

V/II/80

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO DE UN SISTEMA PASIVO DE CLIMATIZACIÓN SOLAR  
PARA ZONAS ÁRIDAS Y SEMI-ÁRIDAS DE MÉXICO.

SARA LILIA MOYÁ ACOSTA

INGENIERO QUÍMICO

1980

M-23734

EXAMENES  
ESTADUALES



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

PRESIDENTE ALEJANDRO ANAYA DURAND

V O C A L ANTONIO VALIENTE BARDERAS

Jurado asignado originalmente  
según el tema

SECRETARIO DOMINGO ALARCON ORTIZ

1er. SUPLENTE ROBERTO ANDRADE CRUZ

2do. SUPLENTE CLAUDIO A. AGUILAR MARTINEZ

Sitio donde se desarrolló  
el tema: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES (IIM-UNAM)

Nombre completo y firma del  
sustentante SARA LILIA MOYA ACOSTA

Nombre completo y firma del asesor del  
tema M.C. DOMINGO ALARCON ORTIZ

Nombre completo y firma del supervisor  
técnico M.C. EVERARDO A. HERNANDEZ HERNANDEZ

## INDICE

CAPITULO		página
	JUSTIFICACION	
1	INTRODUCCIÓN	1
11	GENERALIDADES	10
	-colectores solares	11
	-almacenamiento de calor solar	12
	-sal de Glauber	13
	-almacenamiento de calor latente conjugado con calefacción eléctrica	14
	-bombas de calor	15
	-colectores concentradores	17
	-refrigeración por absorción	18
	-sistemas de calefacción y refrigeración solar combinados	18
	-refrigeración por radiación nocturna	19
	-casa solar Trombe Michel: muro almacenador	20
	-casa número 1 de Thomason: depósito de agua	21
	-escuela secundaria de St. George, Wallasey: "pared solar"	21
	-laboratorios de sistemas integrados de mantenimiento de la vida	22
	-Solar Uno de la Universidad de Delaware: paneles electrotérmicos	23
	-resúmen	24
111	DISPONIBILIDAD DE LA ENERGIA	
	SOLAR EN MEXICO	27
	-radiación global, directa, y difusa	27
	-trayectoria diaria del sol	27
	-inclinación óptima del colector solar	28
	-radiación solar recibida directamente sobre planos verticales orientados hacia los cuatro puntos cardinales	28
	-regiones más favorecidas para la utilización de la energía solar	29
	-situación de México	30
	-distribución anual de la radiación solar global (promedio diario) en la República Mexicana	30
	-promedio anual del número de horas mensuales de insolación en la Rep. Mex.	30
	-consideraciones del uso de calefacción y refrigeración solar	32
	-"grados día" de calefacción	32

## CAPITULO

página

IV	SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACION SOLAR (SPCS)	33
	-elementos principales que constituyen los SPCS	33
	-consideraciones del transporte de energía del espacio climatizado	33
	-colector solar plano	34
	-unidad almacenadora de calor: real y latente	35
	-selección de la unidad almacenadora de calor	36
	-tipos de funcionamiento del muro almacenador	36
	-posibles intercambios de energía de los SPCS	37
	-sistemas pasivos, híbridos y activos	37
IV.a	CALENTAMIENTO PASIVO	38
	-características del colector: orientación e inclinación, localización relativa al resto de la estructura	38
	-muro Trombe	
	- Casa Steve Baer: "pared de agua"	39
	-sistema de Hay: "estanque de agua" en el techo	40
	-el método de liberación de energía al espacio: calentamiento directo, indirecto, y aislado	41
	-clasificación de los sistemas pasivos de calentamiento	42
IV.b	ENFRIAMIENTO PASIVO	43
	-posibles fugas ambientales de calor: espacio exterior, atmósfera, y suelo	43
	-tiraje térmico	43
	-mecanismos convectivos impulsores: chimeneas solares, torres de viento	44
	-acondicionamiento de aire sin uso de equipo electromecánico	44
	-disipaciones ambientales y mecanismos primarios envueltos en la transferencia de energía	45
	-clasificación de los sistemas pasivos de enfriamiento	46
	-consideraciones de diseño de los SPCS	47
V	METODOLOGIA PARA LA SELECCION DE LOS SPCS PARA DISTINTOS TIPOS DE CLIMA	50
	-análisis climatológico del lugar donde se pretende construir un SPCS	50
	-evaluación del impacto bioclimático local sobre el hombre y clasificación de sus necesidades de confort: radiación, sombra, efectos del viento, temperatura, humedad, etc	52
	-selección del SPCS que satisfaga las necesidades de confort en la construcción analizando los SPCS que se hayan utilizado en casos cuya problemática sea similar	55

## CAPITULO

página

VI	ASPECTOS TERMICOS DEL BALANCE ENERGETICO EN LOS SPCS	57
	-conceptos críticos para el entendimiento del comportamiento térmico de un espacio calentado y enfriado pasivamente	58
	-variables de diseño que afectan el comportamiento térmico de los SPCS	59
	-algunas temperaturas críticas de la construcción solar	60
	-predicción del comportamiento de los SPCS	60
	-modelo sencillo de simulación matemática para un cuarto de prueba	61
	-fundamentos del balance energético	62
	-ecuaciones fundamentales para cuantificar la transmisión de calor	63
VII	FACTIBILIDAD DE IMPLANTACION DE UNA TORRE DE VIENTO (SISTEMA PASIVO DE ENFRIAMIENTO TRADICIONAL DE IRAN) EN ZONAS ARIDAS Y SEMI-ARIDAS DE MEXICO	66
	-descripción de las torres de viento	67
	-operación de las torres	67
	-torres de viento que incorporan procesos evaporativos	70
	-condiciones termodinámicas aproximadas del aire sometido al proceso de enfriamiento dentro de dos torres de viento	71
	-análisis climatológico comparativo de las zonas áridas y semiáridas de Irán y México	74
	-evaluación bioclimática	75
	-conclusión	76
VIII	ESTUDIO TEORICO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA TORRE DE VIENTO (REGIMEN TERMICO IMPUESTO)	78
	-nomenclatura	78
	-introducción	79
	I-estructura general del flujo	79
	II-hipótesis y ecuaciones generales	80
	-temperatura de mezclado	82
	-ecuaciones de movimiento, de energía, y de continuidad	83
	-parámetros que intervienen en convección natural	85
	-estudio del flujo estable	88
	-ecuaciones finales para la obtención de los perfiles de velocidad y de temperatura del aire dentro de la torre	91
	-ecuación de consumo másico	92

## CAPITULO

página

VIII

III-resolución analítica para el "efecto chimenea" de la torre	93
-resolución analítica para el flujo descendente del aire en la torre de viento	105
IV-diagrama de flujo de la resolución del modelo de simulación por computadora	110
V-parámetros de flujo del sistema	111
VI-resultados	112
VII-interpretación de las curvas en función de $\Delta P_g$ , $q_1$ , y $q_2$	113
VIII-conclusiones	114

APÉNDICE

BIBLIOGRAFIA

## JUSTIFICACION

El campo de las aplicaciones de la energía solar es cada vez más extenso; abarca desde el calentamiento de agua de uso doméstico hasta la generación de electricidad en gran escala (como en pueblos), pasando por bombeo de agua para irrigar zonas áridas, secado de granos, sistemas de refrigeración y aire acondicionado, hornos, etc. Varios países como Alemania, Francia, Estados Unidos e Israel cuentan con tecnología solar muy desarrollada, algunos están viendo ya la posibilidad de comerciar sus equipos solares y su tecnología por todo el mundo. Este auge de la energía solar, no está por demás decirlo, es debido a la llamada "crisis del petróleo". La medida en que la energía solar logre sustituir al petróleo es difícil predecirlo. Lo que sí es un hecho es que el uso del energético convencional debe seleccionarse, y no desperdiciarse en usos que otras fuentes pueden desempeñar eficientemente. Tal es el caso de la climatización de viviendas donde la energía solar ha mostrado ser un eficiente sustituto. Con energía solar podemos calentar, enfriar, y ventilar viviendas, aún en lugares de climas poco benignos.

Los sistemas de climatización solar de viviendas eliminan (sistemas pasivos) o sustituyen en cierto grado (sistemas activos) el equipo electromecánico accionado por energético convencional (petróleo). Esta eliminación de equipo electromecánico en los sistemas pasivos de climatización solar es aparentemente poco ingenieril, sin embargo, hay más ingenio en lo que se logra de manera sencilla si se obtienen los mismos o mejores resultados.

Poco se ha escrito de energía solar en la facultad de Química, menos aún a nivel de climatización de viviendas, por eso este trabajo se justifica ampliamente. Ingenieros Químicos, Químicos, y profesionales de otras disciplinas científicas han desarrollado actividad en este nuevo campo, y tal vez algunos estudiantes al leer este trabajo se interesen en alguno de sus muchos aspectos, como por ejemplo, el estudio de los materiales almacenadores de calor como la sal de Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), la generación de energía eléctrica por medio de fotoceldas solares, optimización de sistemas de refrigeración y aire acondicionado accionados por energía solar, diseño y optimización de sistemas pasivos de climatización solar, predicción del comportamiento de estos sistemas, etc.

Este trabajo versará fundamentalmente en el estudio de los Sistemas Pasivos de Climatización Solar (SPCS).

- C A P I T U L O I -

INTRODUCCION

La economía moderna es un coloso creado por la civilización del petróleo. Sin embargo, el petróleo es un recurso natural no renovable y llegará el día en que la demanda sobrepase la producción.

En opinión de varios expertos, específicamente franceses, 1988 será el año crucial en que por primera vez el consumo de petróleo superará por poco su producción y en 1990 la escasez será crónica e irreversible.

Hacia el año 2050 se llegará a la "crisis final", ya que las reservas de petróleo, de gas natural y de uranio se habrán "agotado" y sólo quedará el carbón, de explotación costosa y difícil. El alcohol, los yacimientos submarinos de petróleo y el hidrógeno no alcanzarán a cubrir la demanda mundial de energéticos mientras que la energía nuclear suplirá apenas un 15% de las necesidades, con el agravante de que casi se habrá agotado el uranio. En opinión de ellos mismos, el mundo sufrirá durante 60 años, en espera de que se desarrolle una nueva forma de energía abundante.

La más prometedora de las nuevas fuentes que pueden generar energía eléctrica, es naturalmente la energía nuclear, tanto en su forma de fisión atómica, como en la posible futura de fusión atómica. Pero esta energía es la más amenazadora en cuanto al peligro que entraña para el medio ambiente y la salud, pues no existe aún forma suficientemente segura y confiable de tratar los desechos de las plantas nucleares, optándose por depositar el material altamente peligroso en el fondo del mar mientras que también es un hecho conocido que no ha sido posible eliminar el peligro radiactivo en una amplia zona de influencia de donde se instale la planta. A pesar de ello se ha decidido establecer algunas plantas generadoras de energía a través de procesos nucleares aún sin contar con el óptimo de seguridad. Para 1982 se espera que quede terminada la planta de Laguna Verde, Veracruz, la primera en el país productora de electricidad por el proceso nuclear.

Otra alternativa sería la gasificación de los yacimientos carboníferos que permitiría alimentar las centrales eléctricas o producir metanol o, mejor aún, gasolina -

sintética. Las reservas de carbón son mayores (a nivel mundial) y se espera que duren más que las de petróleo y gas, posiblemente varios siglos. En México existe el proyecto de llevar a cabo la explotación de un yacimiento de carbón mineral de flama larga, no coquizable, para abastecer a una planta termoeléctrica. La población que será abastecida con este suministro de energía eléctrica se localiza en los estados de Coahuila, Chihuahua y Nuevo León.

No obstante, las centrales eléctricas accionadas por carbón como las accionadas por energía nuclear resultan actualmente económicamente inaccesibles a causa de los costos y de los peligros de contaminación que presentan. El resultado neto de todo ello es que aunque a largo plazo quizá se pudiera obtener abundante electricidad barata de la energía nuclear o de la gasificación del carbón, a corto plazo es muy probable que los precios de la electricidad aumenten rápida y continuamente siguiendo los aumentos en el precio del petróleo y el gas.

La explotación de la energía del viento tiene mucho sentido a gran escala. Manteniendo los demás factores constantes, la energía producida varía con el cuadrado del diámetro de las aspas y con el cubo de la velocidad del viento. Es decir que una aspa de doble tamaño producirá cuatro veces más energía y que un viento de doble velocidad aumentará la energía producida en ocho veces. Sobre un terreno nivelado, la velocidad del viento aumenta generalmente con la altitud. Por tanto, en términos generales cuanto más grande sea el aspa y cuanto más alta esté situada, mejor será su eficiencia de funcionamiento. La utilización de energía eólica tiene naturalmente siglos de existencia, ha sido ampliamente utilizada en todas las partes del mundo durante los últimos cincuenta o sesenta años para generar electricidad. Los recientes adelantos en métodos de almacenamiento de energía, en el diseño de baterías y en la tecnología de celdas fotovoltaicas aumentan el atractivo actual de esta fuente energética.

Existen también la energía geotérmica y la energía de las mareas. Pero a escala global, la importancia relativa de estas energías es pequeña, siendo su potencial máximo tan sólo de un 2 un 1% respectivamente del potencial mundial de energía hidráulica producido en las centrales hidroeléctricas convencionales.

Todo lo anterior augura un sombrío panorama cuando se agote el petróleo en el mundo. La escasez continuada de los suministros de petróleo y su costo elevado tendrán inevitablemente que provocar problemas económicos y políticos muy graves para los países desarrollados y también pa-

ra las naciones en desarrollo. Cuando los ingresos obtenidos del petróleo comiencen a escasear, cierto número de países de la OPEP no se encontrarán mucho mejor que antes; así como sucedió en España, después de ser inundada por el oro y la plata de su imperio latinoamericano a fines del siglo XVI y principios del XVII. México, país rico en uranio y petróleo no tiene, aparentemente, una necesidad tan imperiosa de utilizar fuentes alternas de energía como otros países, pero la posibilidad del agotamiento del petróleo y la necesidad de su sustitución futura deben ser elementos esenciales de cualquier política energética. Pese a excedentes temporales es vital que se realice un esfuerzo máximo a fin de prever lo más pronto posible su sustitución gradual.

Las políticas de desarrollo científico y tecnológico deben abocarse principalmente a reconocer los problemas prioritarios a nivel nacional que afecten al medio ambiente y al desarrollo. Fomentar tecnologías que optimicen el uso de las fuentes de energías convencionales y desarrollar otras basadas en la utilización de fuentes no convencionales tales como la energía eólica y por supuesto la energía solar. Nosotros como universitarios debemos tener la legítima aspiración de no quedar retrasados tecnológicamente, por el bien del país (para poder aplicar políticas energéticas propias), y sobre todo por el bien de las clases más necesitadas tanto en las zonas rurales (que constituyen alrededor del 30% de la población total del país), donde el suministro de energéticos en la actualidad es difícil e incosteable, como en las zonas urbanas, pudiéndose lograr mejoras e innovaciones a nivel doméstico e industrial. En lugares remotos la energía solar podría contribuir en más del 50% de sus necesidades energéticas.

