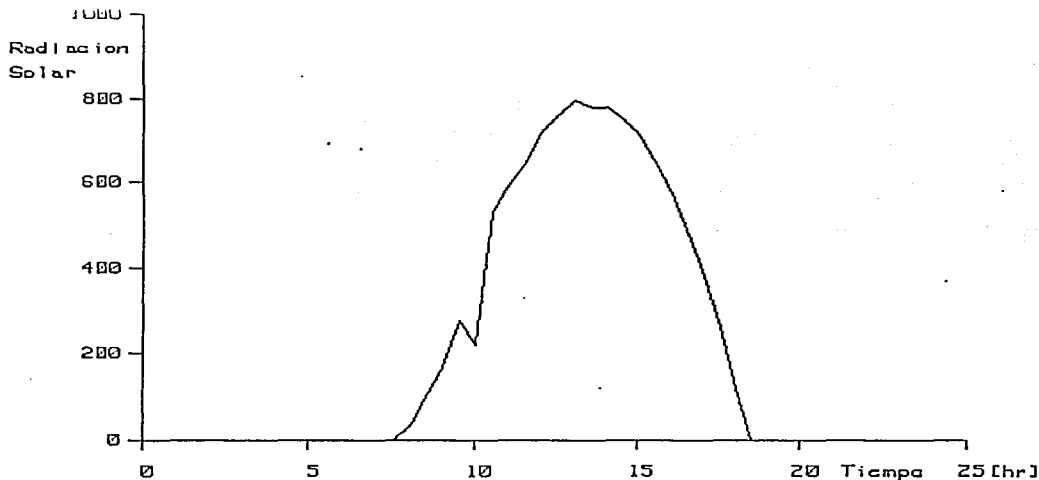


FIGURA A 1a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 14 DE ENERO DE 1991.

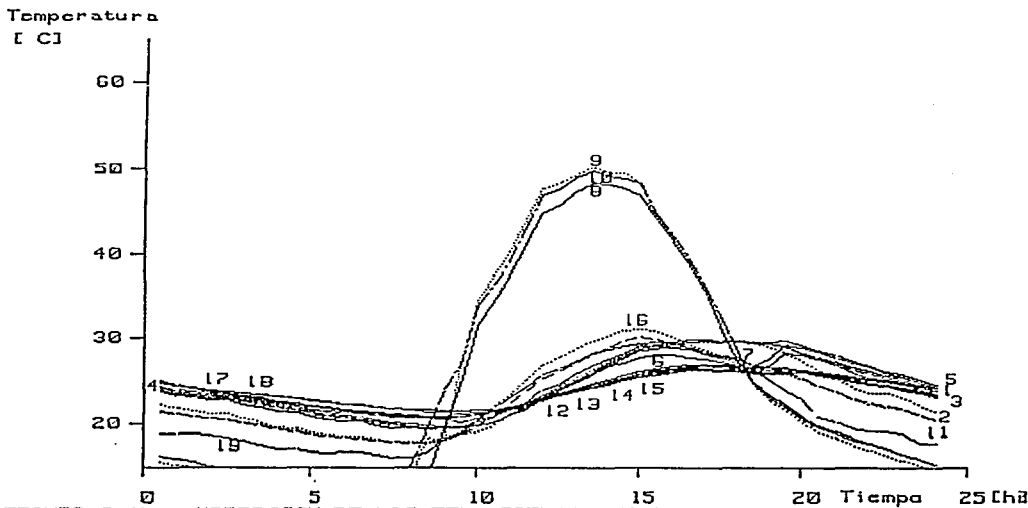


FIGURA A 1b.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 14 DE ENERO DE 1991.

Temperatura

[C] 35

30

25

20

15

10

0

5

10

15

20

25

Tiempo [hr]

FIGURA A 1c.- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 14 DE ENERO DE 1991.

[%]

100

Humedad
Relativa

80

60

40

0

5

10

15

20

25

Tiempo [hr]

FIGURA A 1d.- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 14 DE ENERO DE 1991.

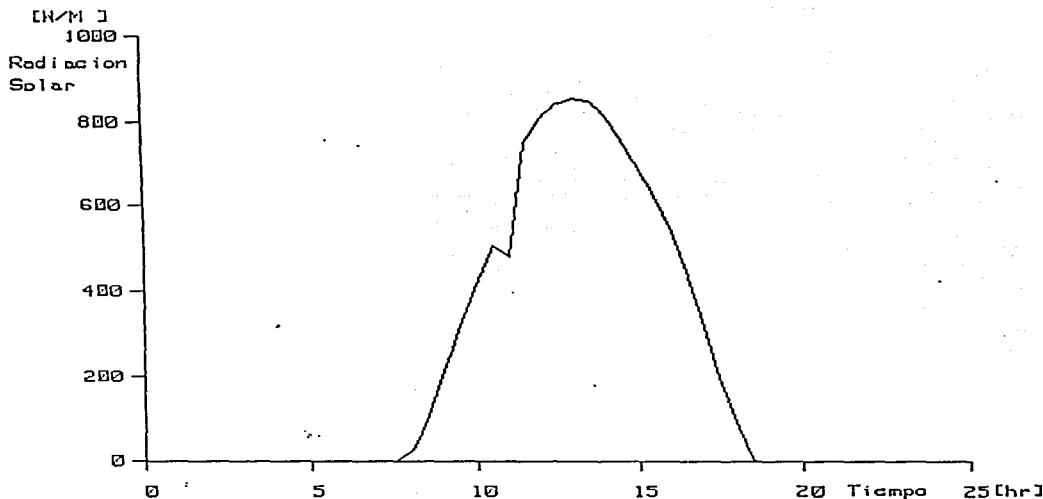


FIGURA A 2a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 12 DE FEBRERO DE 1991.

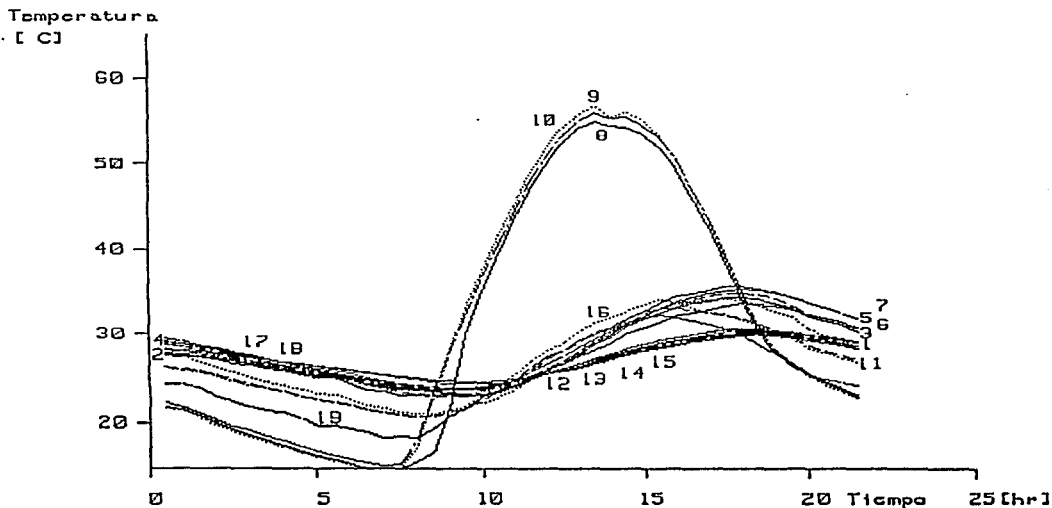


FIGURA A 2b.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 12 DE FEBRERO DE 1991.

Temperatura
[C]

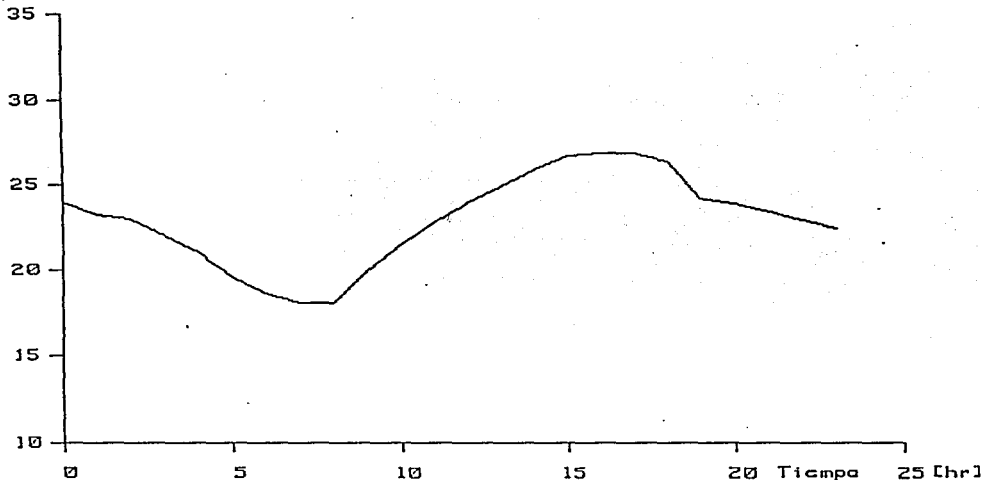


FIGURA A 2a.- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 12 DE FEBRERO DE 1991.

[%]
Humedad
Relativa

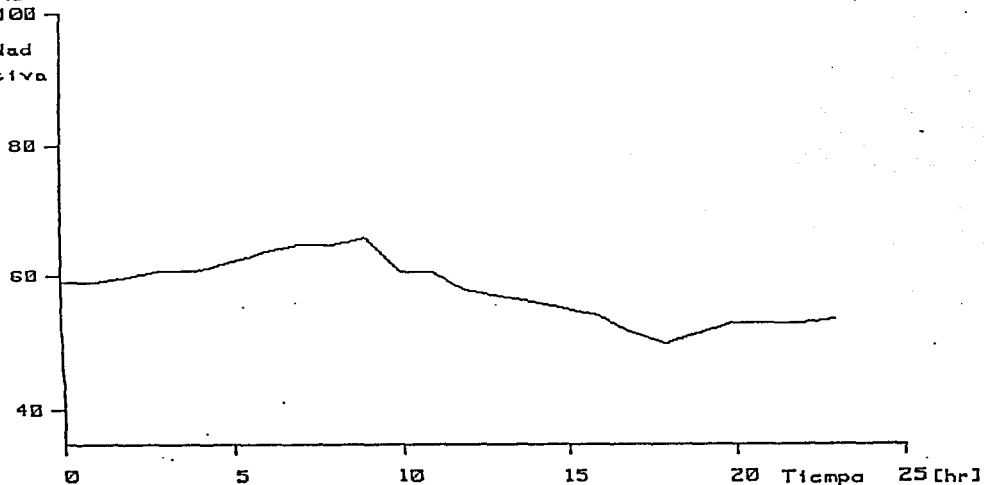


FIGURA A 2d.- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE "TECHO ESCUDO" DURANTE EL DIA 12 DE FEBRERO DE 1991.

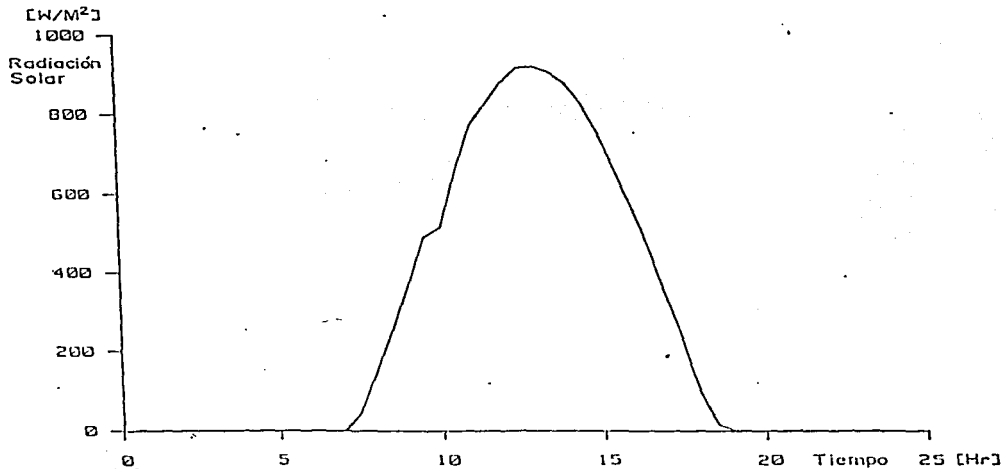


FIGURA 5.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 7 DE MARZO DE 1990.