La degradación rápida y difundida del medio ambiente natural y el agotamiento de los bosques, y otros recursos naturales, tienen implicaciones aún más nefastas para las ya frágiles esperanzas y aspiraciones de las clases más necesitadas. La declinante productividad del suelo está erosionando y minando el ecosistema que sostiene la vida rural, y a medida que la deforestación, la erosión, la desertificación y otros daños ecológicos continúen, se afrontará una capacidad cada vez menor de la tierra misma para recuperar estos recursos naturales.

Tanto la energía solar como la eólica son fuentes de energía sumamente atractivas ya que el impacto ecológico de su uso es compatible con el medio ambiente, ambas no contaminan. Su uso implicaría un ahorro bastante considerable en el consumo de energía convencional y lo que es más importante, se propiciaría la conservación del medio ambiente natural.

Los edificios residenciales y comerciales consumen un alto porcentaje del total de energía disponible (en Estados Unidos es alrededor del 33%), razón por la cual todo ahorro o cambio que se produzca en este sector repercutirá a la larga en la disminución del consumo general de energía.

Examinando las diferentes fuentes de energía en la medida en que puedan afectar al diseño de edificios, vemos que la energía nuclear, la energía geotérmica y la energía de las mareas representan nuevos medios de generar energía eléctrica en centrales de gran escala pero tendrían muy pequeño impacto en la arquitectura y los servicios de ingeniería de los edificios. La otra posibilidad, aparte de los combustibles fósiles, que si tendría importantes implicaciones en la construcción, sería sobre todo el uso directo de la energía solar, junto con las posibilidades seguramente de menor importancia, de aplicaciones a pequeña escala de energía eólico-eléctrica, hidro-eléctrica o de obtención de metano.

Existen razones especiales por las cuales la energía solar resulta especialmente adecuada para utilizarse en edificios. La calefacción, el calentamiento de agua y la refrigeración consumen la mayor parte de la energía empleada en un edificio. Las tres aplicaciones requieren niveles relativamente bajos de temperatura, del orden de 40° a 80°C en contraste con los 150° a 300°C que se necesitan para la producción de energía mecánica, eléctrica o en ciclos termodinámicos de refrigeración. Sería un gran desperdicio emplear combustible convencional capaz de producir fácilmente estas temperaturas altas en calentar, enfriar o ventilar edificios que necesitan unos niveles de energía relativamente bajos. Es lo que sucede en el caso de los combustibles fósiles que se emplean en las centrales eléctricas para generar la electricidad que tendría que ser transportada a la periferia y convertida de nuevo en energía térmica mediante calefacción eléctrica. Un segundo factor importante es el hecho de que la radiación solar nos llega distribuida de una manera prácticamente uniforme sobre la superficie de la tierra, por lo tanto el suministro de energía está disponible en cualquier lugar y no se necesita ningún tipo de red de distribución que entrañaría pérdidas de energía en el transporte y posibles averías.

Son precisamente estas mismas características las que aparecen como dificultades principales a la hora de aplicar la energía solar a centrales industriales o comerciales de gran escala. En estos casos es necesario recoger la energía mediante grandes superficies de colectores,

extendidos a lo ancho de muchos kilómetros cuadrados, y -- las cuales probablemente se localizarían en zonas desérti-- cas o áridas situadas a cierta distancia de los usuarios -- industriales de la energía así obtenida. Sería también -- virtualmente obligatorio utilizar algún tipo de mecanismo -- concentrador de energía o superficies particularmente ab-- sorbentes de radiación solar (mediante algún tratamiento -- especial) capaces de alcanzar las altas temperaturas nece-- sarias. A pesar de estos inconvenientes, las centrales de -- energía solar a gran escala son muy prometedoras. Se cal-- cula que todas las necesidades de electricidad de América -- para el año 2000 podrían suministrarse con una central de -- 25,000 km<sup>2</sup> de superficie. (2)

La explotación de la conversión fotovoltaica, es-- decir, la producción de corriente eléctrica en ciertos ma-- teriales o combinaciones de materiales bajo la acción de -- la luz, ofrece la oportunidad adicional de emplear la luz -- del sol para generar electricidad en los edificios. Los -- dos tipos más eficaces y mejor estudiados son la celda de -- silicio y la de sulfuro de cadmio (CdS/Cu<sub>2</sub>S). La atrac-- ción particular de las celdas solares en los edificios con -- siste en que se pueden integrar en una combinación de co-- lector térmico y generador de electricidad, de modo que la -- calefacción, aire acondicionado y calentamiento de agua -- por una parte, y la electricidad para la iluminación, movi -- lización de aparatos y motores, por la otra, puede produ-- cirse a partir de la misma unidad. Los edificios así equi -- pados podrían funcionar independientes de cualquier sumi -- nistro de energía o combustible convencional durante gran -- parte del año. Sin embargo, la eficiencia de captación y -- conversión de la energía solar a energía eléctrica (con -- versión fotovoltaica) mediante las fotoceldas de silicio más -- perfeccionadas sólo llegan a alcanzar en la actualidad un -- 17%. No obstante, la conversión a energía calorífica (con -- versión fototérmica) permite alcanzar elevadas eficiencias -- del orden del 60% o más cuando el colector solar opera a -- temperaturas relativamente bajas pero superiores a las am -- bientales (40-60°C). El rendimiento combinada de conver -- sión de energía puede ser en total del 60%.

El calentamiento de agua para edificios es de las -- aplicaciones más sencillas de la energía solar y la única -- que hasta la fecha ha tenido éxito comercialmente. Tan só -- lo en 1964 existían en todo el mundo alrededor de medio mi -- llón de calentadores en uso, y actualmente esta cifra debe -- ser, por lo menos cinco o seis veces mayor. Respecto a Mé -- xico, en Guadalajara se han venido usando por más de 35 -- años y Japón es probablemente el país con mayor número de -- calentadores solares de agua en servicio.

Para una aplicación práctica a escala de un solo edificio la energía eólica no resulta muy apropiada. Hay razones teóricas intrínsecas que explican por qué la explotación de la energía del viento tiene más sentido a gran escala que para una sola edificación (según lo hemos mencionado ya). No obstante, el viento juega un papel muy importante en este tipo de arquitectura solar, ya que lo mismo sirve para calentar espacios, aprovechando el fenómeno de la termocirculación natural del aire, que para producir enfriamiento capturando los vientos predominantes del lugar por medio de una torre eólica como veremos más adelante.

La tecnología del bio-gas presenta una oportunidad de desarrollo principalmente en las áreas rurales en el reciclaje de materia orgánica obteniéndose combustible (gas metano) y abonos orgánicos residuales. Es útil para resolver problemas comunitarios, especialmente en materia de energía y fertilizantes de los estratos más pobres de las áreas rurales. Se puede quemar para producir energía y calor exactamente del mismo modo que se hace con el gas "natural".

Resumiendo, la aplicación práctica de la energía solar a escala de un solo edificio y prescindiendo de combustibles fósiles, sería la siguiente: la utilización directa de la radiación solar para la calefacción y enfriamiento o ventilación, utilización de celdas solares para generar energía eléctrica (aunque esto por el momento resulta bastante caro); utilización de energía eólica para producir electricidad y tal vez la utilización de energía hidráulica en pequeña escala, y, producción del biogas.

La estrategia a seguir en investigaciones sobre energía solar sería respecto a la búsqueda constante de -- disminución de costos; tecnologías de producción masiva; -- uso de materiales más baratos y eficientes y desarrollo de sistemas con alto grado de confiabilidad y sencillez operativa.

Esto se debe a que la inversión de capital inicial para equipo en instalaciones solares, puede ser bastante alta, mayor que para los equipos de calefacción, -- aire acondicionado y sistemas de energía eléctrica convencionales. No obstante, el costo consiguiente de combustibles es bastante pequeño, tanto en términos económicos como en lo que más nos importa en este contexto en términos de "costo y conservación del medio ambiente".

Existen ya varios proyectos en estado avanzado -- que incorporan un enfoque ecológico en el diseño de edificios. Estos edificios conservan materiales y energía; cau

san la mínima perturbación posible en el paisaje, incluso en alguna medida restablecen y realzan su entorno natural y reducen a un mínimo su contribución a la contaminación de aguas y atmósfera. Son casi enteramente independientes de redes de abastecimientos centrales, es decir, dependerían de fuentes de energía no convencionales (sol, viento, etc.) y del procesamiento local de los desperdicios. En su forma más extrema, esta independencia se extendería al cultivo de alimentos y cría de animales, de tal forma que la casa resultaría una vivienda autosuficiente.

Indudablemente esta postura extrema tiene gran atractivo intelectual y polémico, demostrar la viabilidad de tal propósito constituye un desafío considerable al ingenio y a la tecnología. Representa una vuelta al estado de equilibrio armónico con la naturaleza, tiene un indudable atractivo para todos aquellos que anhelan volver al contacto directo con la vida rural sencilla y con las actividades compatibles con el medio ambiente.

A pesar de los atractivos emocionales, intelectuales y políticos que posee la idea de autonomía total, de la autosuficiencia en la construcción, hay naturalmente varios grados posibles de independencia relativa y muchos caminos intermedios entre los dos polos que representan la vivienda autónoma y los sistemas de distribución de servicios totalmente centralizados típicos de nuestras ciudades actuales. Es poco probable que haya en un futuro próximo muchos edificios completamente autónomos, pero si es bastante posible que un gran número de edificios sean mucho más independientes que en la actualidad, respecto a los servicios centralizados de abastecimiento. Esto tendrá un impacto muy apreciable en la conservación de energía y en la mejora del medio ambiente.

Desde 1930 se viene experimentando con la utilización de energía solar para la climatización de edificios. Se han construido bastantes (más de 50 en América hasta mediados de 1974) en muchas partes del mundo (sobre todo en Estados Unidos, Francia, Japón, Italia, Australia, Inglaterra y Egipto) que utilizan en alguna medida la energía solar. La mayoría son viviendas pero existen también edificios de oficinas, colegios y algunos laboratorios pequeños. Varios de estos edificios funcionan hoy normalmente. También en los años 30 hubo la introducción a escala comercial de calentadores solares de agua para uso doméstico. A partir de los años 50, el interés por la investigación sobre energía solar ha crecido ininterrumpidamente. Ha aumentado el nivel de financiamiento de instituciones y universidades como resultado de una serie de encuentros y conferencias internacionales importantes dedicadas a este te-

ma. Así, si hasta 1972 las investigaciones y experimentos se hacían en forma inconexa y fragmentaria, y se escribía poco sobre el tema, hoy organismos como la NASA están invirtiendo millones de dólares en energía solar y no pasa un día en que alguno de los varios periódicos o revistas más importantes del mundo publiquen algún artículo de fondo o cartas de científicos eminentes sobre este tema, así como también sobre generadores de gas metano o aerogeneradores. La UNESCO está impulsando programas que cumplan con los objetivos de la Planeación Ecológica con la utilización básicamente de la energía solar.

En nuestro país diversas instituciones están realizando estudios para el buen aprovechamiento de esta energía, enfocados a nuestras características climáticas, sociales y económicas. El Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, ha venido publicando los análisis de diversos estudios sobre las características climatológicas y de radiación solar y terrestre en todo el territorio nacional. Ha analizado la eficiencia de colectores solares. Ha desarrollado materiales de bajo costo a partir de desechos agrícolas e industriales, para la construcción de la estructura y aislamiento de dichos colectores, y para su uso en la helioarquitectura. También ha hecho estudios sobre sistemas de refrigeración y aire acondicionado activados por energía solar; sobre calentadores solares de agua y sobre fotoceldas, entre otras cosas. El Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en sistemas (IIMAS) de la UNAM, los Departamento de Física e Ingeniería Eléctrica del CIEA-IPN, la Universidad Autónoma Metropolitana, el Instituto Tecnológico de Monterrey, etc., también han realizado programas de investigación sobre este tema (bombeo de agua para irrigar zonas áridas, generación de electricidad, secado de granos, bombas solares, entre otros ejemplos). CONACYT, efectúa sus propias programas en este campo.

La Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP) a través de la Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar, llevará a cabo, por medio de un convenio con Alemania Federal, el "Plan Sonntlan", a realizarse en el poblado de las Barrancas, B.C.S. y la Ciudad de Mexicali, B.C.N. para aprovechar en ambos casos la energía solar en gran y mediana escala, en el medio rural y urbano respectivamente. La UNAM ha participado también en este proyecto a través del IMM y el IIMAS realizando los estudios de cuantificación de radiación solar y otras determinaciones geoheliofísicas.

La misma SAHOP y la Secretaría de la Defensa Na--

cional aprovecharán la energía solar para su aplicación práctica en favor de la población campesina y el desarrollo económico del agro nacional. El plan piloto se realizará en la granja el Vergel, ubicada en Iztapalapa, D.F. Consiste en la remodelación y construcción de modelos avícolas y porcícolas mediante el uso de tecnología solar para acondicionamiento térmico y en el diseño de un invernadero con el doble propósito de realizar cultivos hidropónicos e instalar un criadero piscícola. Se construirá un digestor de biomasa (BIO-GÁS) útil para convertir desechos orgánicos en gas combustible y fertilizantes para cultivo. También se tratará de mejorar la producción agropecuaria por medio de técnicas solares. Una casa habitación y el centro recreativo de esta granja contarán con suministro de agua caliente mediante la instalación de colectores planos.

El IIM-UNAM se encuentra desarrollando varios proyectos de investigación de climatización solar en lugares de climas extremos entre los cuales se encuentran los siguientes: 2 viviendas en Hermosillo, Sonora (clima cálido seco) en conjunto con la Escuela de Altos Estudios de la Universidad de Sonora. Un establo piloto en Martínez de la Torre, Veracruz (clima cálido húmedo). Más recientemente y en cooperación con el INFONAVIT, 8 casas localizadas en La Paz, Mexicali, Cd. Cuauhtémoc y San Luis Potosí. En todos estos proyectos las técnicas de climatización solar son del tipo pasivo que consisten en proporcionar confort térmico únicamente por medios naturales de transferencia de calor en sus tres formas: convección, radiación y conducción, prescindiendo de equipos electromecánicos.

Las viviendas así climatizadas reciben el nombre de Sistemas Pasivos de Climatización Solar y serán motivo de estudio a lo largo de esta tesis.

Un proyecto más reciente del IIM-UNAM se realizará en Mérida, Yucatán. Se trata de la construcción de una vivienda climatizada también por medios pasivos, y cuyos materiales de construcción serán (total o parcialmente) del tipo polímero-fibra cargá-mineral, desarrollados por este instituto. Estos materiales consisten en fibras duras (Iztle, hehequén, etc.) como elemento principal y son un compuesto idóneo en la fabricación de módulos solares por sus excelentes propiedades mecánicas. Resisten holgadamente los requerimientos más críticos en las zonas del país de clima más riguroso e inhóspito. Aparte de estas cualidades fisicoquímicas, tienen otra más atractiva desde el punto de vista comercial: su bajo costo. Se tienen entonces los elementos necesarios para lanzar competitivamente esta tecnología que propicie la apertura masiva en el mer-

cado nacional y extranjero. El empleo de dichos materiales permitiría mejorar las condiciones económicas de la población campesina en zonas de baja productividad agrícola.

Resumiendo, podemos decir que en México, el interés por el aprovechamiento de la energía solar empieza a ser notorio, y como nuestro país goza de magníficas características de insolación es posible anticipar a corto plazo, una rápida expansión de la tecnología solar con aplicaciones a la vivienda; ya sea en zonas rurales o urbanas, ya sea en regiones secas o húmedas, puertos o ciudades.

No obstante, la implantación de técnicas para este fin se encuentra todavía en fase de investigación, desarrollo y optimización. Es necesario impulsar las técnicas de aprovechamiento de la energía solar mediante investigaciones tecnológicas y a través de estudios ecológicos-sociales y económicos, así como mediante la educación de los usuarios potenciales.

## CAPÍTULO II GENERALIDADES

La arquitectura solar o Helioarquitectura nació con la necesidad de producir un tipo de diseño más sutil, económico y humano comparado con el que producen las soluciones técnicas que hoy se imponen por la fuerza independientemente del clima las cuales dependen de fuentes de energía convencional y de servicios electromecánicos, en lugar de utilizar las fuerzas naturales locales.

La helioarquitectura se ha definido como la adecuación al medio físico de las construcciones. Está encaminada a mantener construcciones confortables en el interior principalmente cuando el clima es inclemente en el exterior sin necesidad del uso de ventilación, calefacción y aire acondicionado convencionales. Además, entre otras cuestiones puramente arquitectónicas, satisface otros tipos de necesidades como el calentamiento de agua. Todo esto generalmente se puede lograr mediante sistemas de climatización solar cuyos principios de funcionamiento son relativamente simples, y los cuales no implican el uso de nuevas tecnologías o sistemas sofisticados (salvo la generación de electricidad). En consecuencia es posible diseñar edificios de reducido consumo de energía, eliminando los frecuentes problemas de sobre calentamiento y excesivo enfriamiento de la arquitectura moderna que hace uso anárquico de grandes superficies vidriadas (el vidrio, bien aprovechado, es insustituible en los sistemas de climatización solar) y que además, en la mayoría de los casos, no considera las propiedades aislantes de muchos materiales y no ha tenido en consideración la posibilidad de conjugar el edificio con su entorno y clima, ignorando factores tan importantes como la orientación del edificio con respecto a la dirección e intensidad del sol, y de los vientos predominantes. Dichos sistemas se basan fundamentalmente en la consideración de los factores bioclimáticos, así como de las características térmicas de los materiales de construcción en el diseño, que en conjunto, regulan los intercambios de materia y energía entre el ocupante y su medio. Hay que recordar que toda vivienda es un sistema en continuo contacto con el medio ambiente, y por lo tanto es atravesada por numerosos flujos como de aire y agua, pero primordialmente de energía; la cual, directa o indirectamente proviene del sol. La permeabilidad o impermeabilidad de las barreras físicas del sistema (techos, paredes, ventanas y pisos) regulan la magnitud y dirección de los inter-

cambios de calor (radiación y conducción) y de masa (convección), determinando así las condiciones del confort térmico fisiológico.

Tratándose del aprovechamiento de la energía solar en edificaciones la conversión fototérmica de la energía solar viene a ser el proceso fundamental en los sistemas de climatización. Este trabajo compete exclusivamente al estudio del aprovechamiento de la energía solar para edificios en cuanto a su empleo térmico, es decir en cuanto a las formas de recoger y emplear el calor del sol para ventilar, enfriar o calentar las construcciones. Una de las transformaciones más eficientes de la energía solar a calorífica, se encuentra en el calentamiento de fluidos, especialmente agua y aire que son los fluidos empleados generalmente en los sistemas de climatización solar.

Prácticamente todos los edificios reciben aportaciones caloríficas del sol, que almacenan en su estructura. Esta ganancia de calor solar, generalizada, puede ser deseable o no según las circunstancias y puede aprovecharse de diferentes modos. Los principios fundamentales son similares para todos los casos. Hace falta siempre disponer de algún tipo de colector con el cual pueda captarse la radiación solar siendo necesario contar con algún tipo de depósito de almacenamiento donde guardar el calor colectado y del cual pueda extraerse lentamente según se requiera. El colector solar es generalmente del tipo plano. Este tipo de colector presenta ventajas respecto a los concentradores (colectores focales) ya que puede funcionar independientemente de la naturaleza directa o difusa de la radiación solar y durante un mayor número de horas al día y de días al año. La consideración de tres factores: tamaño del edificio, clima y proporción de la demanda total de calor que ha de ser abastecida por energía solar, determinan en gran medida la superficie necesaria del colector, su orientación, inclinación, y capacidad térmica del depósito de almacenamiento.

En las instalaciones de calefacción solar, además del sistema de captación, el almacenamiento de calor es de importancia primordial. La primera edificación solar que se llegó a construir, la casa solar Núm. 1 del MIT (Massachusetts Institute of Technology: hasta la fecha se han construido 7 a partir de 1939), figura 1, fue diseñada para captar energía solar en verano y almacenarla hasta el invierno. Tenía un depósito de agua en el sótano con una capacidad de 65,000 litros, el cual resultaba bastante impresionante en relación con el espacio relativamente pequeño que debía calentar (dos habitaciones con una superficie total de 45m<sup>2</sup>). En 1969, E. Schonholzer presentó un plan-

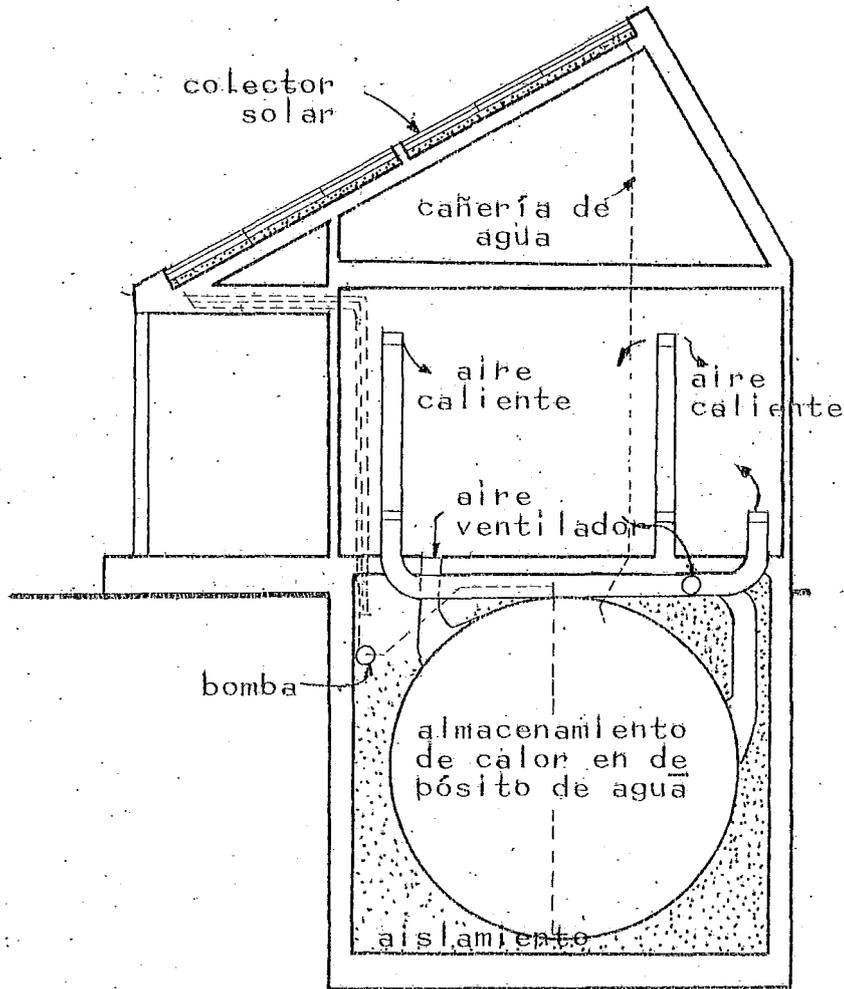


FIGURA 1. SECCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA CASA SOLAR NUM. 1 DEL MIT. CONSTRUIDA EN CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS DURANTE 1939-40.

de almacenamiento de calor solar semejante al de la casa solar anterior. Consistió en captar radiación solar en verano en enormes depósitos de agua con abundante aislamiento y con una capacidad de millares e incluso millones de litros de agua para abastecer de calor a conjuntos de unas cien viviendas durante el invierno. Sin embargo, desde el experimento del MIT, se ha llegado a reconocer que a nivel de viviendas individuales, no resulta práctico guardar el calor de una estación a otra, ya que se necesitan grandes volúmenes de almacenamiento lo cual resulta antieconómico.

En los edificios que se han diseñado después, el máximo de tiempo de almacenamiento intentado ha sido de unos diez días (durante el invierno se puede almacenar calor suficiente para satisfacer los requerimientos térmicos de confort en esa estación mediante una orientación e inclinación adecuada del colector, como lo analizaremos después). Según el estudio de Lof y Tybout, la cantidad de calor almacenable en base a costos mínimos de calefacción solar es de 50 a 75 l de agua (o su equivalente térmico en otros productos) por metro cuadrado de colector solar para casi todos los lugares de Estados Unidos en que puede usarse este tipo de calefacción. Este volumen de almacenamiento es suficiente para suministrar calor en invierno durante uno o dos días con tiempo nublado. El almacenamiento térmico en agua es la forma corriente, sencilla y barata.

En términos generales hay dos posibilidades para el almacenamiento térmico: almacenar calor real en materiales con gran capacidad calorífica, como en un lecho rocoso; o almacenar calor latente en algún material que se funde, o que experimente una reacción química dentro del límite de temperaturas en cuestión.

Por lo menos cuatro edificios han empleado piedras como único medio de almacenamiento de calor: dos casas diseñadas por G.O.G. Lof en Colorado, el bungalow del Servicio Forestal de los Estados Unidos de Amado, Arizona (figura 2) y la residencia de Earl Palmberg en Topeka, Kansas. El tamaño medio de las piedras empleadas es de 5 a 10 cm y usándose aire como fluido de transporte de calor. El contacto entre el aire y la extensa superficie total de contacto del conjunto de piedras proporciona una transferencia de calor bastante efectiva, aunque se necesita algún mecanismo auxiliar electromecánico (ventilador) que impulse el aire a través de las piedras y que consume por sí mismo energía convencional.

La capacidad calorífica de las piedras es bastante menor que la del agua, pero su densidad es mayor. Como resultado, un metro cúbico de piedra almacena menos calor-

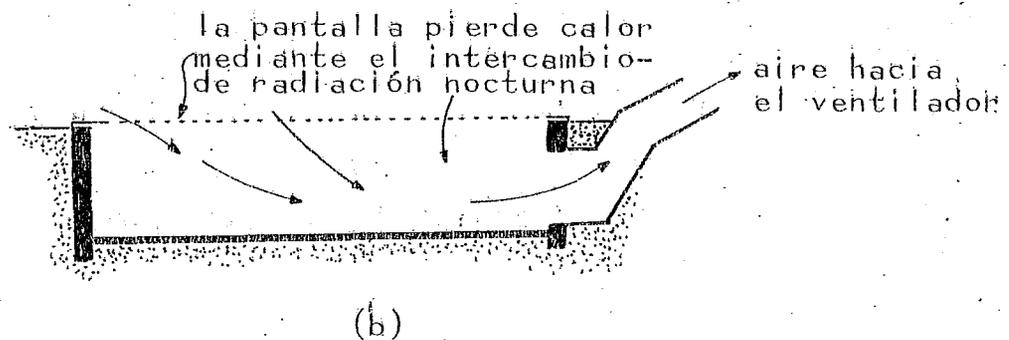
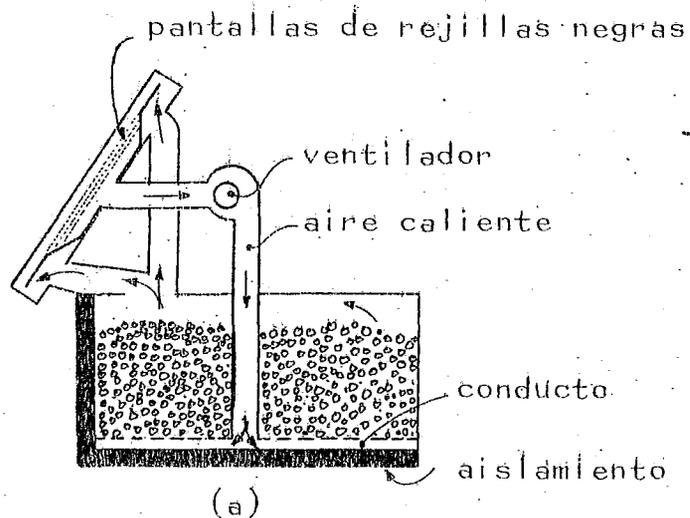


FIGURA 2

- a) DISEÑO PARCIAL ESQUEMATICO DE COLECTOR Y DEPOSITO DE PIEDRAS PARA ALMACENAMIENTO.
- b) "RADIADOR NOCTURNO" DE REFRIGERACION DE AIRE.

AMBOS PERTENECIENTES A LA ESTACION DEL DESIERTO DE GRASSLAND, SERVICIO FORESIAL DE E.E.UU. CONSTRUIDA EN AMADO, ARIZONA, EN 1955. FUE DISEÑADA POR G.O.G.LOF.

en Pr  
solar  
do Na  
Univel  
seño  
han u  
rio o  
otras  
depós.  
49°C r

capaci  
Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
rando

Agua
Guijarro con 1/3
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O

dos ex  
de cal  
do las  
"radiac  
en Euro  
instala  
1962-63  
día a  
te agua  
tituto

que un metro cúbico de agua: 320 Kcal por °C en un m<sup>3</sup> de piedra compacta, y 1000 Kcal/°C en un m<sup>3</sup> de agua. (La cifra para depósitos de piedras con espacios de aire entre ellas es, naturalmente, menor).