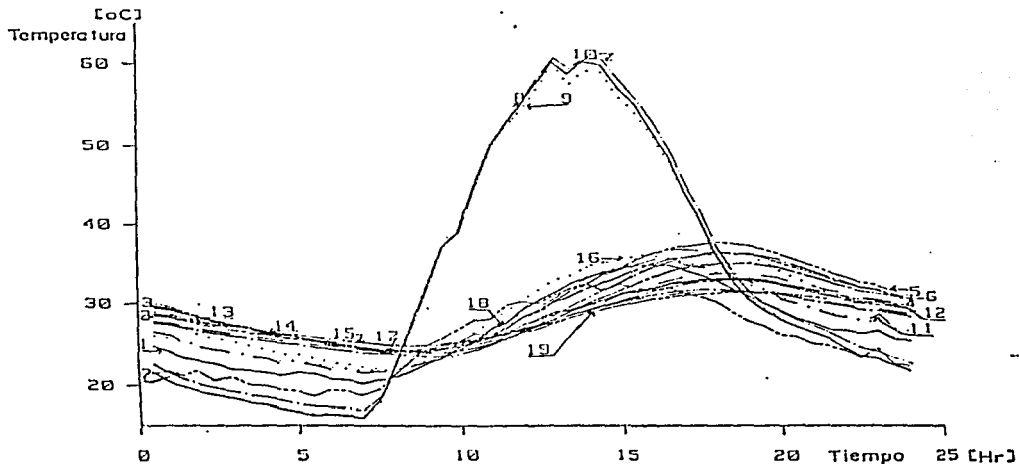


FIGURA 6.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 7 DE MARZO DE 1990.

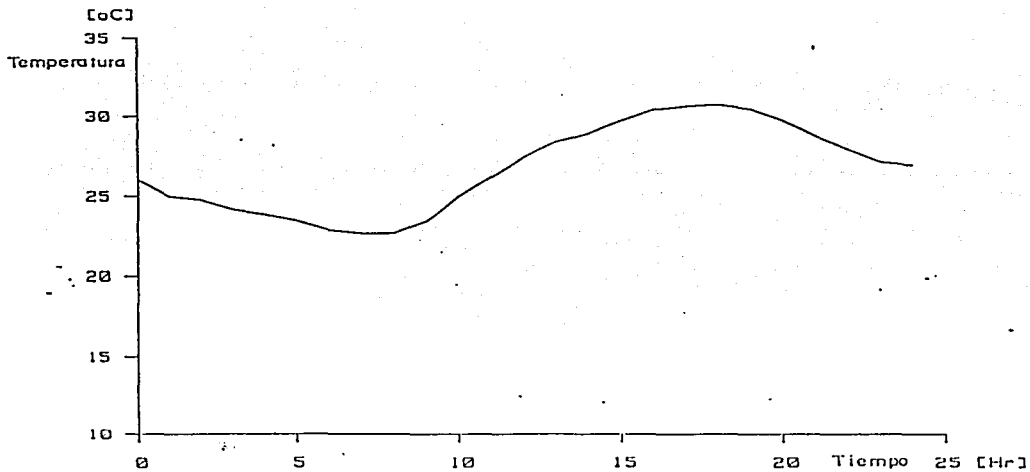


FIGURA 6.7.- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 7 DE MARZO DE 1990.

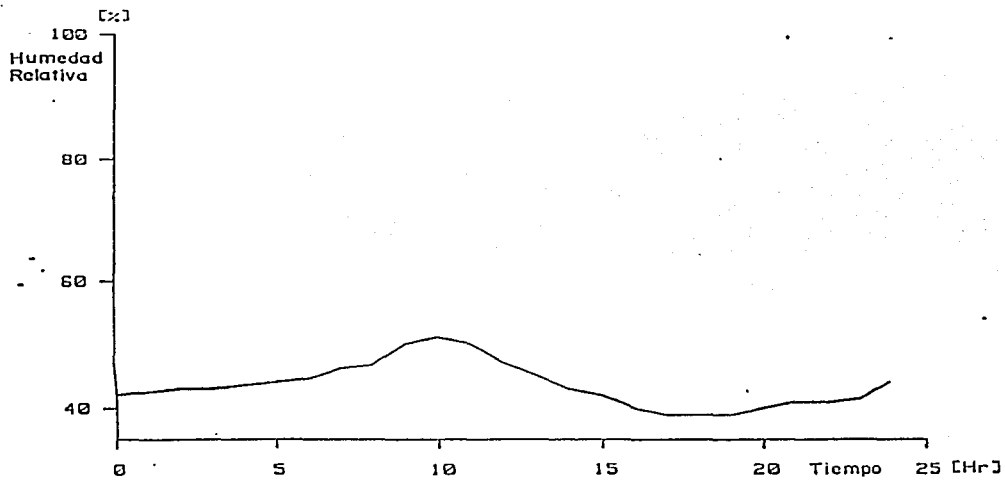


FIGURA 6.8.- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA. CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 7 DE MARZO DE 1990.

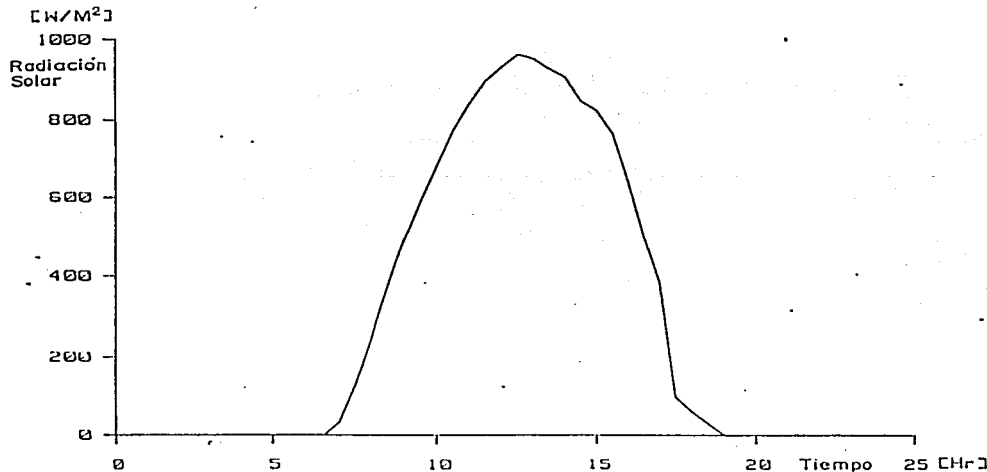


FIGURA C.9 - VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 8 DE ABRIL DE 1990.

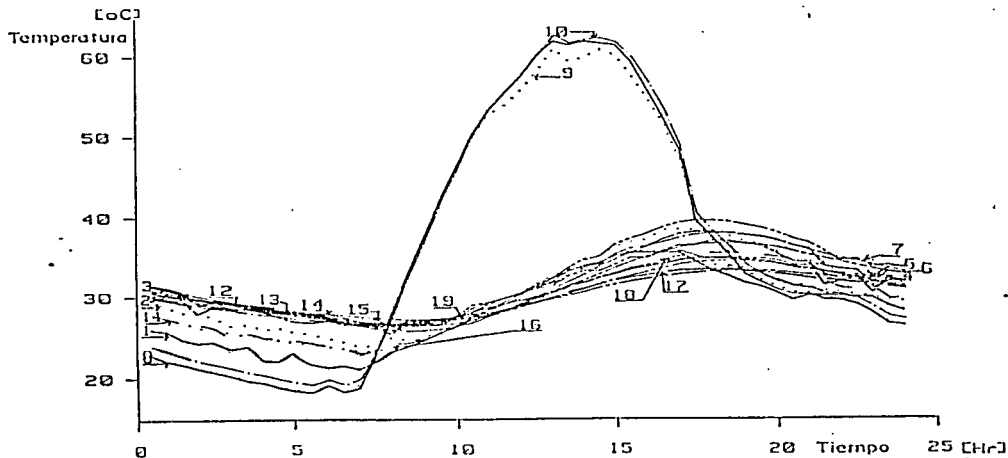


FIGURA C.10 - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 8 DE ABRIL DE 1990.

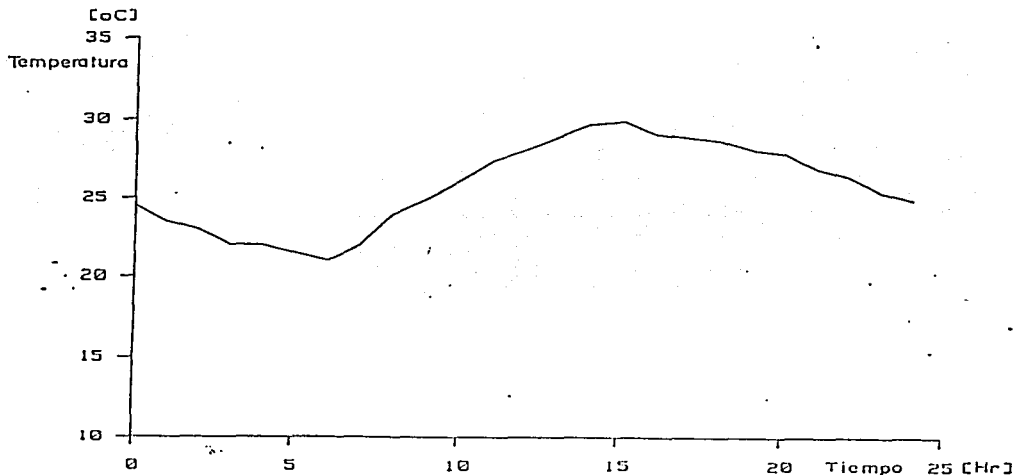


FIGURA 6.11 - VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 8 DE ABRIL DE 1990.

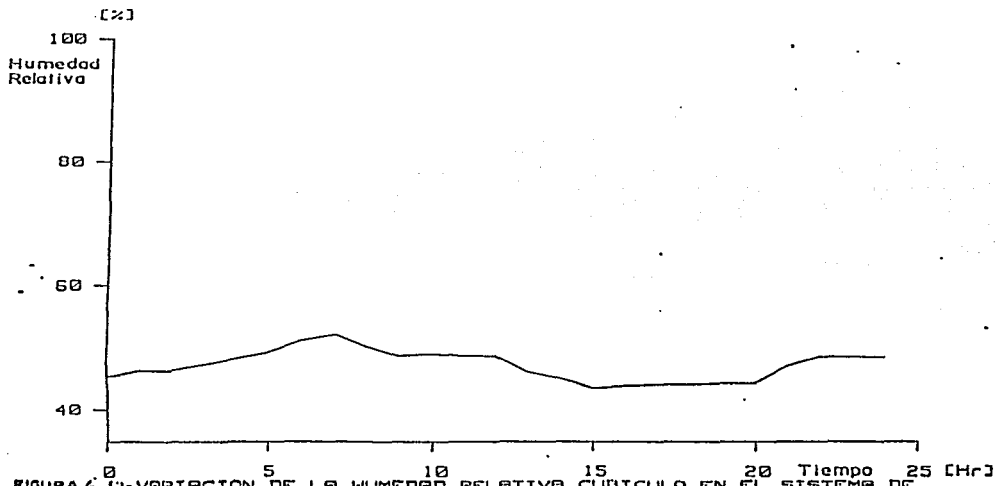


FIGURA 6.12 - VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 8 DE ABRIL DE 1990.