Aunque algunos diseñadores han colocado el depósito de almacenamiento fuera del edificio, esa localización no es la ideal desde el punto de vista para el aprovechamiento máximo del calor. El depósito debe tener siempre buen aislamiento, a pesar de lo cual perderá algún calor, y si se coloca dentro o debajo del edificio (en el sótano, por ejemplo) este calor que se pierde pasará hacia el edificio. Otra ventaja de colocar el depósito en el sótano es que la tierra que lo rodea es mala conductora del calor, y aunque se escape suficiente calor para elevar la temperatura de esta, puede reabsorberse de nuevo cuando disminuye la temperatura del depósito. De hecho, la tierra funciona ría como un medio adicional de almacenamiento de calor.

En el National Center for Energy Management and Power de la Universidad de Pensylvania se han llevado a cabo recientemente toda una serie de experimentos sobre métodos y materiales diferentes para almacenar calor latente. Se han examinado una serie de sales diferentes así como varias ceras de parafina que parecen ofrecer posibilidades favorables. Una de estas sales es el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O (sal de Glauber); La doctora María Telkes diseñó el sistema de calefacción solar para la primera casa que utilizó almacenamiento de calor latente, construida en Dover, Massachusetts, en 1944; la sal estaba guardada en recipientes de 20 litros en tres armarios de la casa. Desgraciadamente se tuvieron algunos problemas difíciles de solucionar. Tras algunos ciclos había cierta tendencia a no producirse la acción contraria cuando disminuía la temperatura (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O=Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 10H<sub>2</sub>O- según avanza en la otra, lo expulsa), en lugar de cristalizarse la sal, se formaba una "solución sobre saturada". Por otra parte, al formarse los cristales de sal, tendían a depositarse en el fondo del recipiente y esta estratificación también obstaculizaba la reacción en sentido contrario. Como consecuencia disminuyó el rendimiento del depósito de sal al cabo del primer año de vida de la casa.

Se ha intentado evitar la estratificación que se produce con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O (y otras sustancias) suspendiendo la sal en un gel inerte o en una sustancia que la espese, tal como arcilla, escayola, almidón o goma-espuma, hasta el momento con regular éxito.

Tres edificios más han almacenado calor latente desde la primera casa de Dover: un laboratorio construido

unidades de Hidróxido de sodio con un sistema de transporte de calor por aire que se introducía en las habitaciones; fue instalado en diez casas de empleados de la Philadelphia Electric Co.; aunque su funcionamiento fue satisfactorio, no resultó recomendable emplear la sosa caústica por ser venenosa y potencialmente peligrosa por lo que las unidades fueron retiradas dos años más tarde.

Algunos edificios utilizan termobombas como parte del sistema de calefacción solar. Este aparato (parecido a la termobomba o bomba de calor de Carnot) extrae calorías de un medio y las transporta a otro, elevando y bajando el nivel de temperatura según se requiera (Verano o Invierno).

Toda refrigeración utiliza el principio de bombeo de calor (la termobomba más conocida es la de los refrigeradores domésticos) en la cual, según el funcionamiento más corriente, se emplea como refrigerante algún fluido volátil en un circuito cerrado a través de dos serpentines. Un motor (generalmente eléctrico) mueve el compresor que eleva la presión del refrigerante vaporizado y hace que se condense en los serpentines del condensador a mitad del recorrido; después, ya líquido, pasa a través de una válvula de expansión hacia los serpentines (evaporador) de la otra mitad, en que las presiones más bajas hacen que se evapore de nuevo. El vapor pasa de nuevo al compresor y vuelve a empezar el ciclo. En la termobomba tipo Carnot el refrigerante extrae el calor necesario de vaporización (isotérmicamente) en el evaporador, con un correspondiente aumento de su entropía (etapa 1-2). La temperatura del fluido luego se incrementa por medio de una compresión isentrópica (etapa 2-3). En seguida el fluido descarga calor isotérmicamente en el condensador y experimenta una reducción de entropía (etapa 3-4) que compensa su aumento a la temperatura más baja. El refrigerante se expande después isentrópicamente hasta la presión y temperatura a las cuales empezó el ciclo (etapa 4-1). En su uso más común, (refrigeradores domésticos), las termobombas extraen el calor interior de la nevera y lo expulsa al medio ambiente.

Los componentes de los sistemas de aire acondicionado funcionan de manera muy semejante. Para darnos una idea, podría decirse que es como si el edificio fuera el recinto de una enorme nevera y el calor que se extrae de su interior se expulsa a la atmósfera de modo parecido aunque a mayor escala.

En lugar de utilizar las termobombas para enfriar el aire, también pueden emplearse de un modo prácticamente igual para extraer el calor de masas de agua almacenadas en depósitos y poder calentar recintos. La bomba permite-

recoger calor solar a temperaturas bajas y extraerlo del depósito de almacenamiento cuando éste tiene una temperatura demasiado baja para poderlo usar directamente en el calentamiento de las habitaciones. De esta manera se aumenta el rendimiento del sistema de calefacción solar y se extiende los límites de condiciones climáticas bajo las cuales opera.

En consecuencia, las termobombas pueden emplearse en una u otra dirección alternativamente, es decir, tanto para calentar como para refrigerar. Para enfriar el aire, el condensador se coloca en la parte exterior del edificio y el evaporador en el interior. Para calentar recintos se invierten las posiciones. En ambos casos, el calor se expulsa por el condensador. Cuando quiere utilizarse como calentador, la bomba extrae el calor (generalmente calor solar) del aire exterior, de la tierra de los alrededores, y de los depósitos de agua (pozos, estanques, arroyos, etc.), y lo utiliza para calentar el edificio. (G. Smith reporta sobre la economía que ha supuesto el empleo de estas bombas para calefacción en algunos experimentos ingleses, especialmente en el Festival Hall de Londres que utiliza el río Támesis como fuente de calor, y otros edificios de Norwich y en Nuffield College, Oxford). Puede emplearse también un colector especial de radiación solar como fuente de calor, como veremos más adelante.

La energía extraída según el rendimiento medio de las termobombas que funcionan en la actualidad, es unas tres o cuatro veces mayor que la que se necesita para hacer funcionar el compresor. Las termobombas accionadas por electricidad proporcionan un mecanismo de calefacción que puede resultar ser de  $2\frac{1}{2}$  a 6 veces más rentable que otros mecanismos de calentamiento eléctrico. En 1955 (Daniels) se instalaron en Estados Unidos unas 6,000 termobombas para la calefacción de edificios que funcionan ahora normalmente, la mayoría están en California, Florida y los estados del Sur. Por regla general las bombas más prometedoras parecen ser las que se usan en los edificios grandes tanto para su calefacción como refrigeración y que se utilizan conjuntamente con sistemas de recuperación de calor desperdiciado. Las unidades de refrigeración ofrecen una fuente de calor recuperable. La firma Dubin Mindell-Bloome ha diseñado un sistema de recuperación de calor para una cadena de supermercados en que el calor expulsado por las unidades de refrigeración comercial, (que de otro modo se hubiera desperdiciado) cubría totalmente las necesidades de calefacción de los recintos. De este modo se ahorra un 30% del consumo total de energía.

Sporn y Ambrose han tratado la aplicación de las-

bombas solares en sistemas de calefacción y refrigeración de edificios, con energía solar. En los experimentos realizados por Sporn y Ambrose (American Electric Power Corporation de Nueva York en (1950), se hacía circular freón entre los paneles del colector solar y el depósito de almacenamiento de agua. Durante el invierno, el freón se evaporaba en el colector solar y se condensaba con un compresor eléctrico de 5 CV, enviando el calor al depósito de agua (ciclo de calefacción). Durante el verano, el refrigerante se vaporizaba mediante el calor de la casa y posteriormente, al comprimirse de nuevo, el calor del vapor condensado se retiraba mediante la superficie del colector ya enfriada por convección y radiación, (ciclo de refrigeración).

Una termobomba instalada en una casa de New Haven, West Virginia, empleada desde 1950 a 1955, transfería directamente el calor del aire del colector solar al aire de las habitaciones, sin utilizar ningún depósito de almacenamiento térmico. En otros edificios se han instalado termobombas entre dos depósitos de agua con diferentes temperaturas. La bomba extraía el calor de depósito calentado a través del colector solar y lo transfería al segundo depósito (lado frío), aumentando así su temperatura. El calor del segundo depósito se empleaba para calentar el edificio. El inconveniente que presentaban las instalaciones de termobombas (sobre todo cuando se emplean conjuntamente con los colectores solares) es su alto costo inicial. No obstante, llegan a ser una solución económicamente factible dada su gran eficiencia. Cuando funcionan con electricidad el ahorro de energía no es tan alto como si funcionasen, por ejemplo, con motores de gas o de "combustóleo".

Hacer funcionar todo un sistemas de refrigeración con energía solar presenta algunos inconvenientes. La principal dificultad consiste en producir temperaturas suficientemente altas con colectores planos. Por ello, se recurre en algunas ocasiones al uso de concentradores focales tales como espejos o lentes de Fresnel. Este tipo de colectores aprovecha únicamente la radiación solar directa, y por tal razón deben seguir el movimiento del sol para lo cual se requiere de un mecanismo apropiado (heliótropo) -- que eleva considerablemente el costo de un colector focal con respecto al colector plano, aunque las temperaturas alcanzadas pueden llegar hasta los 3500°C dependiendo de la perfección óptica del diseño. Los concentradores focales (o colectores concentradores) se usan especialmente en sistemas de enfriamiento por absorción (figura 3), donde el refrigerante empleado requiere elevadas temperaturas de evaporación.

Casi todos los modelos de equipos de refrigera--

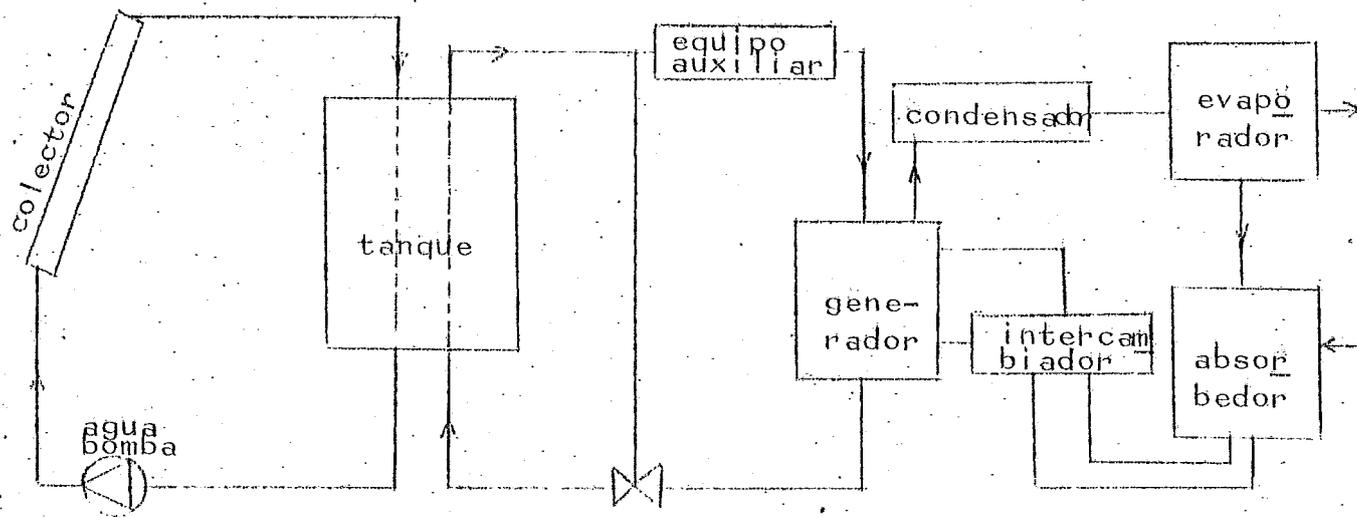


FIGURA 3. SISTEMA ACTIVO DE ENFRIAMIENTO POR ABSORCION

ción por absorción que existen hoy en el mercado necesitan agua a presión a una temperatura de  $130^{\circ}\text{C}$  ó vapor, aunque existen modelos mayores que pueden funcionar con agua a temperaturas de  $99^{\circ}\text{C}$  o menos pero con menor rendimiento. Según Daniels, un equipo que funcione con bromuro de litio y agua, puede hacerlo a temperaturas de  $77^{\circ}\text{C}$ , como mínimo, y esta temperatura puede obtenerse sin duda con colectores planos. Estos sistemas sirven bastante bien para refrigerar ambientes debido a su gran eficiencia, pero resulta mucho más económico utilizar el fenómeno de la radiación nocturna de los colectores y otros principios de los medios naturales de transferencia de calor, que constituyen la base del funcionamiento de los sistemas pasivos y los cuales veremos con mayor detalle posteriormente.

Ching, Lóf y Duffie han informado sobre experimentos de refrigeración de una serie de habitaciones de  $110\text{ m}^2$  de superficie total con un colector solar de  $9.5\text{ m}^2$  y un equipo comercial de refrigeración por absorción de 3 toneladas de bromuro de litio y agua. Parte del calor utilizado por esta unidad lo proporcionaba el colector y el resto llegaba mediante un sistema de suministro de vapor canalizado. Según los resultados de los experimentos, en un día soleado y sin viento un colector solar de  $18.5\text{ m}^2$  podría producir una tonelada de refrigeración (aproximadamente  $3.5\text{ kw}$ ). Sheridan y otros han hecho experimentos semejantes en Brisbane, Australia. También en éste caso se utilizó un acondicionador de aire de bromuro de litio de 3 toneladas que recibía parte del calor necesario de un colector mayor con agua calentada por electricidad. El almacenamiento de frío se hacía en un depósito de agua rodeado de gravilla.