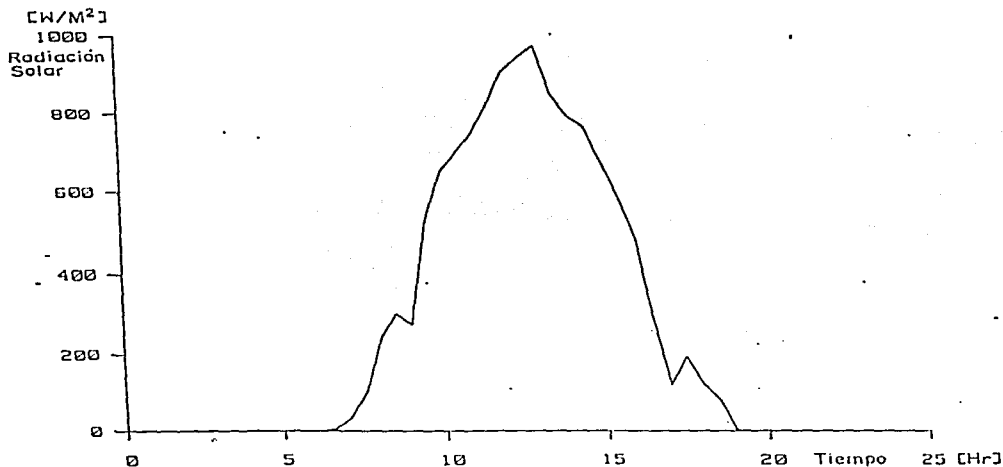


FIGURA A5a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE MAYO DE 1990.

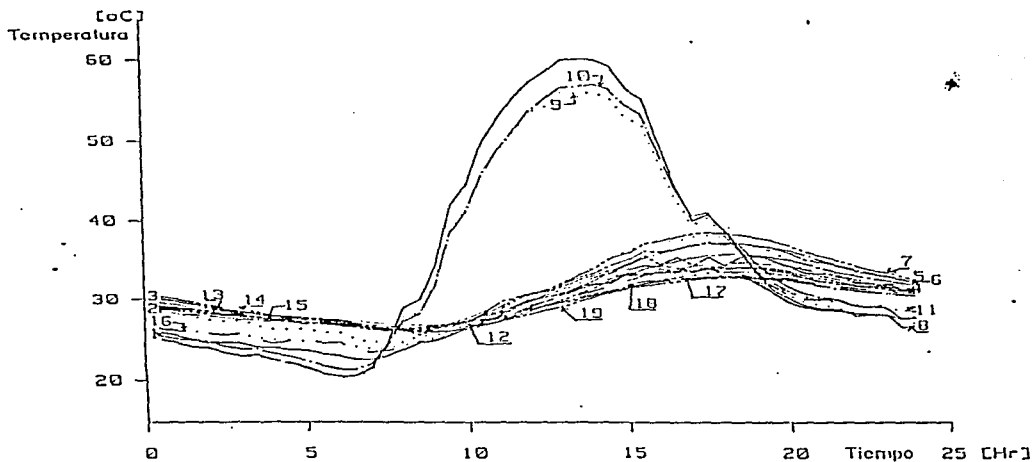


FIGURA A5b.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE MAYO DE 1990.

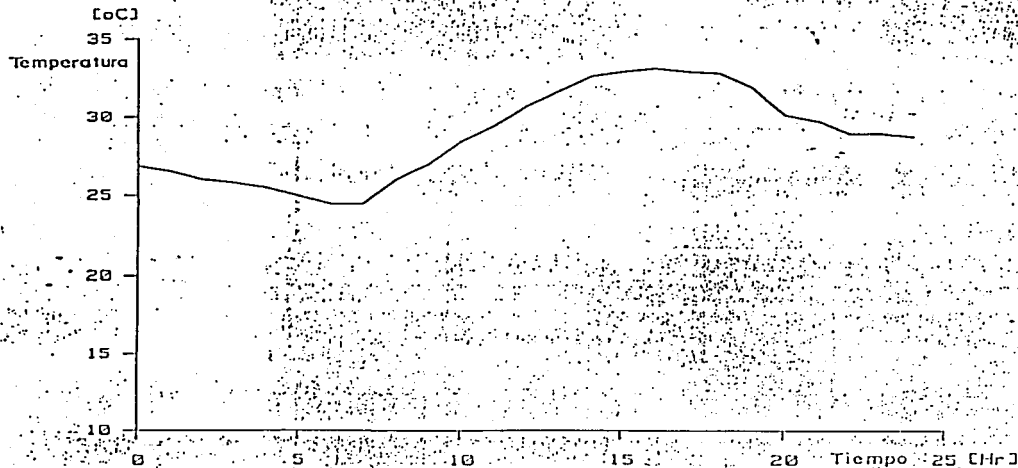


FIGURA A56- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCURO DURANTE EL DIA 10 DE MAYO DE 1990.

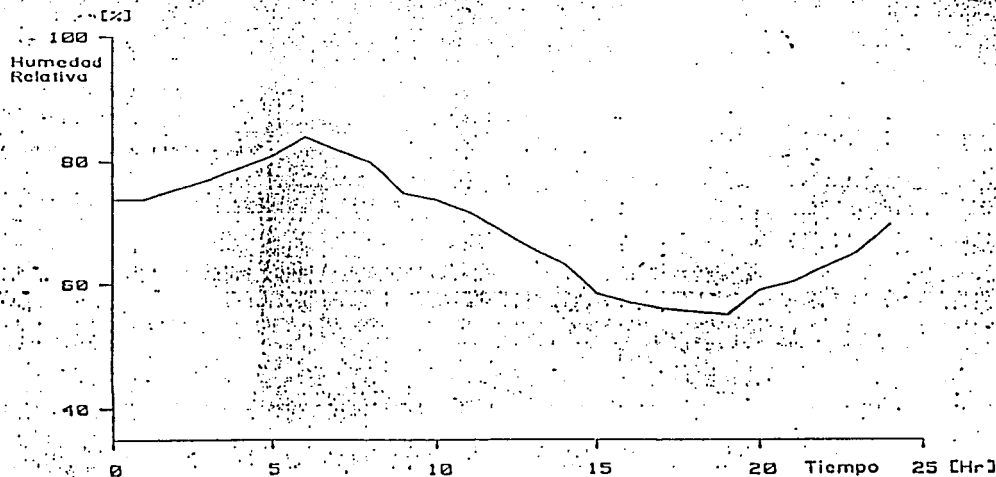


FIGURA A57- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCURO DURANTE EL DIA 10 DE MAYO DE 1990.

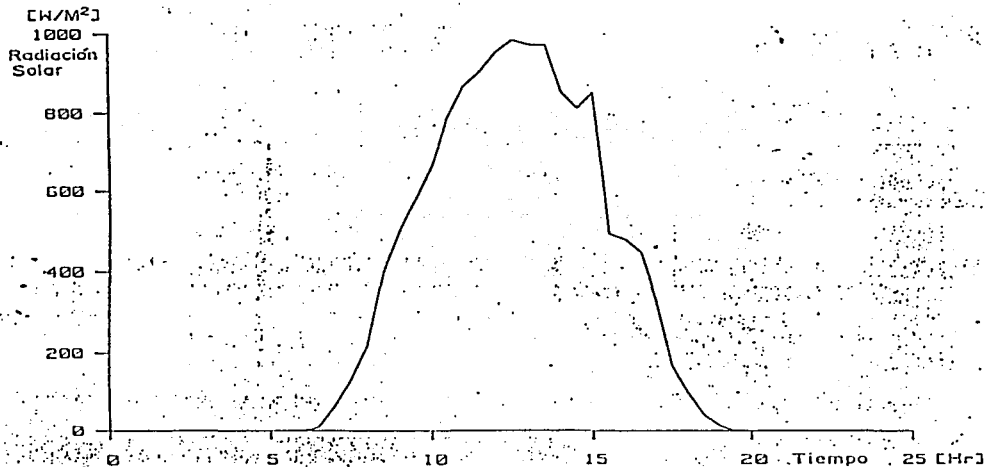


FIGURA A6a - VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO OSCURO DURANTE EL DIA 10 DE JUNIO DE 1990.

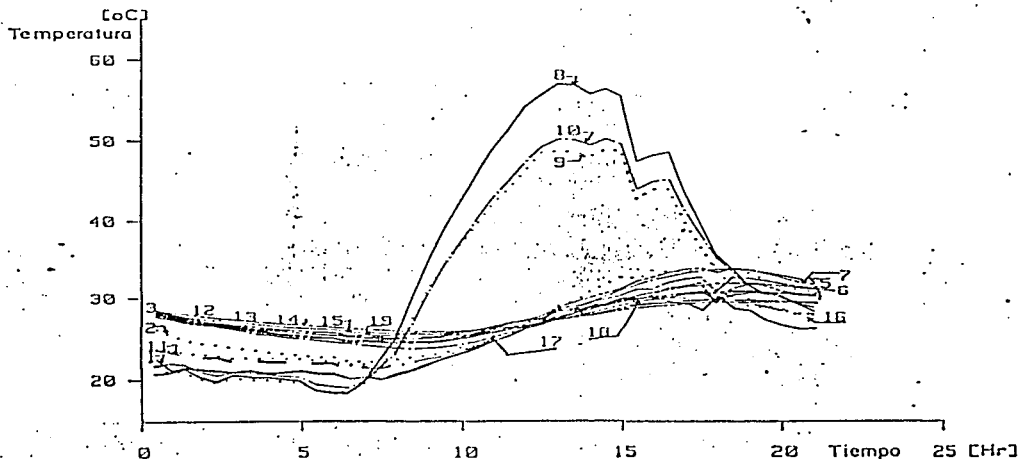


FIGURA A6b - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO OSCURO DURANTE EL DIA 10 DE JUNIO DE 1990.

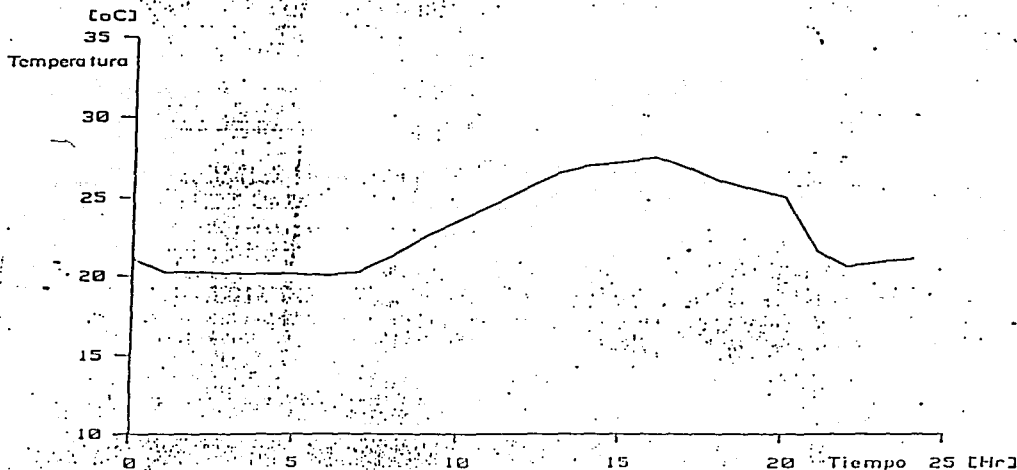


FIGURA A6c- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JUNIO DE 1990.

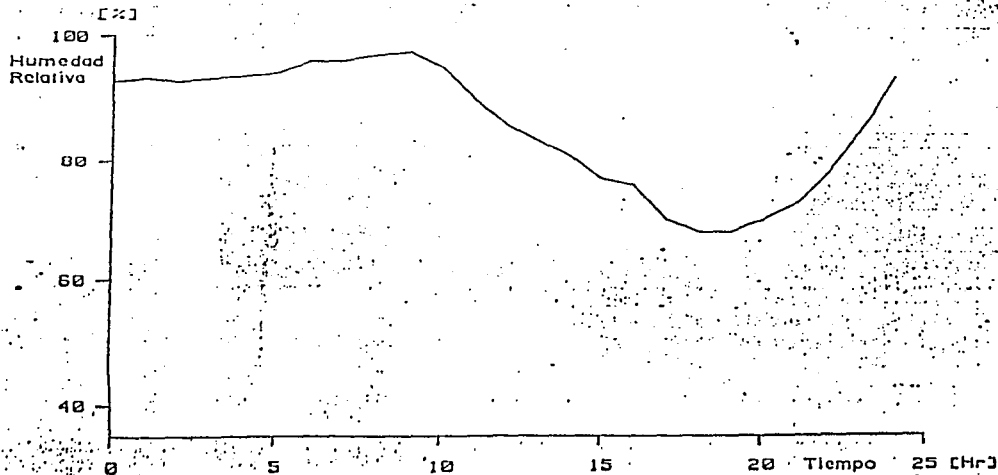


FIGURA A6d- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JUNIO DE 1990.

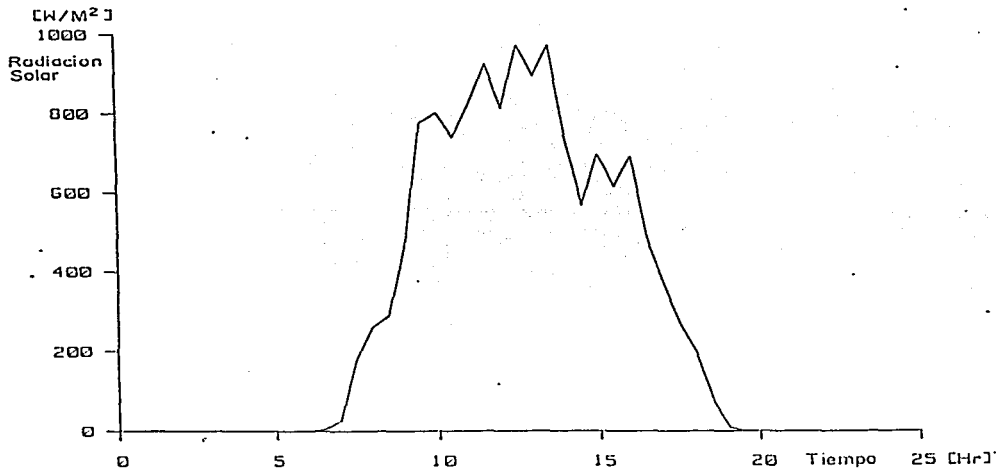


FIGURA A 7a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JULIO DE 1990.

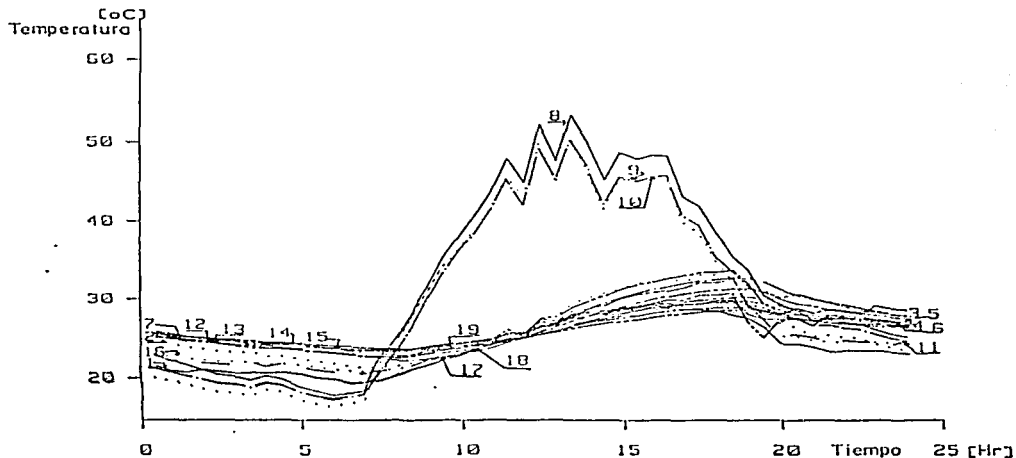


FIGURA A 7b .- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JULIO DE 1990.

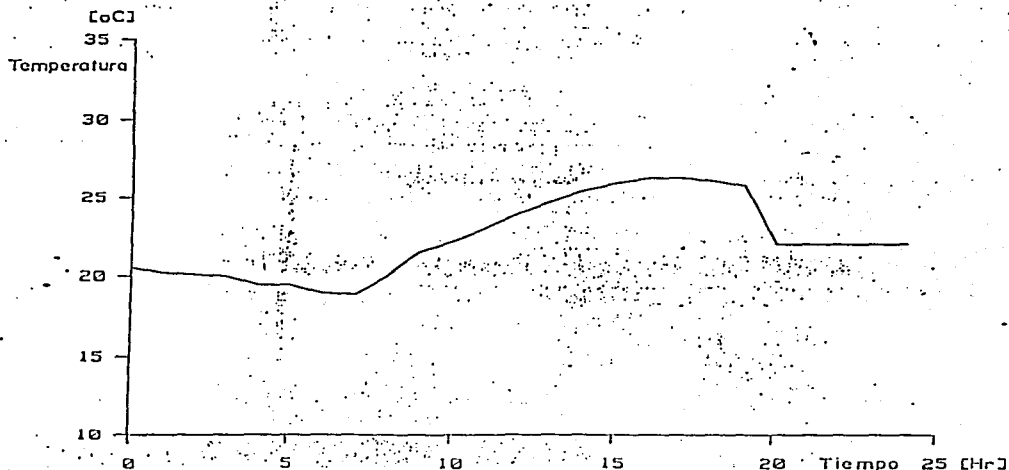


FIGURA A7c.- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JULIO DE 1990.

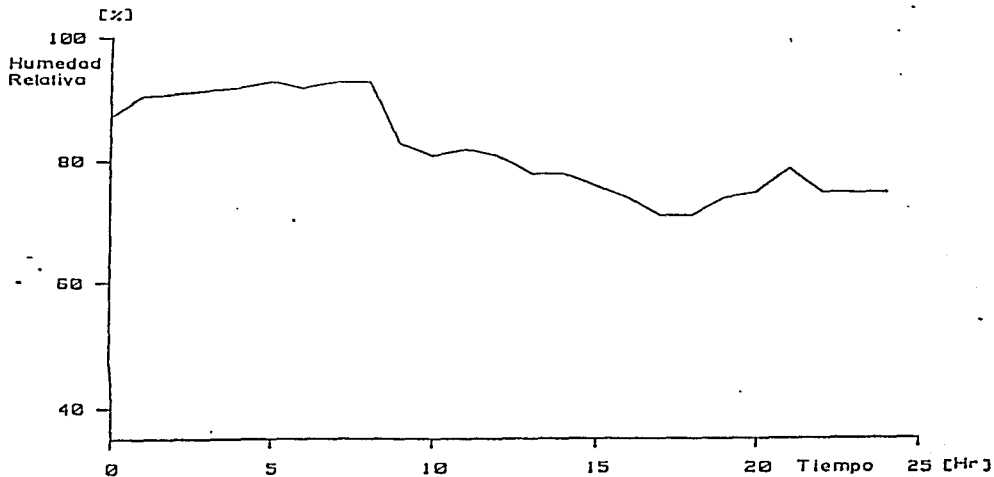


FIGURA A7d.- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 10 DE JULIO DE 1990.

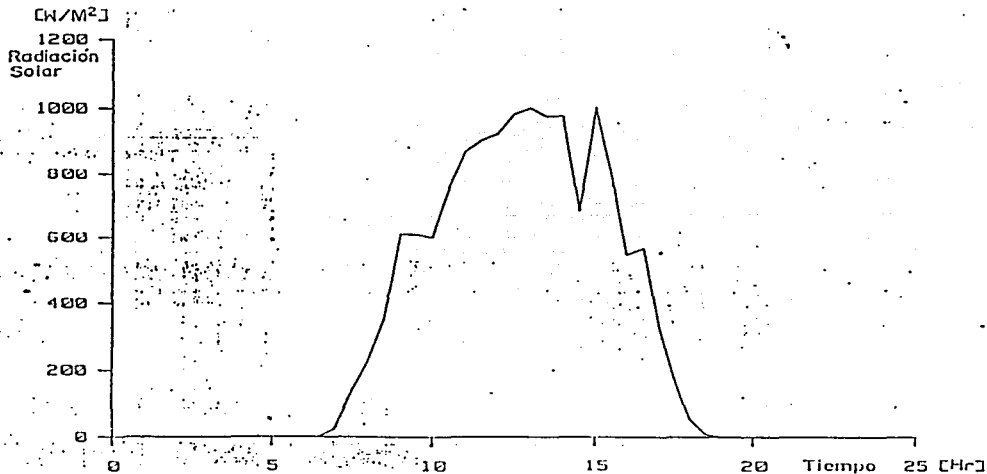


FIGURA A0a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE AGOSTO DE 1990.

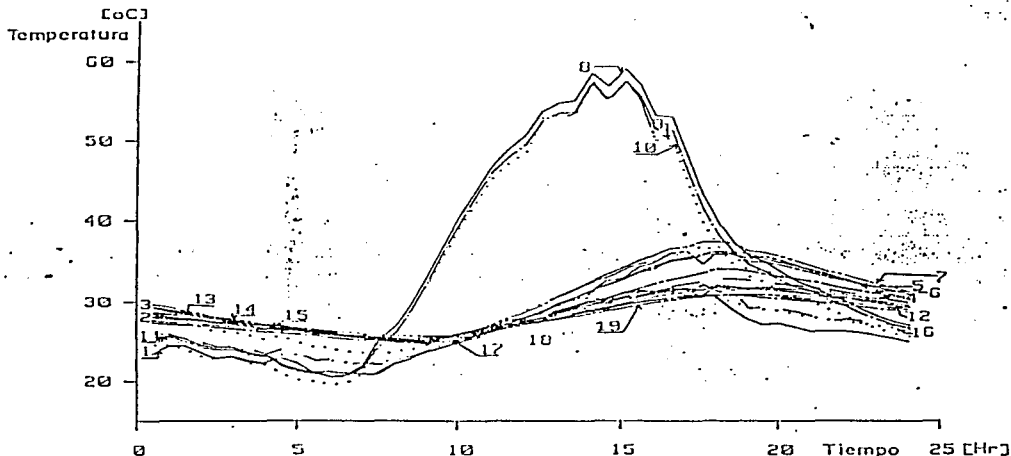


FIGURA A0b.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE AGOSTO DE 1990.

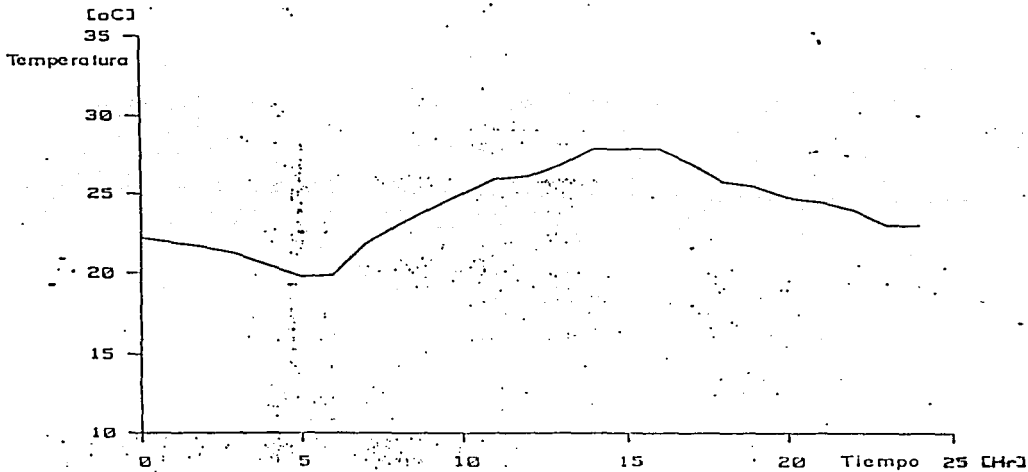


FIGURA A0c- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE AGOSTO DE 1990.