Las figuras (4 y 5) muestran como se pueden combinar los sistemas de calefacción y refrigeración de los edificios. La figura (4) muestra un colector solar con agua como medio de transporte de calor al depósito de almacenamiento. El suministro de agua a la casa se hace por medio de un serpentín permutador de calor inmerso en el depósito que consiste en un conducto circular cerrado con serpentines en forma de aletas en ambos conductos de aire (de salida y entrada) y que transfiere el calor de uno a otro por medio de agua. Sirve muy bien para transportar calor real entre dos lugares distantes. Durante el invierno el agua caliente se extrae con una bomba hacia un intercambiador de calor en el que cede su calor al aire empleado en calentar el edificio, y durante el verano se lleva a un acondicionador de aire por absorción. La figura 5 muestra un sistema ideado por Arthur D. Little Inc., con un dispositivo accesorio para una termobomba añadida por Dubin. La disposición del equipo es en muchos aspectos semejante al anterior, con un suministro de agua para la casa, el depósito de almacenamiento de calor y el generador del aparato

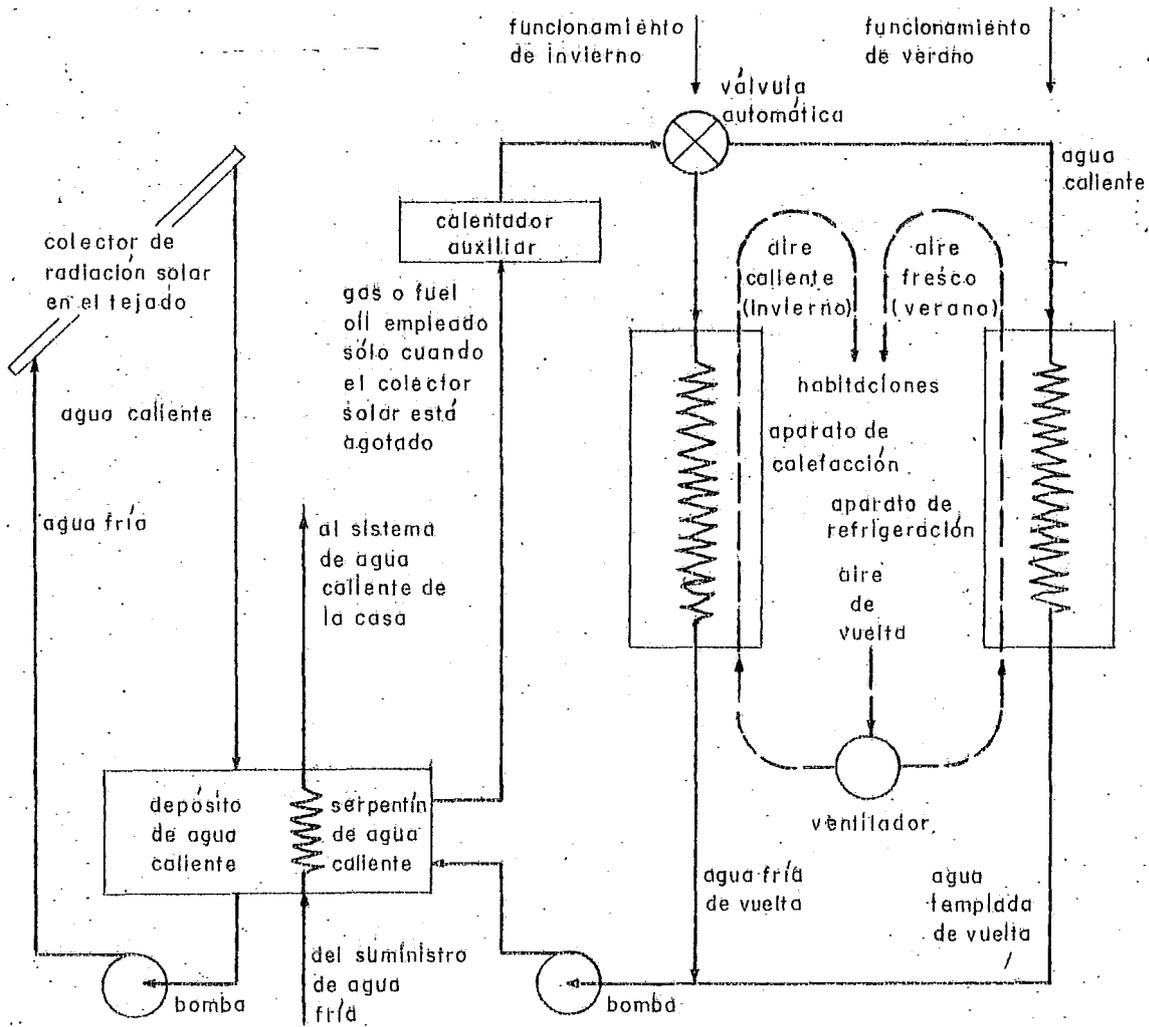


FIGURA 4. CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN SOLAR EN VIVIENDAS: DISEÑO ESQUEMÁTICO DE UN-MODELO.

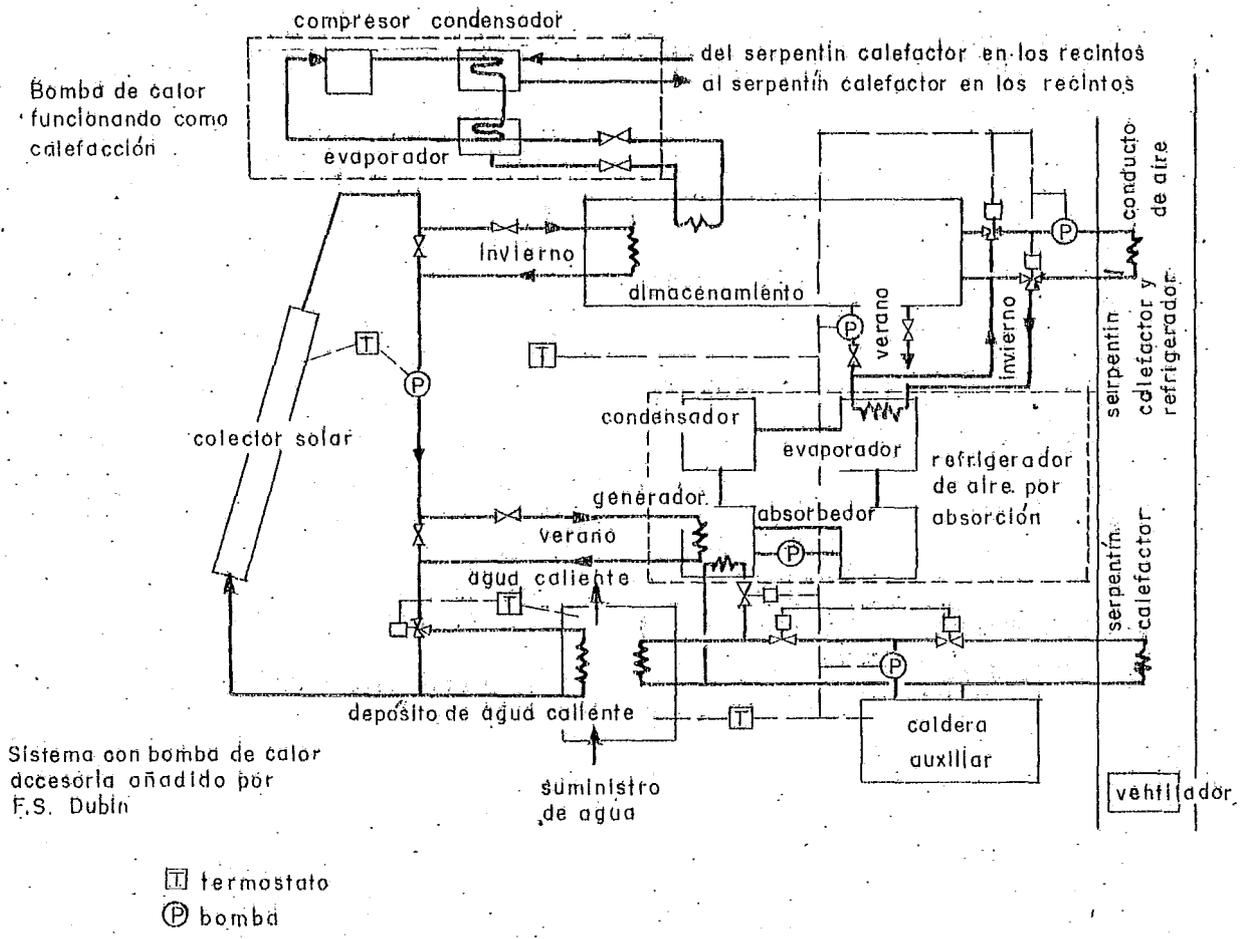


FIGURA 5. SISTEMA DE CALEFACCION Y REFRIGERACION SOLAR COMBINADOS EN UN DISEÑO REALIZADO POR ARTHUR D. LITTLE INC., CON UN DISPOSITIVO ACCESORIO PARA UNA BOMBA DE CALOR AÑADIDO POR F.S. DUBIN

de refrigeración por absorción, todos ellos calentados por medio del colector solar.

Además de la refrigeración mediante el uso de termobombas, los edificios de calefacción solar que han adoptado también sistemas de refrigeración, lo han hecho en la mayoría de los casos utilizando la radiación nocturna de la superficie del colector solar en las noches de verano. Entre estos edificios se encuentra el del Servicio Forestal de Estados Unidos en Amado Arizona (figura 2). Otro es el laboratorio de energía solar de la Universidad de Arizona (figura 6) cuyo colector integrado en el techo irradia hasta 120,000 kcal por noche con agua a 21°C. Thomason ha ideado también un sistema de refrigeración por evaporación mediante el cual el agua se bombea hasta la cumbrera del tejado (figura 7) utilizando las mismas tuberías y bombas que para el sistema de calefacción, pero en lugar de fluir a través del colector en la vertiente sur del tejado, se deja caer por canales abiertos en el faldón que da al norte. H. E. Thomason ha construido 7 casas desde 1959 en Washington, D. C. La casa de prueba de Hay/Yellot también utilizará este mismo principio de la radiación nocturna del colector para enfriar recintos. Esta casa será descrita en capítulos posteriores.

Hemos descrito de una manera general los sistemas de climatización solar, sus componentes principales (colectores, almacenadores, bombas de calor, etc.) y los principios termodinámicos en que se basa su operación. Podemos ahora preguntarnos: ¿Cómo se acoplan estos sistemas a la arquitectura?

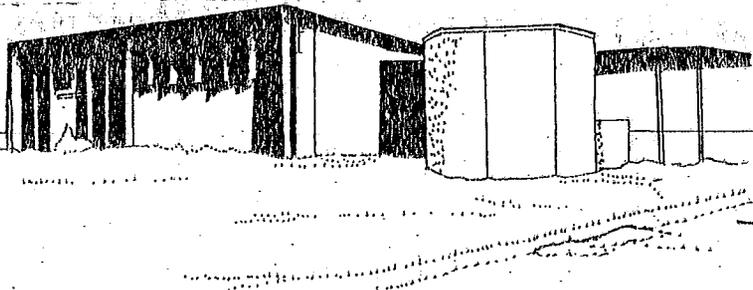
Para darnos una idea más clara de la integración arquitectónica de estos sistemas (helioarquitectura pasiva o activa) presentamos a continuación una serie de dibujos esquemáticos de cuatro edificios con climatización solar y sus correspondientes descripciones:

#### CASA SOLAR TROME MICHEL (figura 8)

Fue construida en Odeillo, Francia en 1970. Consiste de una sola planta con una superficie útil de 75 m<sup>2</sup> y un colector vertical de 48 m<sup>2</sup> en la pared sur. El colector comprende 12x4.9 m de pared sur con excepción de 4x2.7m de abertura para la puerta y consta de ventanales, una cámara de aire delante del muro de almacenamiento de concreto cuya superficie externa tiene un recubrimiento negro (superficie selectiva). Este muro tiene 35cm de espesor -

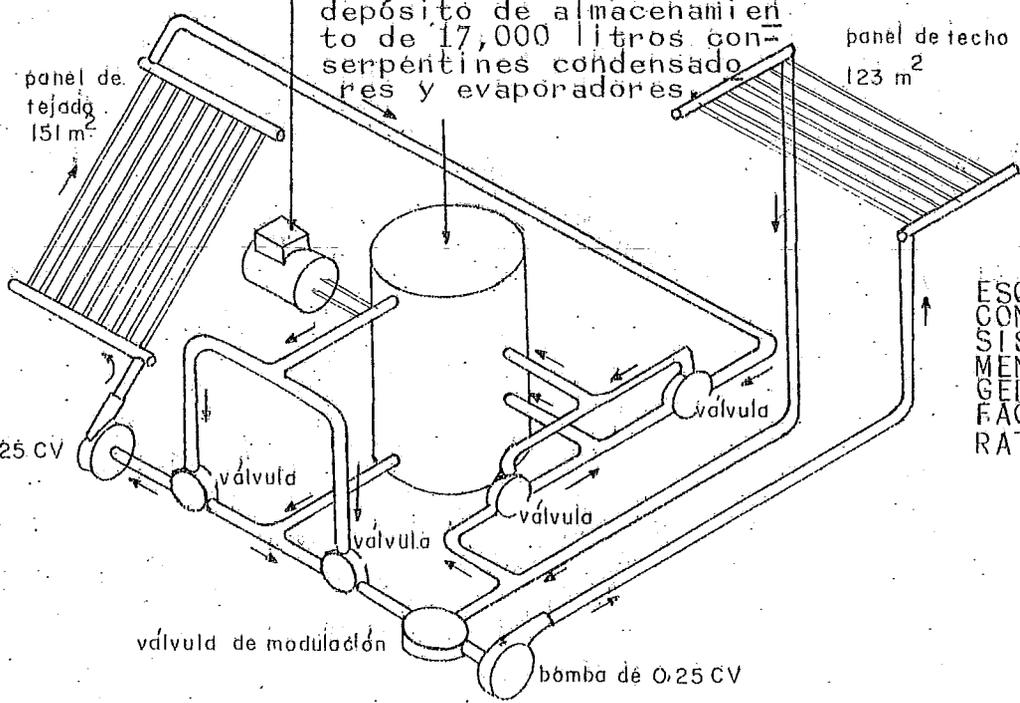
FIGURA 6. LABORATORIO DE ENERGIA SOLAR, UNIVERSIDAD -  
DE ARIZONA (1959)

VISTA GENERAL  
DEL LABORATORIO  
MIRANDO HACIA EL  
SUDESTE



compresor re-  
frigerante de  
1,5 cv.

depósito de almacenamien-  
to de 17,000 litros con  
serpéntines condensado-  
res y evaporadores.



panel de techo  
123 m<sup>2</sup>

panel de  
tejado  
151 m<sup>2</sup>

ESQUEMA DE LOS  
CONDUCTOS DEL  
SISTEMA EXPERI-  
MENTAL DE REFRI-  
GERACION Y CALE-  
FACCION DEL LABO-  
RATORIO.