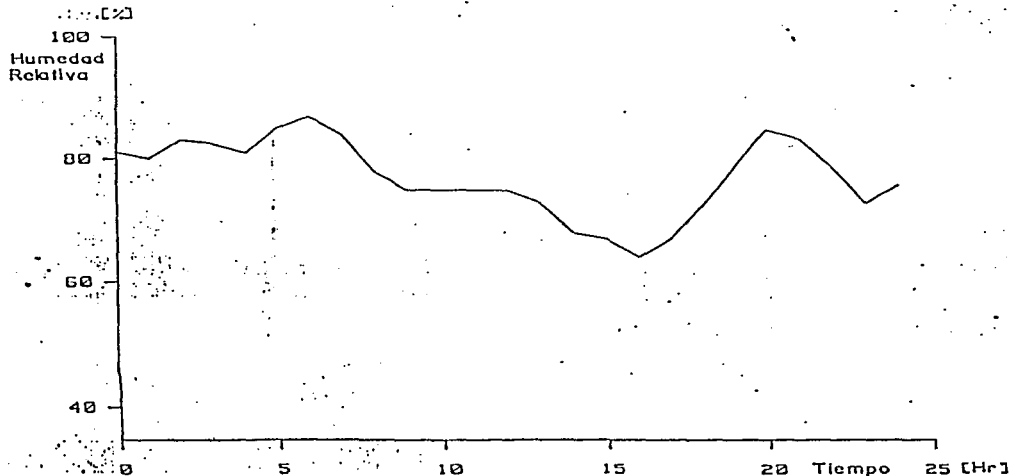


FIGURA A0d- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE AGOSTO DE 1990.

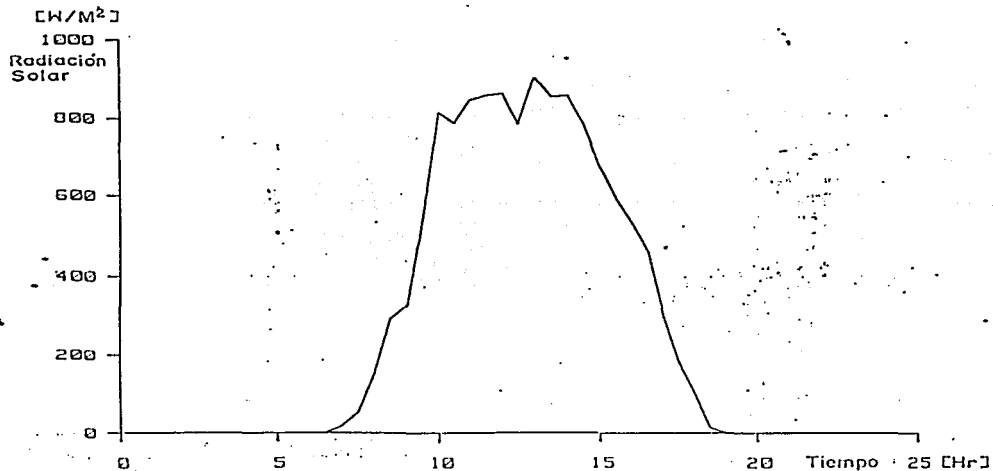


FIGURA A9a - VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE SEPTIEMBRE DE 1990.

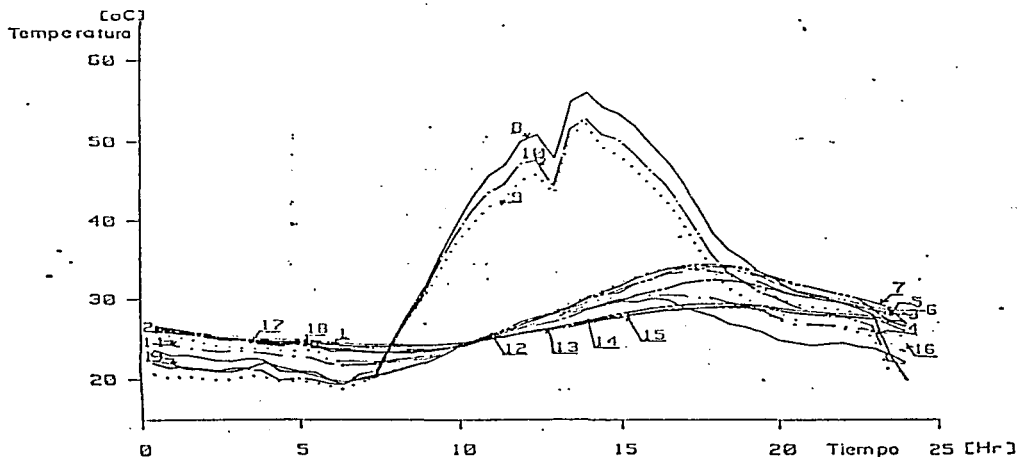


FIGURA A9b - VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE SEPTIEMBRE DE 1990.

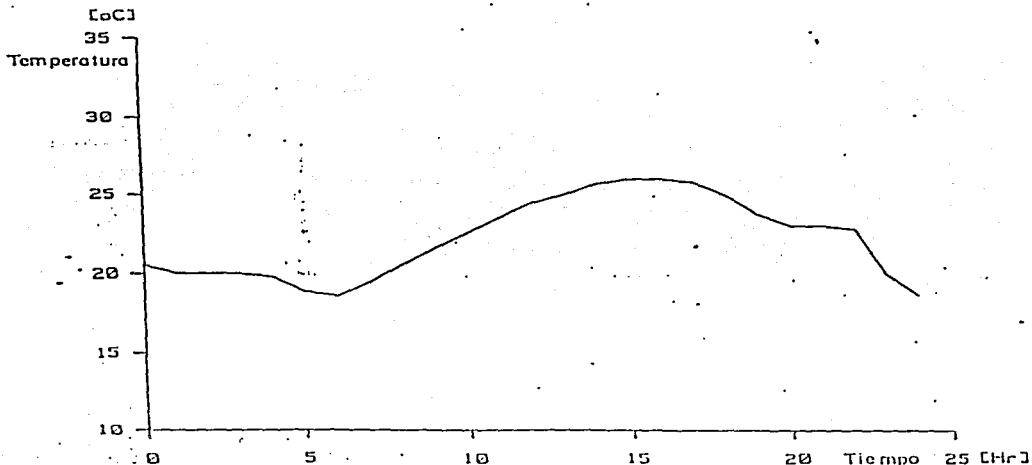


FIGURA A96-VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE SEPTIEMBRE DE 1990.

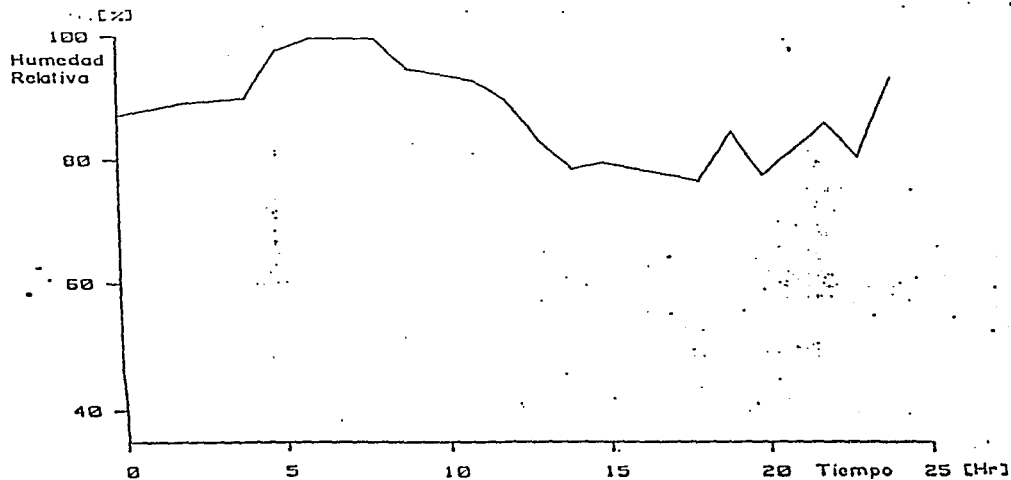


FIGURA A96-VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE SEPTIEMBRE DE 1990.

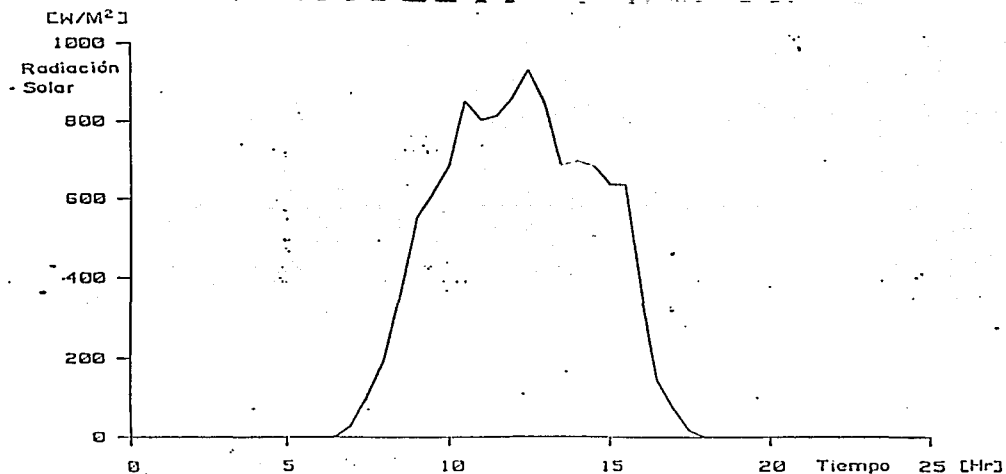


FIGURA A10a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 16 DE OCTUBRE DE 1990.

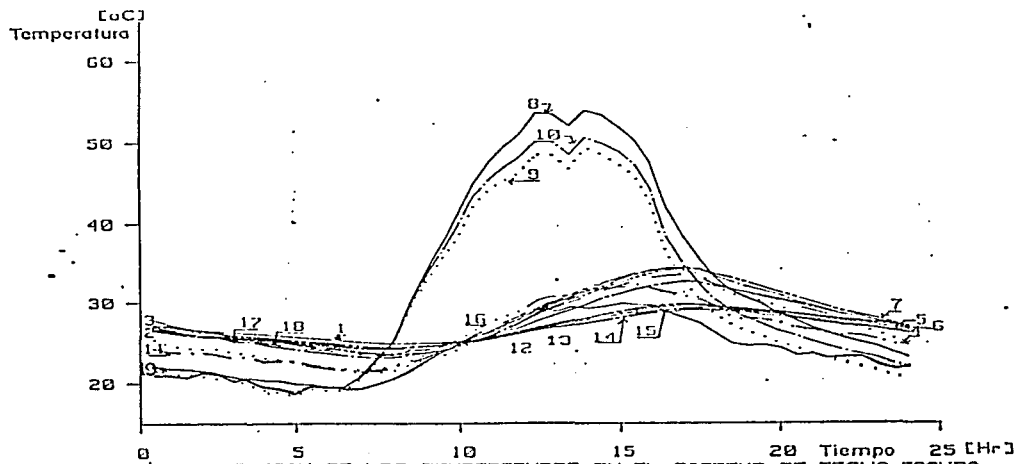


FIGURA A10b.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 16 DE OCTUBRE DE 1990.

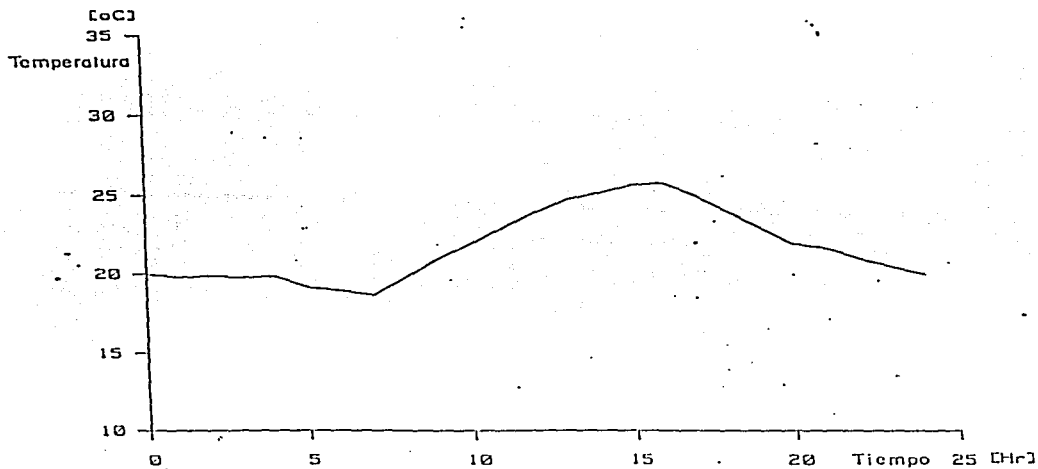


FIGURA A10c- VARIACION DE LA TEMPERATURA CUDICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 16 DE OCTUBRE DE 1990.

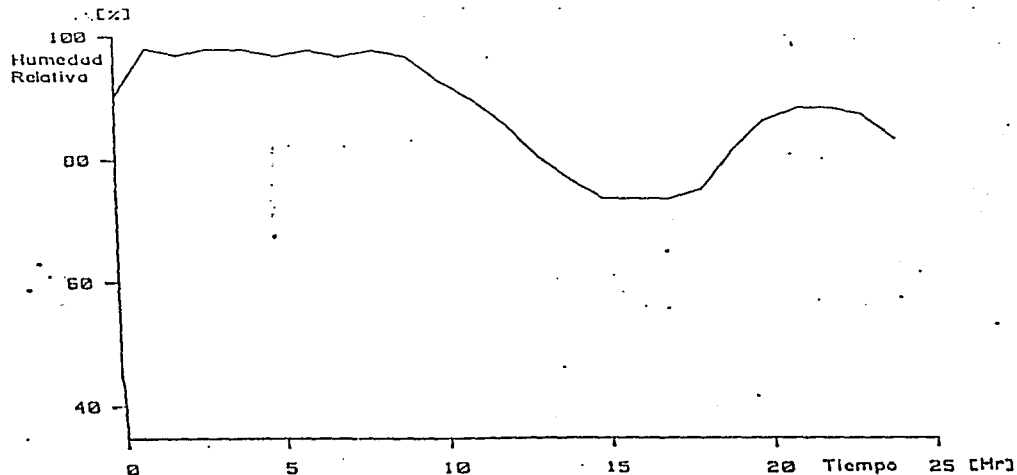


FIGURA A10d- VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUDICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 16 DE OCTUBRE DE 1990.

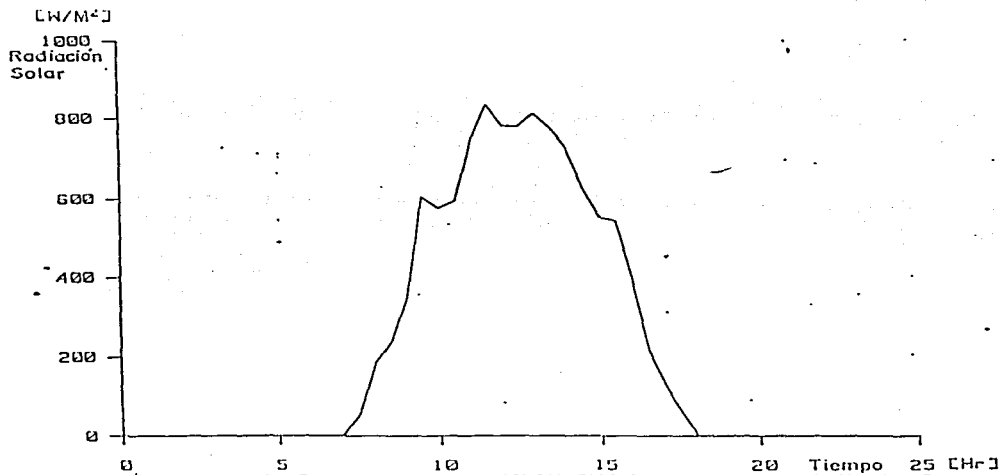


FIGURA A.III.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE NOVIEMBRE DE 1990.

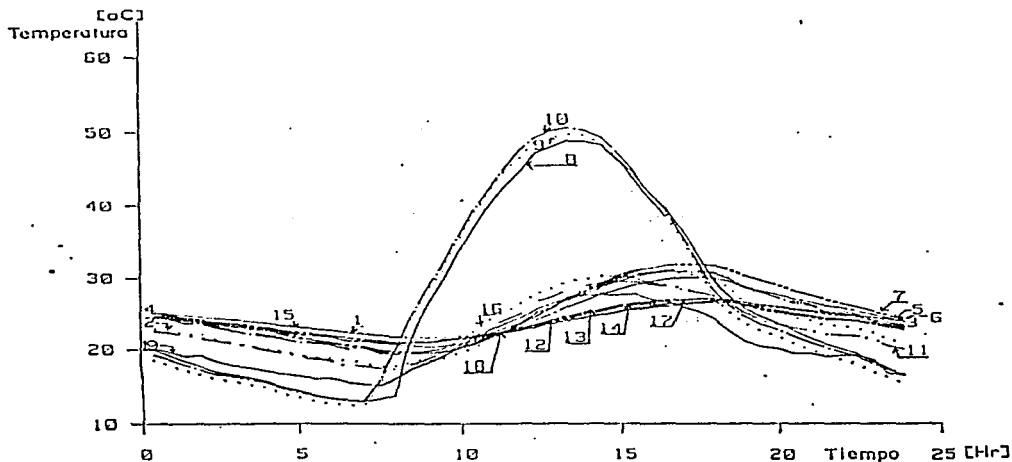


FIGURA A.IV.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE NOVIEMBRE DE 1990.

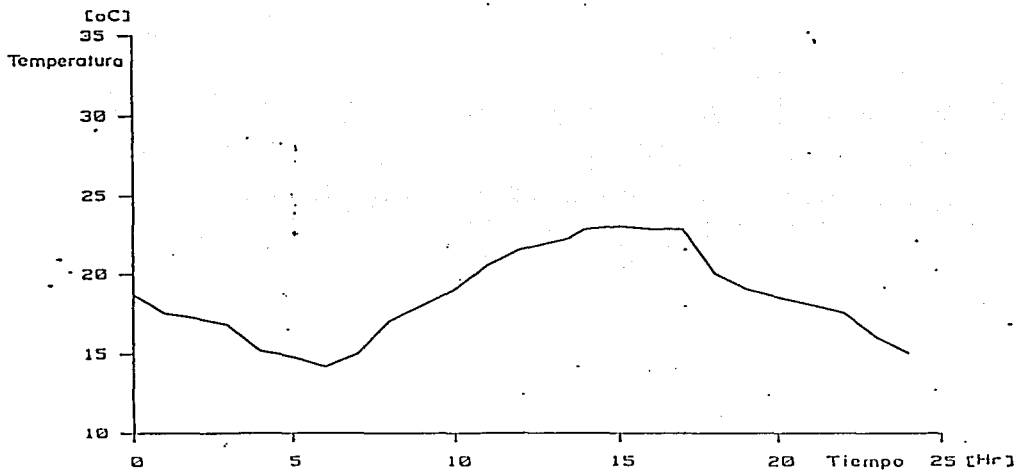


FIGURA A116-VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE NOVIEMBRE DE 1990.

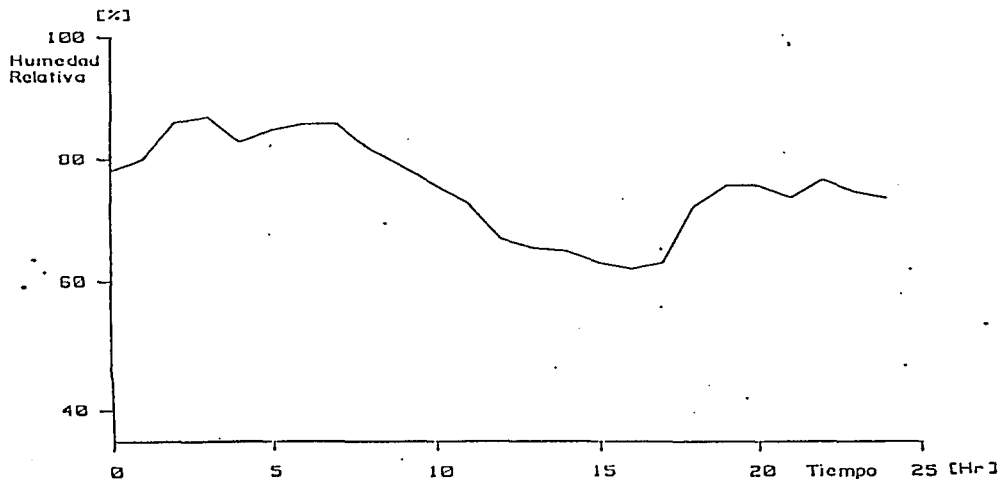


FIGURA A117-VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 11 DE NOVIEMBRE DE 1990.

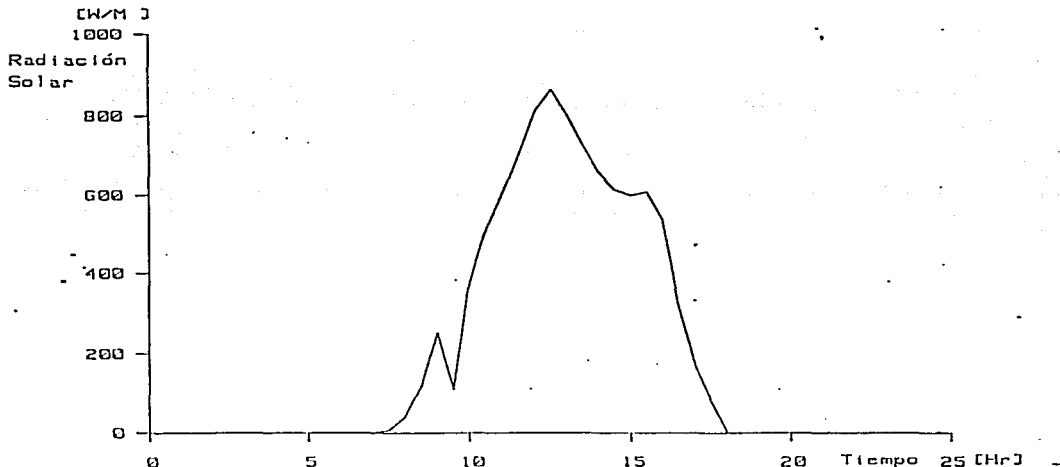


FIGURA A12a.- VARIACION DE LA RADIACION SOLAR QUE INCIDE EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

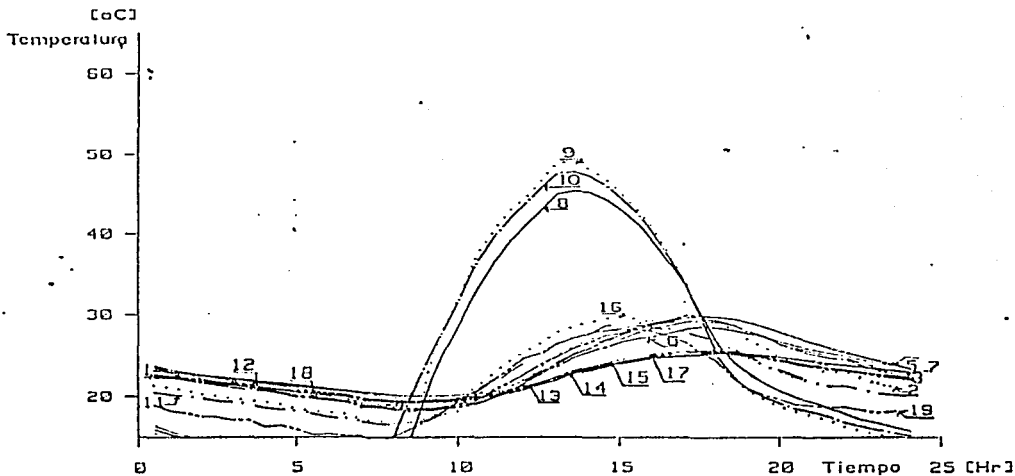


FIGURA A12b.- VARIACION DE LAS TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