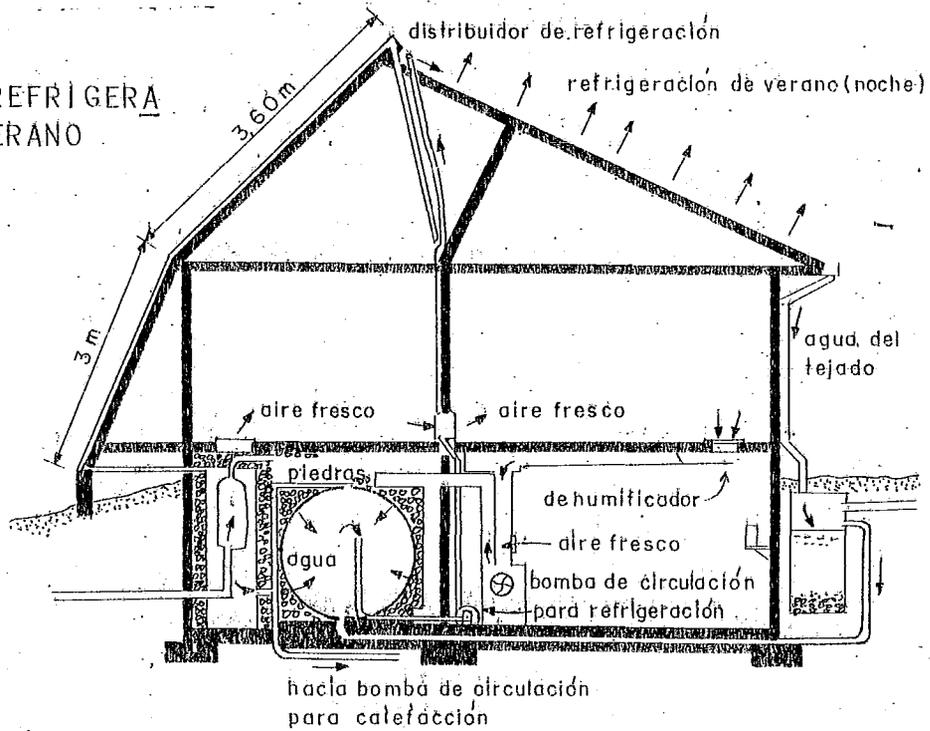
bomba de 0,25 CV

válvula de modulación

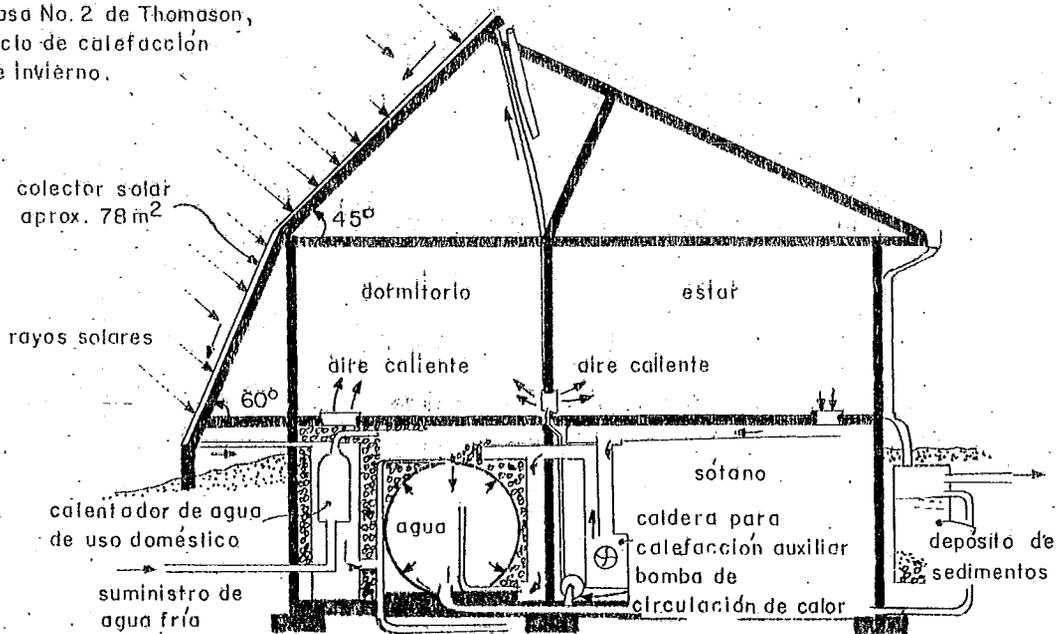
bomba de 0,25 CV

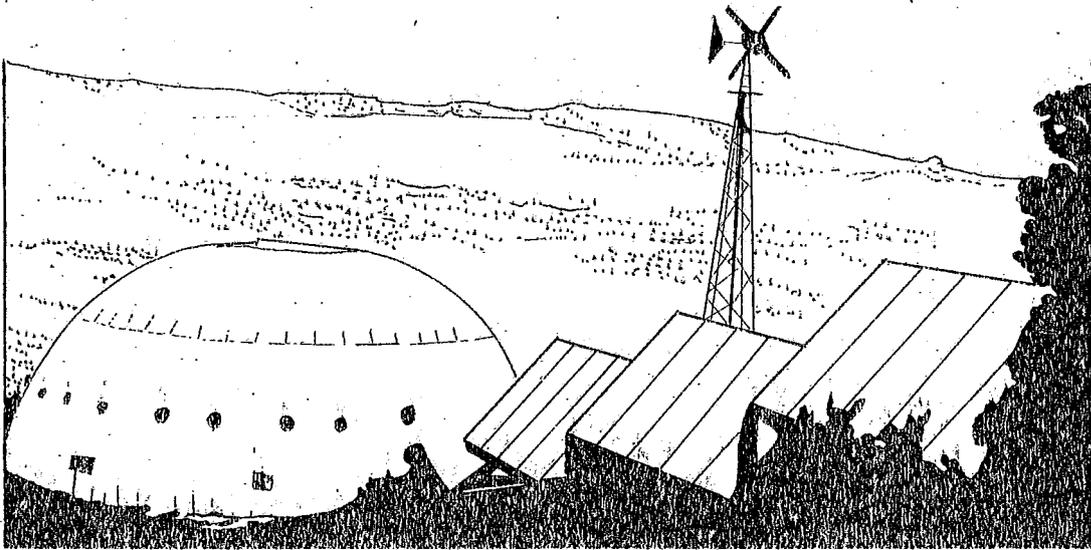
FIGURA 7. CASA NUM. 2 THOMASON (1960)

CICLO DE REFRIGERACION DE VERANO



Casa No. 2 de Thomason, ciclo de calefacción de invierno.





CASA CUPULA, TIJERAS, ALBUQUERQUE, NUEVO MEXICO.

FIGURA 10. LABORATORIOS DE SISTEMAS INTEGRADOS DE MANTENIMIENTO DE LA VIDA (1972)

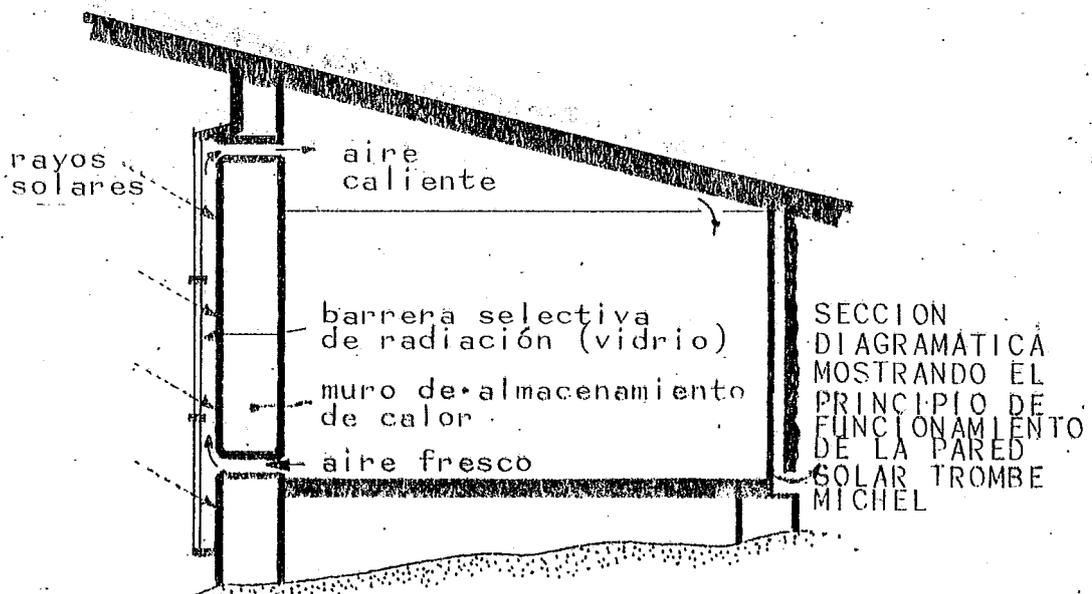


FIGURA 8. CASA SOLAR TROMBE-MICHEL (1970)

con aislamiento en la superficie interior, posee una capacidad de almacenamiento térmico de 18,000 Kcal.

El funcionamiento del muro Trombe es el siguiente: debido al calentamiento que sufre el aire confinado entre la pared del muro y la primera cubierta de vidrio al estar expuesta a la radiación solar, se produce el fenómeno de convección natural mediante el cual penetra el aire más frío de la habitación por la ventila inferior y éste al calentarse se expande, asciende y sale por la ventila superior. Además de la ganancia calorífica producida por la termocirculación del aire, el muro almacena una gran cantidad de energía que se conduce hacia la superficie de éste y radia calor hacia la habitación una vez transcurrido el tiempo necesario para conducir el calor a lo largo del muro. La ventaja del almacenamiento de energía consiste en que aún después de ocultarse el sol la convección continúa por un cierto tiempo además de que aún en días nublados y consecutivamente nublados el muro sigue radiando hacia el interior de la habitación. Para evitar que durante las noches y en días muy nublados se invierta la circulación del aire y en consecuencia se produzca un enfriamiento del mismo, se recomienda que el muro tenga su base por debajo del nivel del piso formando con la losa del piso por la parte interior y con el vidrio no por la parte exterior una especie de U (sello) donde queda atrapado el aire frío en caso de producirse la circulación inversa. Durante el Verano el aire caliente del colector es expulsado al exterior por la parte superior de la pared a través de una ventila produciéndose así una ventilación por convección (efecto chimenea).

Según Trombe a la latitud de Odeillo y para un edificio con suficiente aislamiento, un metro cuadrado de pared solar es suficiente para calentar diez metros cúbicos de espacio interior. En el solsticio de invierno, la pared recibe 7 Kwh/m<sup>2</sup>/día, y 1.7 kwh/m<sup>2</sup>/día en el solsticio de verano. El sistema de calentamiento solar suministra el 70% de los requerimientos totales en Invierno (temperaturas exteriores bajo 0°C).

CASA NUM. 1 DE THOMASON. (semejante a la figura 7)  
Construida en Washington, D. C. en 1959.

El colector está colocado sobre la pared sur y el tejado. Está construido de lámina metálica acanalada bajo una capa de plástico transparente, y una cubierta de vidrio. Mide 78m<sup>2</sup> con una inclinación de 60° en la sección inferior (de pared) y 45° en la sección superior (de tejado). Se almacena calor real en un depósito de agua de 6,000 litros rodeado de 50 toneladas de gravilla, que actúa conjun

tamente como almacenamiento y aislamiento. Hay también un depósito de 1,000 litros para agua pre-calentada de uso doméstico. Del colector al depósito se usa agua de 55°C máximo como medio de transporte de calor, y del depósito a los recintos aire que circula entre las piedras alrededor del depósito de agua. Se alcanzó el 95% de la calefacción por medio del sol y puede almacenarse calor por cinco días nublados. Para la refrigeración se emplea un sistema semejante al de la calefacción, pero dejando correr el agua por la noche sobre la vertiente norte del tejado, construido con una lámina sencilla de metal, para producir refrigeración por evaporación convección y radiación. En noches calientes y húmedas, con cielo nublado y poco viento, se consigue poca refrigeración.

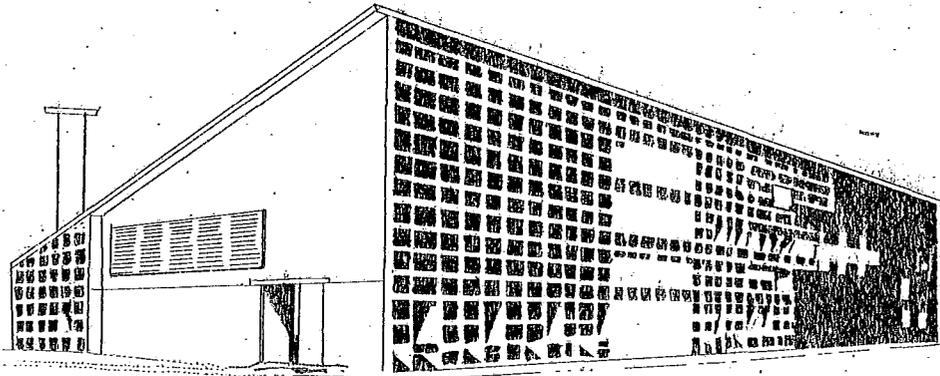
La casa ha estado funcionando sin interrupción durante veinte años. El hecho de que el colector cubra completamente todo el lado sur de la casa produce un buen aislamiento, y cualquier escape de calor de la parte posterior del colector penetra directamente dentro de la casa.

#### ESCUELA SECUNDARIA DE ST. GEORGE, WALLASEY (figura 9)

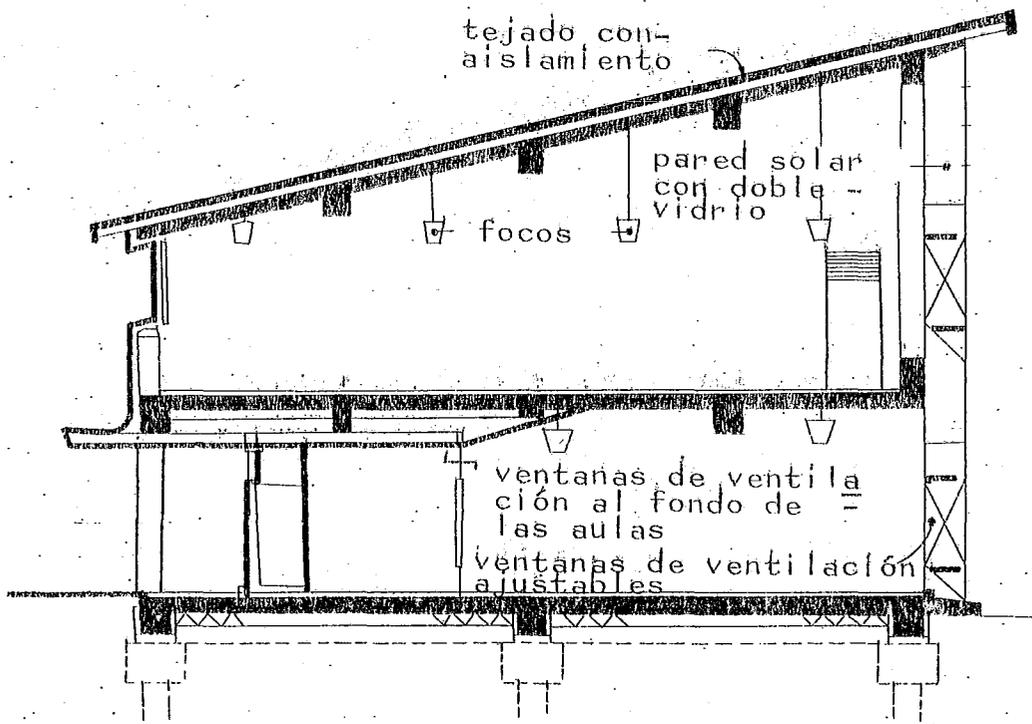
Fue construida en 1961 en Wallasey, cerca de Liverpool. La característica más importante del diseño es una enorme "pared solar" de 12 m de altura en la parte sur del edificio que consta de dos vidrios separados 60 cm, la cara exterior es de vidrio transparente y la interior de un vidrio translúcido de tal forma que penetra al interior luz difusa. El resto de la cara interior está formado de paneles opacos de aluminio pintados de blanco por un lado y en negro por el otro, y reversibles de tal forma que refracten o absorban el calor según la estación. En algunas secciones el vidrio interior del cerramiento se sustituye por un muro de albañilería pintado de negro que también actúa como superficie de colector. El edificio está aislado hasta el máximo mediante paredes muy gruesas. La fachada norte y un tejado de concreto están cubiertos con espuma de poliestireno expandido, el espesor de éste es de 13 cm.