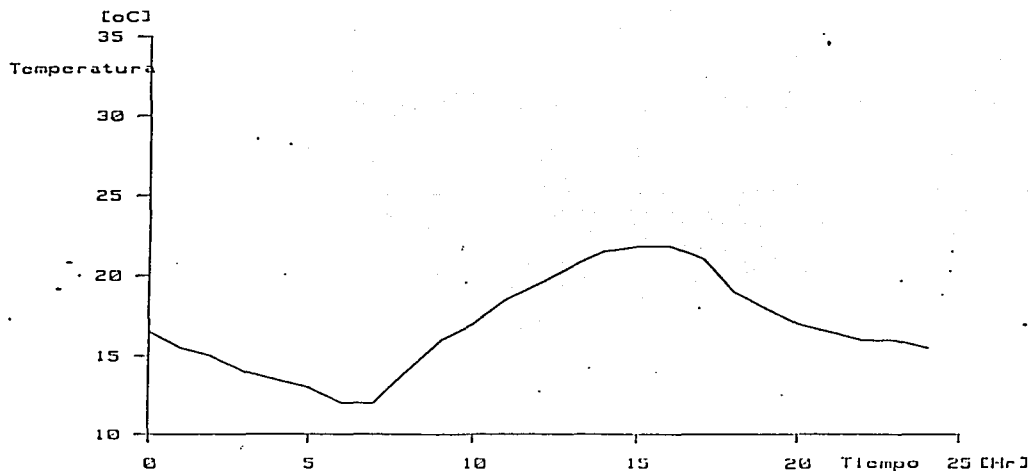


FIGURA A12c-VARIACION DE LA TEMPERATURA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

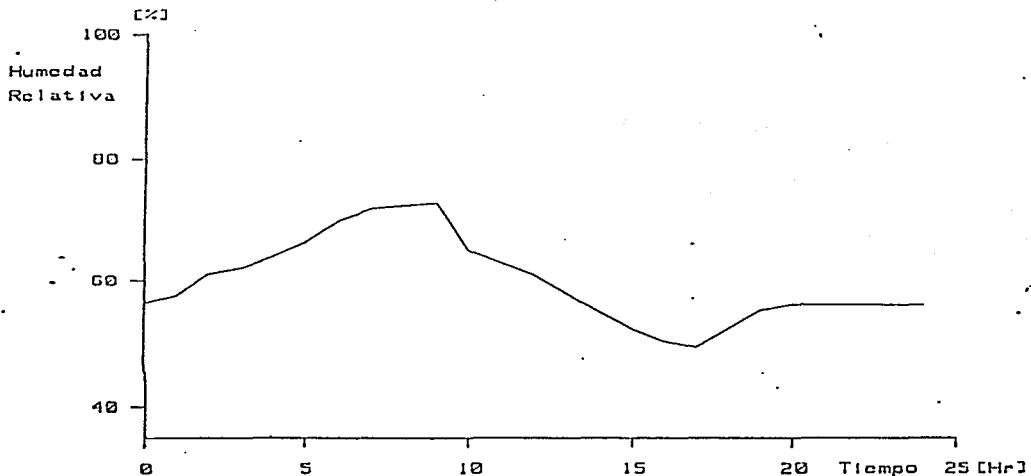


FIGURA A12d-VARIACION DE LA HUMEDAD RELATIVA CUBICULO, EN EL SISTEMA DE TECHO ESCUDO DURANTE EL DIA 14 DE DICIEMBRE DE 1990.

ANEXO B

DESCRIPCION DE LA INSTRUMENTACION EMPLEADA EN LOS EXPERIMENTOS

Para poder efectuar las lecturas de temperaturas en las paredes del "Techo Escudo" así como radiación solar y temperatura ambiente, descritas en el capítulo 5, se usaron unos cables especiales llamados termopares, los cuales están basados en el efecto que se produce cuando dos alambres compuestos de metales distintos se unen por ambas puntas y uno de los extremos se calienta. Esto produce una corriente continua la cual fluye en el circuito termoelectrico. Este descubrimiento lo hizo Thomas Seebeck en 1821. (Figura B.1)

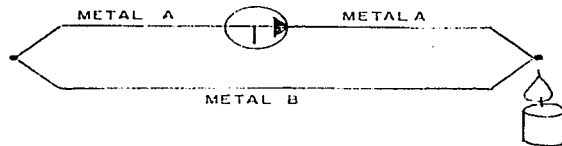


FIGURA B.1.- El Efecto Seebeck

Si este circuito se rompe en el centro, el circuito abierto de voltaje (el voltaje Seebeck) es una función de la temperatura en la unión y la composición de los dos metales.

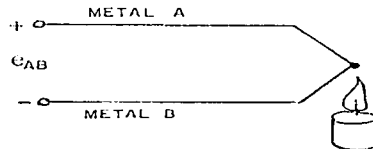


FIGURA B.2.- e_{AB} = voltaje Seebeck

Todos los metales distintos exhiben este efecto, aunque la combinación que se emplea comunmente para efectuar la lectura de temperaturas en los fenómenos de transferencia de calor es la de cobre-constantan.

Para cambios pequeños en la temperatura el voltaje Seebeck es linealmente proporcional a la temperatura:

$$e_{AB} = \alpha T$$

Donde α , (el coeficiente Seebeck), es la constante de proporcionalidad.

MEDICION DEL VOLTAJE DEL TERMOPAR.

No se puede medir el voltaje Seebeck directamente porque se debe primero conectar un voltímetro al termopar, y el voltímetro crea un nuevo circuito termoeléctrico.

Conectando un voltímetro a través de un termopar cobre-constantan (tipo T) y viendo el voltaje de salida: se desearía que el voltímetro leyera solo V_1 (Figura B.3), pero por conectar el voltímetro en un intento para medir la salida de la unión J_1 , se ha creado dos uniones metálicas más: J_2 y J_3 . Ya que J_3 es una unión cobre-cobre y por lo tanto no crea un circuito térmico ($V_3 = 0$), pero J_2 es una unión cobre-constantan la cual agregará un circuito (V_2) en oposición a V_1 .

La lectura de voltaje resultante V será proporcional a la diferencia de temperaturas entre J_1 y J_2 . Esto indica que no se puede encontrar la temperatura en J_1 a menos que se encuentre primero la temperatura de J_2 .

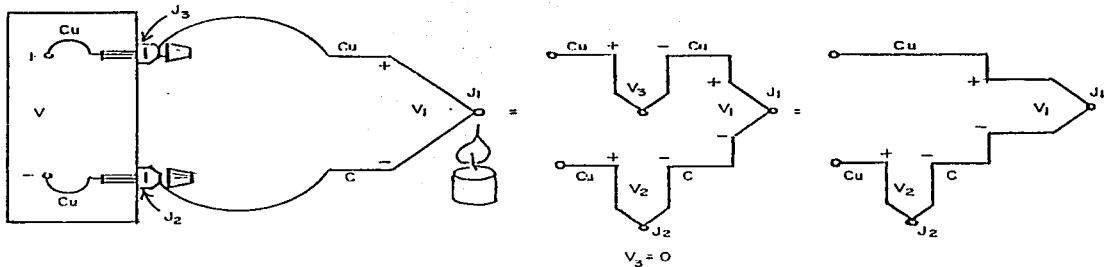


FIGURA B.3.- Medición del voltaje de unión con un voltímetro

Una manera de determinar la temperatura de J_2 es poner físicamente la unión dentro de un baño de hielo, forzando a que la temperatura sea 0°C y se establezca J_2 como la unión de referencia. Ya que ambas uniones son ahora cobre-cobre, ello no creará una corriente térmica y la lectura V en el voltímetro es proporcional a la diferencia de temperaturas entre J_1 y J_2 .

Ahora la lectura del voltímetro es (figura B.4):

$$V = (V_1 - V_2) \cong \alpha (T_{J1} - T_{J2})$$

Si se especifica T_{J1} en grados celcius:

$$T_{J1} (^{\circ}\text{C}) + 273.15 = t_{j1} (^{\circ}\text{k})$$

Entonces V es igual a:

$$V = V_1 - V_2 = \alpha [(T_{J1} + 273.15) - (T_{J2} + 273.15)] = \alpha (T_{J1} - T_{J2}) = \alpha (T_{J1} - 0)$$

$$V = \alpha T_{J1}$$

Se usa esta derivación para enfatizar que la unión de salida en el baño de hielo, V_2 , no es cero volts. Está en función a una temperatura absoluta.

Agregando voltaje a la unión de referencia en el punto de hielo, se tiene ahora referenciada la lectura V a 0 °C.

Este método es muy usado porque la temperatura del punto de hielo puede ser controlada con precisión. El punto de hielo lo usa la Oficina Nacional de Normas (NBS) como el punto de referencia fundamental para sus tablas de termopares.

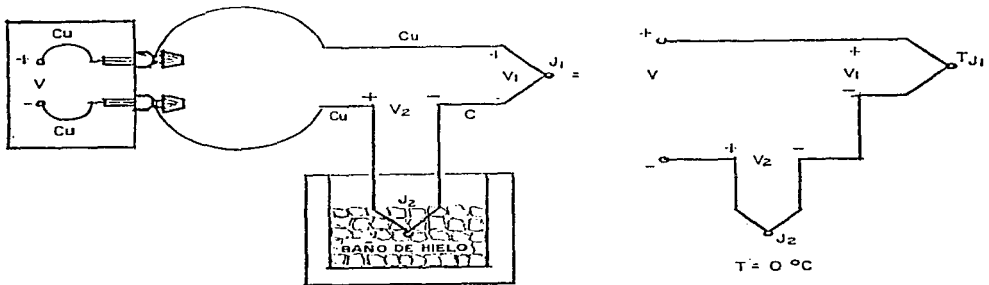


FIGURA B.4. - Unión de Referencia Externo.

La temperatura de referencia en baño de hielo se puede reemplazar por medio de un block isotérmico (figura B.5).

El nuevo block es una temperatura de referencia T_{REF} , y ya que están a la misma temperatura se puede otra vez mostrar que:

$$V = \alpha (T_1 - T_{REF})$$

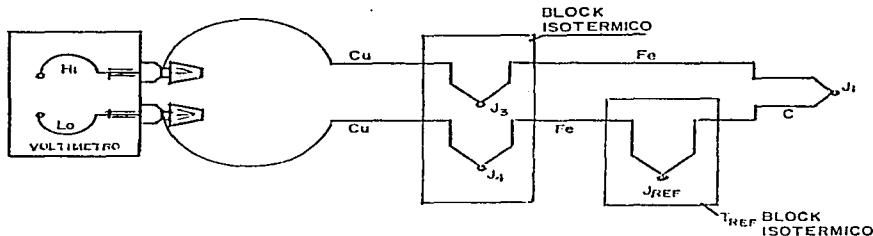


FIGURA B.5.- Eliminación del Baño de Hielo

Este es, todavía, un circuito inconveniente porque se tiene que conectar dos termopares. Se puede eliminar el alambre de hierro en el polo negativo (Lo) combinando la unión Cu-Fe (J_1) y la unión Fe-C (J_{REF}).

Esto se puede hacer uniendo primero los dos bloques isotérmicos (figura B.5b).

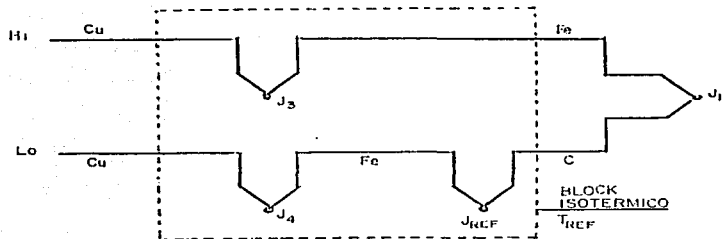
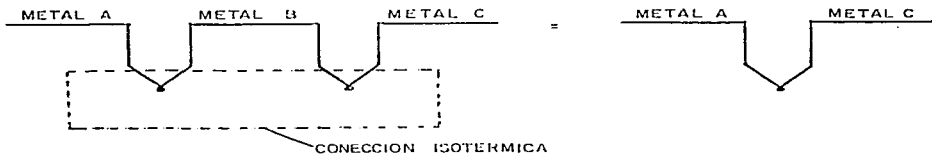


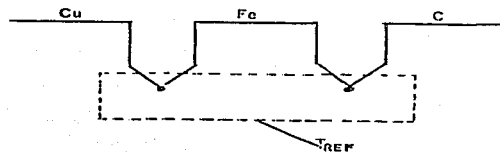
FIGURA B.5b.- Unión de los Bloques Isotérmicos

No se ha cambiado el voltaje de salida V . Este todavía permanece
 $V = \alpha (T_{J1} - T_{JREF})$

Ahora se puede hacer uso de la ley de metales intermedios para eliminar la unión extra. Esta "Ley" empírica establece que un tercer metal (en este caso hierro) insertado entre los dos metales diferentes de la unión termopar no afectarán al voltaje de salida ya que las dos uniones formadas por el metal adicional no están a la misma temperatura:



Así la ley mostrada en la Figura B.5b:



Se convierte en:

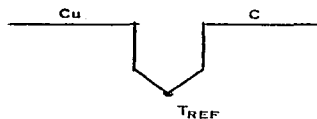


FIGURA B.6. - Ley de Metales Intermedios

Con esto se elimina completamente la necesidad del alambre de fierro (Fe) en el polo L_o:

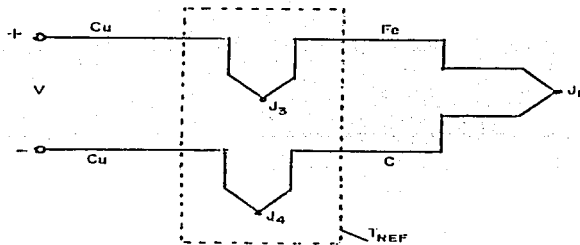


FIGURA B.7. - Circuito Equivalente

Otra vez, $V = \alpha (T_{J1} - T_{REF})$, donde α es el coeficiente Seebeck para un termopar Fe-C.