Las luces se encienden por la mañana temprano para calentar el edificio (hasta un 80% de la energía eléctrica invertida en la iluminación se convierte en calor) y se calcula que los alumnos proporcionan una sexta parte del calor requerido (en promedio) en el edificio cada día de invierno, pero la mayor parte de la calefacción es proporcionada por la pared solar. Un sistema de calderas instaladas por las autoridades (por temor a que la pared so-

FIGURA 9. ESCUELA SECUNDARIA DE ST. GEORGE,  
WALLASEY (1961)



VISTA GENERAL DE LA PARED SOLAR



SECCION DIAGRAMATICA

[que no funciona] solamente se ha utilizado una vez en 19 años. Este edificio de tipo calefacción solar es sencillo estricto; es decir, no utiliza colectores especiales ni almacenamiento de energía, sin embargo, si depende para su climatización en invierno, de la radiación solar (incluso en el clima poco soleado del norte de Inglaterra).

#### LABORATORIOS DE SISTEMAS INTEGRADOS DE MANTENIMIENTO DE LA VIDA (figura 10)

Casa cúpula construida en 1972 en Tijeras, Albuquerque, Nuevo México. Consiste en una cúpula hemisférica de 9.60 m de diámetro, con una superficie útil de 60 m<sup>2</sup> a nivel del suelo, y 18 m<sup>2</sup> en el espacio superior. La cúpula está construida con segmentos de acero prensado con aislamiento interior de poliuretano anti-inflamable de 7.5 cm de espesor, tiene 19 ventanas circulares tipo "ojo de buey" de 21 cm de diámetro y un tragaluz de 1.80 m en la parte superior, además de 11 ventanas fijas circulares de diversos tamaños y una rectangular practicable que se utiliza para regular la ventilación. Existe una segunda cúpula con dimensiones parecidas (construida en 1973) que se utiliza como taller. Una entrada alargada (en la cúpula principal) de 2 m actúa acobtravientos.

El colector solar es del tipo plano convencional, separado de la casa, con dos láminas de vidrio en la estructura. El almacenamiento de energía térmica es un depósito de agua de 11,000 litros separado de la casa, con espesor aislamiento de espuma de poliuretano. Contiene un pequeño depósito para agua caliente de uso doméstico. El medio de transporte del colector al depósito es agua con glicerina y del depósito a los recintos es agua que circula por un anillo de radiadores en la base de la cúpula creando así una circulación homogénea de aire caliente por todo el espacio por efecto de la convección. El 100% de la calefacción y agua caliente proviene del sol. Las temperaturas del interior se han mantenido entre 18 y 19°C con temperaturas exteriores de -15 a más de 37°C. Se puede almacenar calor para un máximo de siete días sin sol.

La casa obtiene el 100% de su energía del sol y el viento (con excepción de una estufa de butano); la energía eléctrica, para la iluminación (150 watts en total); el tocadiscos, la radio, la televisión, las herramientas eléctricas y la energía de las bombas utilizadas en el sistema solar, está suministrada por máquinas eólicas adaptadas; de las cuales actualmente funcionan tres que generan un total de 4 Kw. La electricidad se almacena en 16 baterías de plomo con capacidad suficiente para siete días sin viento; el circuito de la casa está a 110 V (corriente alterna).

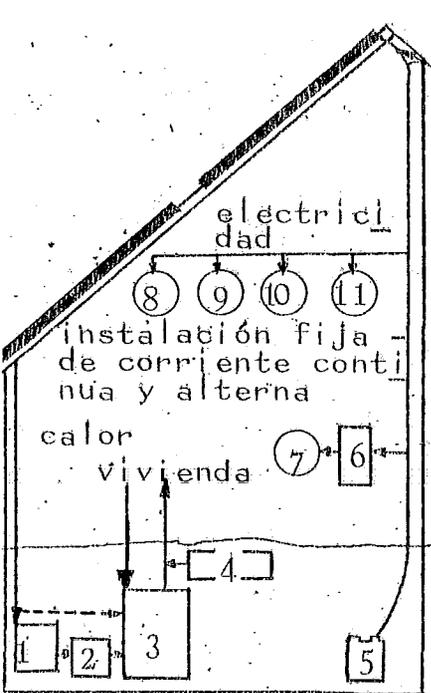
Se han fabricado ya las piezas para dos cúpulas más que están por construirse. Se han comenzado experimentos de horticultura hidropónica, utilizando lechos calentados por el sol con aislamiento de espuma plástica.

#### SOLAR UNO DE LA UNIVERSIDAD DE DELAWARE (figura 11)

Fue construida por el Instituto de Conversión de Energía de la Universidad de Delaware en 1973. Es una vivienda unifamiliar de dos plantas con sótano y una superficie útil de 140 m<sup>2</sup>. El colector tiene una área de 74 m<sup>2</sup> con una inclinación de 45°, es del tipo eléctrico y térmico combinado y consiste en 25 paneles de 1.20 x 2.40 m instalados en el tejado; de los cuales, sólo algunos tienen celdas solares incorporadas y se pretende que en un futuro próximo todos las tengan. Los demás paneles son colectores térmicos planos convencionales con cubiertas dobles de plexiglás. Los paneles electrotérmicos combinados llevan celdas solares de película fina de CdS/Cu<sub>2</sub>S fijadas a láminas transparentes y cubiertas con dos láminas de plexiglás separadas por una cámara de aire. Las celdas presentan una superficie superior negra y producen simultáneamente corriente eléctrica y absorben el calor del sol. El calor es recogido de la parte posterior de las celdas, utilizando aire como medio de transporte a través de conductos bien aislados. El director del proyecto, R.W. Boer, supone un rendimiento de conversión de las celdas de sulfuro de cadmio del 7% y se cree que con el tiempo este valor podrá elevarse al 16%. El rendimiento total de conversión del colector es del 50%.

El almacenamiento de la energía térmica (en este caso calor latente) se hace en depósitos de sal eutéctica. El depósito básico, con capacidad para 50,000 kcal, contiene sal con una temperatura de fusión alrededor de 24°C; el secundario, de aproximadamente 6 m<sup>3</sup> con capacidad para 250,000 kcal, contiene dos sales eutécticas con puntos de fusión en torno a los 10 y los 49°C, depositadas en diferentes recipientes para ser utilizadas en refrigeración y calefacción respectivamente. Una termobomba funciona entre los 2 depósitos. Al incorporar almacenamiento térmico diseñado para almacenar frío durante el verano y con cierta refrigeración producida por la radiación nocturna de los colectores, se contribuye a equilibrar la demanda de la energía eléctrica.

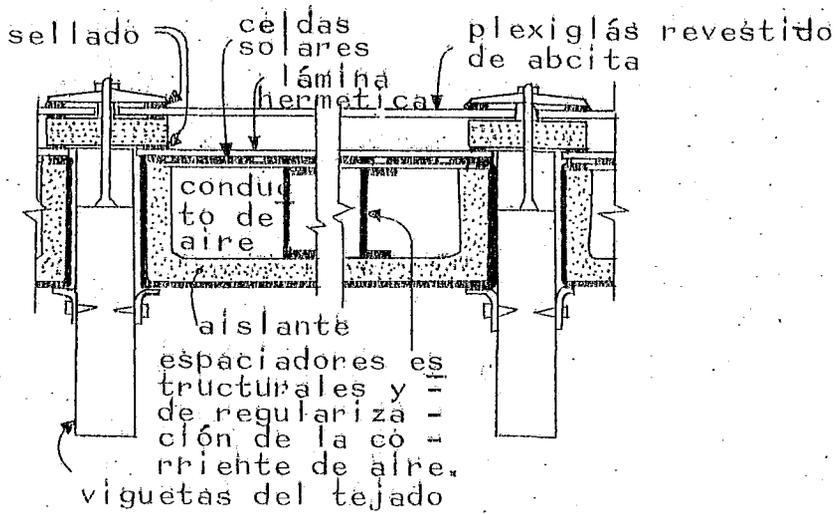
El almacenamiento de energía eléctrica se efectúa en baterías de plomo con capacidad de unos 20 Kwh. Casi todos los circuitos de la casa emplean corriente continua y existe un transformador que proporciona corriente alterna para determinadas cargas. En ocasiones se produce en



acometida a la red

SECCION ESQUEMATICA DE LA SOLAR UNO

1. Depósito de calor básico a 24°C
2. Termobomba
3. Depósito de calor secundario a 49 & 10°C, con permutador de calor
4. Calentador auxiliar
5. Bateria
6. Inversor de corriente continúa a alterna
7. Enchufes
8. Ventilador
9. Hornillo
10. Luz
11. Calentador



SECCION DE UN COLECTOR SOLAR PLANO ELECTRICO/ TERMAL, UTILIZADO EN LA CASA DE DELAWARE

VISTA DE LA FACHADA SUR DE LA CASA CON LOS COLECTORES SOBRE EL TEJADO

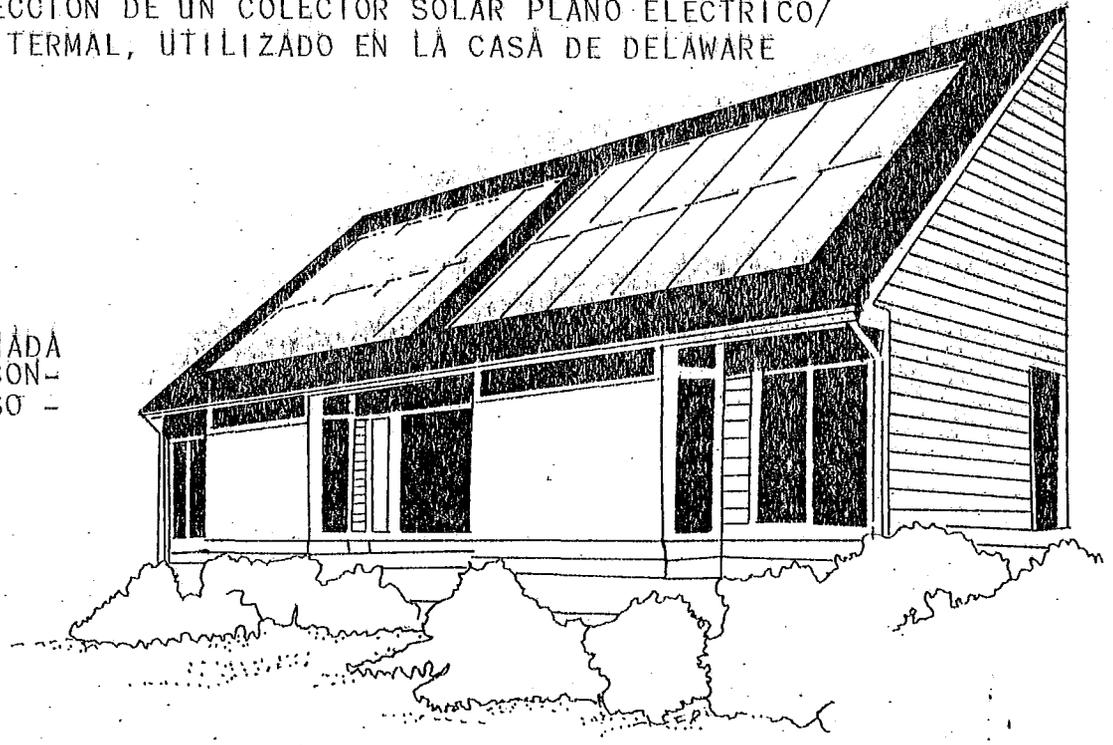


FIGURA 11. SOLAR UNO DE LA UNIVERSIDAD DE DELAWARE (1973).

este tipo de casas un exceso de energía eléctrica, y mayor de la que puede almacenarse, esta puede transferirse a la línea de suministro central de la compañía que abonaría al propietario la energía suministrada.

Esta casa es la primera que ha combinado sistemas solares eléctricos y térmicos y la primera que ha empleado celdas solares eléctricas. Está diseñada para obtener 80% de la energía total necesaria del sol. Cuando el sistema solar eléctrico esté totalmente instalado no satisfará la demanda total de energía eléctrica de la casa, pero su aportación será cuantiosa.

Se está realizando un programa de prueba y evaluación de la casa. Durante el primer año de experimentación se simuló la ocupación de la casa. En los años siguientes ocuparon la casa invitados de la Universidad, y el segundo piso, dedicado actualmente a equipo de medición, será convertido en dormitorios adicionales.

Los edificios descritos son una muestra de lo que es la helioarquitectura. Ejemplifican los dos distintos tipos de sistemas de climatización solar: los sistemas pasivos (figuras 8 y 9) y los sistemas activos (figuras 7, 10 y 11). Los primeros usan medios naturales de transferencia de calor (convección, radiación y conducción) para transportar la energía absorbida por el colector a los lugares de almacenamiento o distribución. Los activos utilizan alguna otra fuente de energía para dicho transporte, como bombas y ventiladores; lo que implica una circulación forzada, activada mediante el consumo de un energético convencional. Muchas veces estos sistemas requieren intercambiadores de calor líquido aire o gas agua (figuras 3, 4, 5, 6, 7, 10 y 11), los cuales incrementan notablemente los costos iniciales de mantenimiento. Esto hace que los sistemas pasivos tengan mayores perspectivas en las áreas rurales ya que sus ventajas económicas son indiscutibles. No obstante, en algunos casos particulares los sistemas activos pueden ser una solución económicamente factible dada su gran eficiencia.

La mayoría de los edificios mencionados acoplan sistemas de enfriamiento y calentamiento a la vez (además de calentamiento de agua) por lo que su operación es prácticamente continua, sobre todo en los sistemas pasivos, ya que éstos no requieren de un nivel de temperatura para operar. Los sistemas activos, especialmente los de refrigeración (figura 3, 4 5 y 6), sí requieren de un nivel de temperatura para operar, como ya se había mencionado. Por este motivo, generalmente se encuentran acoplados a sistemas de climatización convencional, así, cuando la energía so-

lar absorbida por el colector no es suficiente para satisfacer los requerimientos térmicos, es decir, cuando la demanda energética global supera la capacidad del sistema solar, los sistemas activos pasan a ser un sustituto del sistema convencional. En este caso la amortización del equipo solar se realiza en un plazo mucho más largo; aún así, se reducen los costos de climatización.