Las uniones J3 y J4 toman el lugar del baño de hielo. Estas dos uniones se transforman en la unión de referencia.

El siguiente paso lógico es medir directamente la temperatura del block isotérmico (la unión de referencia) y usar la información para registrar la temperatura desconocida, T_{J1} .

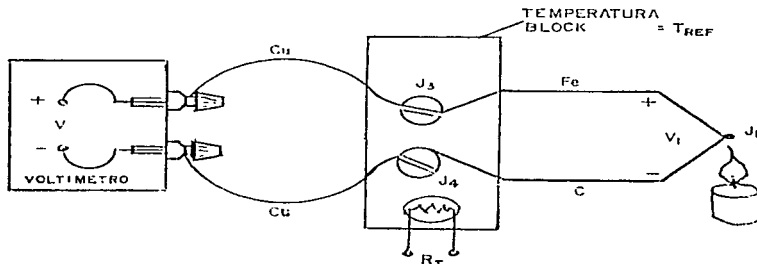


FIGURA B.8. - Unión Externa de Referencia - Sin Baño de Hielo

Un termistor, cuya resistencia R_t es una función de la temperatura, provee de una manera de medir la temperatura absoluta de la unión de referencia. Las uniones J3 y J4 y el termistor se asume que están a la misma temperatura, debido al diseño del Block isotérmico. Usando un multímetro digital bajo control del sistema de computo, simplemente:

- 1) Se mide R_t para encontrar T_{REF} y convertir T_{REF} en su equivalente unión de voltaje de referencia, V_{REF} .
- 2) Se mide V y se resta V_{REF} para encontrar V_i , y convertir V_i en temperatura T_{Ji} .

Este procedimiento se conoce como compensación de software porque se realiza por medio del software de una computadora para compensar el efecto de la unión de referencia, y es el que se usó en el caso de la presente tesis usando un sistema de adquisición de datos HP 3421 A al cual se le conectaron directamente los veinte termopares, provenientes de los puntos indicados en las paredes del "Techo Escudo" mostrados en la figura 5.2 del capítulo 5.

Para efectuar la lectura se elaboró un programa en el que se estableció un contador con el objeto de que cada cinco minutos se lean los canales 19 y 20 (temperatura ambiente y radiación solar) este lapso se estableció para tener un valor representativo de estas dos variables, ya que en días nublados se registran cambios continuos en la radiación solar recibida, por lo tanto el programa hace, cada media hora, una integración de los valores tomados cada cinco minutos, obtiene un valor medio y es el que registra con los otros 18 valores en este segundo lapso.

El sistema descrito está comandado por una computadora personal HP 150, en la cual se lleva a cabo la ejecución del programa. La información obtenida se almacena en diskettes de 3.5"; una vez que se satura el diskette, la información se transfiere al centro de computo, por medio de un puerto que se tiene conectado a la HP 9000, para procesar la información e imprimirla en

gráficas y tablas, (figura B.9).

Para obtener la radiación solar se utilizó un piranómetro marca Kipp, el cual mide la radiación solar por medio de una termopila protegida del viento por dos cubiertas hemisféricas concéntricas de cristal, estas cubiertas tienen un espesor muy uniforme por lo que no causan ninguna interferencia en la distribución de la radiación solar sobre el detector. La radiación solar se lee en el sistema de adquisición de datos en W/m^2 directamente (figura B.9).

Finalmente, para medir la humedad relativa, se utilizó un Termohidrógrafo marca Rossbach, que se instaló en el interior del cubículo de prueba, el cual se calibró por medio de un termómetro patrón instalado durante un tiempo en una de las ventanas del mismo cubículo (figura B.10).

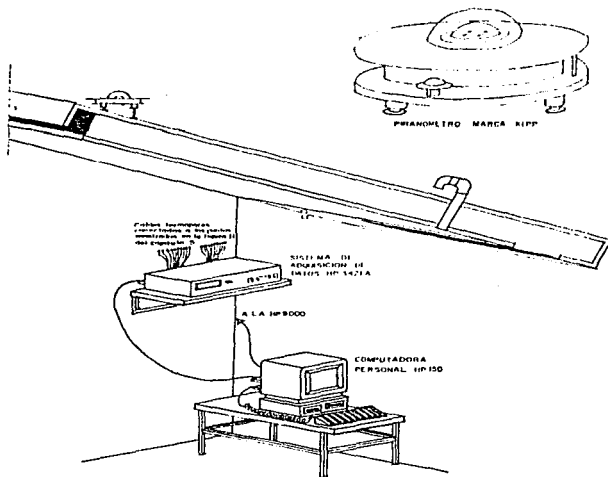


FIGURA B.9- INSTRUMENTACION EMPLEADA PARA MEDIR TEMPERATURAS Y RADIACION SOLAR.

ANEXO C

GLOSARIO DE TERMINOS

Absortancia.- Es una propiedad óptica superficial y se refiere al porcentaje de la radiación que absorbe dicha superficie.

Aproximación de Boussinesq.- Las ecuaciones que gobiernan exactamente los flujos por flotación, son difíciles de trabajar por lo que se hacía necesario tener una aproximación y la más simple que admite la flotación es la aproximación de Boussinesq. La cual se puede aplicar para líquidos o gases newtonianos y para temperaturas de cuarto, agua y aire.

Esta aproximación consiste en lo siguiente:

1).- La densidad se asume constante excepto cuando ésta es la causa directa de las fuerzas de flotación.

2).- Todas las propiedades del fluido se asumen constantes;

3).- La disipación de viscosidad se asume como despreciable.

El primer punto significa que la ecuación de continuidad tiene su forma incompresible y que la densidad se considera variable solo en el término gravitacional de la ecuación de momentum. Como consecuencia de esto, el fenómeno acústico no puede ser tratado.

Los otros puntos simplifican las ecuaciones de tal manera que la atención se enfoca en el efecto de flotación.

Calor Específico.- Cantidad de calor requerido para elevar un grado la temperatura de una masa dada de cualquier substancia, en relación a la

cantidad de calor requerido para elevar un grado la temperatura de una masa equivalente de una sustancia prototipo (usualmente el agua a 15 °C).

Coefficiente de Expansión Térmica.- Está basado en una propiedad termodinámica de los fluidos, y proporciona una medida por la cual los cambios en la densidad responden a los cambios en la temperatura a presión constante. Y se expresa de la siguiente manera:

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

Conductividad Térmica.- Velocidad de flujo de Calor a través de una unidad de área y unidad de espesor de un material homogéneo bajo un régimen permanente, cuando un gradiente de temperatura unitario se mantiene en dirección perpendicular al área. Un material se considera homogéneo cuando el valor de la conductividad térmica no se ve afectado por la variación de espesor, o en el tamaño de las muestras que se usan comúnmente en la construcción.

Constante de Stefan-Boltzman.- La energía radiante emitida por un cuerpo negro es un límite superior para la energía emitida por superficies reales y esta energía está en función de la temperatura.

Se ha mostrado experimentalmente que la energía total emitida por un cuerpo negro es:

$$e_{rB} = \sigma T^4$$

donde σ = Constante de Stefan-Boltzman = $5.6697 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$

T = Temperatura Absoluta en °K.

Y la energía radiante para cualquier otro cuerpo es:

$$e_r = \epsilon \sigma T^4$$

donde ϵ = emisividad del cuerpo. .

Convección de Calor.- La convección es un fenómeno combinado de transporte de calor por difusión aumentada por el movimiento de partículas en un fluido.

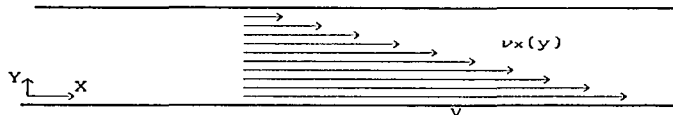
Convección Natural de Calor.- Se dá cuando el movimiento convectivo es debido a las diferencias de temperatura en el fluido.

Densidad.- Relación de la masa de una muestra de material de una substancia con el volumen de dicha muestra, la masa por la unidad de volumen de la substancia (peso por unidad de volumen).

Emitancia.- Es una propiedad optica superficial y se refiere al porcentaje de calor que emite por radiación un cuerpo comparado con el cuerpo negro que es el radiador ideal.

Estado Permanente.- Es el estado en el cual ya no se observa un cambio de las variables en el tiempo (velocidad, temperatura, presión etc.).

Fluido Newtoniano.- Son los fluidos (gases o líquidos) que cuando están contenidos entre dos placas paralelas, separadas por una distancia muy pequeña Y , y la placa inferior se mueve en la dirección X a una velocidad constante V . Alcanzan un perfil de velocidad en estado permanente de manera lineal como el que se muestra en la figura:



Laplaciano (∇^2).- El símbolo ∇ , conocido como "Nabla" o "Del", es un vector-operador, tiene componentes como un vector y no puede estar solo, debiendo operar sobre una función escalar, vectorial o tensorial.

Si s es una función escalar de las variables X_1, X_2, X_3 , y tomamos la divergencia del gradiente de esta función escalar s , obtenemos:

$$\begin{aligned} (\nabla \cdot \nabla s) &= \left\{ \left\{ \sum_i \delta_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right\} \cdot \left\{ \sum_j \delta_j \frac{\partial s}{\partial x_j} \right\} \right\} \\ &= \sum_i \sum_j \delta_i \delta_j \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial s}{\partial x_j} = \\ &= \left\{ \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} s \right\} \end{aligned}$$

La sumatoria de los operadores diferenciales, los cuales están operando en s en la última línea, están dados por el símbolo ∇^2 (Llamado Operador Laplaciano); en coordenadas rectangulares.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$$

El operador Laplaciano tiene una distribución apropiada solamente para el gradiente, la divergencia y el rizo.

Número de Fourier.- Está basado en la relación entre la proporción de conducción de calor y la proporción de almacenamiento de energía térmica en un sólido. En tiempo adimensional.

$$Fo = \frac{Ks}{\rho_s C_s w d^2}$$

Número de Grashof.- Es la relación entre la fuerza de flotación y las fuerzas de viscosidad.

$$Gr = \frac{g \Delta T \beta L^3}{\nu^2}$$

Número de Prandtl.- Es la relación entre el momentum molecular y la difusividad térmica.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

Número de Rayleigh.- Las capas de flotación en convección natural no se restringen a condiciones de flujo laminar, ya que pueden amplificarse perturbaciones en el flujo, conduciendo a una transición de flujo laminar a turbulento.

La transición de las capas de flotación en convección natural depende de la magnitud relativa de la flotación y de las fuerzas de viscosidad en el fluido, se acostumbra correlacionar este fenómeno en términos del número de Rayleigh que es el producto de los números de Grashof y de Prandtl.

$$Ra = Gr * Pr$$

Viscosidad.- Es la propiedad que tienen los fluidos para moverse con mayor o menor facilidad, de acuerdo a las fuerzas de rozamiento internas en el fluido.