Las dos viviendas de las figuras 10 y 11 nos muestran también dos perspectivas muy interesantes para la producción de energía eléctrica. Ambas a partir de fuentes limpias, no contaminantes: la energía eólica y la energía solar, respectivamente. La atracción particular del edificio de la figura 11 es que integra las celdas solares en una combinación de colector térmico y generador de electricidad. Baja California es una de las áreas de mayor insolación del mundo, lo que ha provocado que especialistas nacionales y extranjeros se interesen en probar la capacidad de la energía solar para producir electricidad en gran escala en esta zona ("Plan Sonntlan") aplicando los principios del funcionamiento de las celdas solares. La viabilidad de esta "nueva fuente" para tal fin, depende en gran medida de factores económicos. El costo actual de las celdas de CdS/Cu<sub>2</sub>S, producidas individualmente en el laboratorio, es muy alto. No obstante, una producción en serie lo disminuye notablemente. Hay que contar también con el costo de almacenamiento en baterías de calentadores auxiliares y otras piezas del equipo.

De la misma manera, éstos edificios exhiben los dos tipos de almacenamiento de energía térmica más comunes: calor real (en el de Tijeras, Albuquerque), y calor latente (en el de la Universidad de Delaware). Así como de los dos fluidos para transporte de calor más empleados: agua y aire.

Para terminar diremos que la actividad en el campo de la helioarquitectura crece rápidamente. Las casas mostradas constituyen una pequeña parte de lo que se ha hecho (más de 50 en América hasta 1974). Existen de menos otros 30 proyectos de carácter suficientemente firme y que tienen bastante probabilidad de llevarse efectivamente a la práctica. Ofrecen diseños de particular interés que no describiremos, pero si diremos que la tecnología solar desarrollada está bastante adelantada, los diseños se complican cada vez más, de tal manera, que unos diagramas esquemáticos de los sistemas de climatización solar, parecen diagramas de flujo de algunos procesos industriales. Han surgido nuevas áreas de desarrollo: la aplicación de calefacción solar en edificios mayores que una casa o en laboratorios experimentales, y varios experimentos nuevos con sistemas de refrigeración solar.

Es posible que si se desarrolla una industria de calefacción solar de cierta envergadura, puedan en el futuro producirse unidades completas para áreas climáticas específicas, incluso con modelos que se acoplen a sistemas de construcción prefabricada. El grupo de la Universidad de Pensylvania ha realizado algunos estudios en detalle -- acerca de cómo adoptar un diseño modular de colector con unidad de almacenamiento a proyectos actuales de viviendas urbanas. Una compañía de Francia ha introducido un sistema industrializado de construcción de viviendas, utilizando acero, que incorpora "paredes solares" del tipo de Trombe-Michel.

El Solar Energy Panel de la NSF/NASA calcula (2) -- que el 10% de los edificios nuevos, de Estados Unidos, podrán tener sistemas combinados de calefacción y refrigeración solar en 1985; que para 1990 un 10% de todos los edificios, antiguos y nuevos, podrán tener calefacción solar y para el año 2000, sistemas combinados de calefacción y refrigeración. Por último, predicen que a la larga podría ahorrarse de un 30 a un 80% del combustible y electricidad que ahora se emplean en calentar y refrigerar ambientes.

### CAPITULO III

#### DISPONIBILIDAD DE LA ENERGIA SOLAR EN MEXICO

La disponibilidad de la energía solar en cualquier lugar de la tierra depende fundamentalmente de su localización geográfica y de su clima. Veamos primero estas cuestiones relacionadas con la climatización solar.

Los datos meteorológicos obtenidos sobre la radiación solar miden la energía recibida sobre una superficie horizontal en un lugar determinado. Esta radiación recibida ya sea en forma directa o difusa, forma en conjunto la radiación global (figura 1). La radiación solar puede medirse en Langleys por minuto o en watts por minuto (un langley equivale a una caloría por centímetro cuadrado).

La intensidad de la radiación solar que alcanza cualquier punto de la tierra varía según la latitud geográfica, la estación y la hora del día, que a su vez dependen esencialmente de la geometría de la órbita terrestre alrededor del sol, y de la rotación de la tierra sobre su propio eje. La intensidad varía también con las atenuaciones que sufra en su trayecto atmosférico debido a los fenómenos de absorción, reflexión y dispersión, ocasionados por la nubosidad, la niebla o el polvo de la atmósfera. En una atmósfera clara la radiación total puede estar dispersa incluso hasta un 10%, ya que aún cuando no haya nubes, la atmósfera, el vapor de agua y las partículas de polvo dispersan la radiación solar de manera bastante apreciable. Estos factores pueden hacer variar la intensidad entre 0 y aproximadamente 1.5 langleys/minuto. La cifra media de radiación recibida por una superficie inclinada de modo que intercepte al sol de frente y bajo un cielo sin nubes, es aproximadamente de 1 langley/minuto. En promedio, el techo de una casa de 100 m<sup>2</sup> que reciba una media de 1 langley/minuto durante 8 horas al día en que brilla el sol recibe aproximadamente 550 kw-hora de energía de radiación, o el equivalente en energía calorífica de la combustión de 65-kg de carbón ó 55 litros de gasolina.

La inclinación del sol varía según la latitud geográfica, la estación y la hora del día. La figura 2 muestra la trayectoria diaria de sol tal y como es vista por un observador situado en el punto (0), para el cual; el

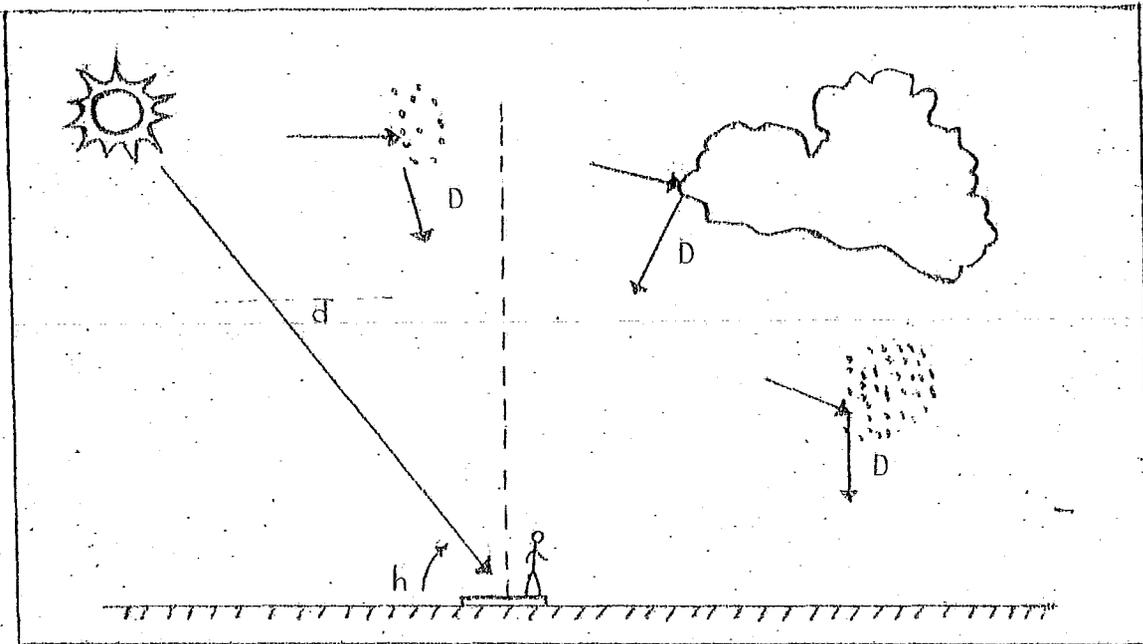


FIGURA 1. RADIACION SOLAR GLOBAL: DIRECTA+ DIFUSA

radiación difusa (D)

radiación directa (d)

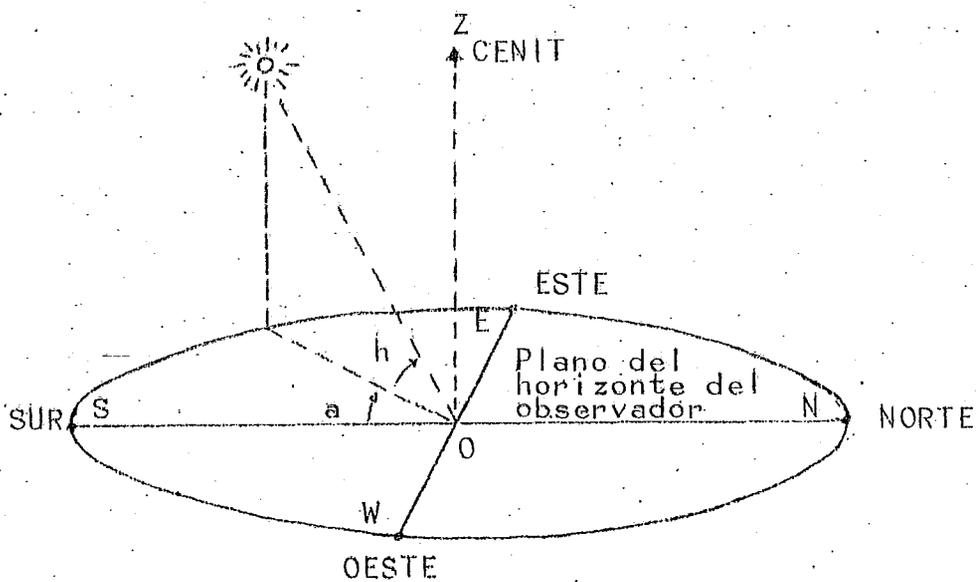


FIGURA 2. ACIMUT Y ALTURA SOLAR

círculo SWNE es su horizonte; (z) el cenit; (h) el ángulo de la altura solar instantánea, y (a) el acimut correspondiente (medido respecto al sur). A mayor inclinación de los rayos del sol aumenta el espesor de la atmósfera por la que tienen que cruzar, y por lo tanto su intensidad por unidad de superficie es menor. En estos casos es necesario inclinar la superficie de cualquier colector solar hasta alcanzar un ángulo que en su situación ideal sería directamente perpendicular a los rayos del sol. Idealmente la superficie plana del colector debería estarse moviendo continuamente (según la estación del año) coplanarmente a la inclinación de las trayectorias solares locales y barriendo diariamente el ángulo comprendido entre la salida y puesta del sol. Pero esto generalmente no se hace a causa de la complicación (y el costo) que entrañaría el mover el colector con algún mecanismo automático. Normalmente es más fácil usar un colector plano fijo cuyas dimensiones y características de construcción permitan captar eficientemente la radiación solar, y colocándolo en una posición intermedia según la trayectoria anual del sol respecto al sitio escogido. Esta trayectoria puede examinarse mediante una gráfica solar correspondiente a la latitud del lugar, por ejemplo, en la figura 3 se observa la proyección sobre el plano del horizonte de las trayectorias del sol a la latitud de  $32^{\circ}\text{N}$ , donde el ángulo de la altura solar (h) se lee radialmente de afuera hacia adentro dentro de la gráfica a partir de cero grados (salida del sol) hasta la altura máxima (al medio día que varía según la época del año). El ángulo acimutal (a) (medido sobre el horizonte a partir de la dirección sur) puede leerse sobre el perímetro de la gráfica. Ambas coordenadas pueden leerse para cualquier hora solar y aproximar según la fecha del año.

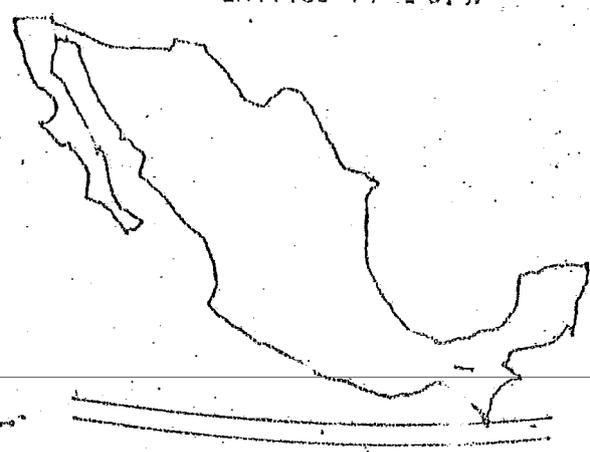
Otro tipo de gráficas solares, como las mostradas en las figuras 4, 5 y 6, muestran la componente de la radiación solar recibida directamente sobre planos verticales orientados hacia los cuatro puntos cardinales para las latitudes de  $66^{\circ}33'$ ,  $33^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  respectivamente. De éstas observamos que una pared sur (y la pared norte para el hemisferio sur) es iluminada directamente durante todo el año, ya que el sol se encontrará situado al sur de ésta. Por el contrario, la pared norte sólo será iluminada directamente durante la Primavera y el Verano en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde. La iluminación directa sobre el plano Este-Oeste es continua durante todo el año, por las mañanas la pared Este es la iluminada y por las tardes la Oeste; por ello un sistema pasivo generalmente tiene fachada alargada sobre la dirección Oriente-Poniente, con el colector en la pared sur (para calefacción en invierno y protección del sol durante el verano) y con un ángulo de inclinación de éste que corresponde casi



10  
0  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

KWH/M2 - DIA

LATITUD  $14^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$



POBLACIONES :

Puerto Madero, Chis.  
Cd. Hidalgo, Chis.

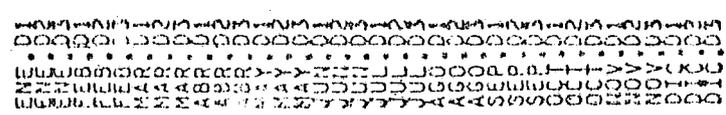


FIG. 8

Central en el hemisferio sur. Es bien conocido que las zonas de máxima insolación anual son aquellas donde se encuentran las grandes zonas desérticas de la tierra y las zonas áridas y semi-áridas de México abarcan alrededor del 41% de todo el territorio nacional.

La energía solar disponible en la República Mexicana es cuantiosa por encontrarse dentro de la zona mundial de máximo asoleamiento. México está clasificado como un país privilegiado en cuanto a intensidad, duración y calidad de la insolación. Si consideramos que el promedio diario de la energía solar recibida en el transcurso del año es de  $5.5 \text{ Kwh.m}^{-2}$ , se tiene que para la extensión territorial nacional de  $1,972,547 \text{ Km}^2$ , la energía solar recibida diariamente sobre todo el país es de aproximadamente  $10.85 \times 10^{12} \text{ Kwh.}$ , o sea,  $39.59 \times 10^{14} \text{ Kwh. año.}$  Comparando esta cantidad con la que anualmente incide sobre los Estados Unidos de Norteamérica que aproximadamente equivale a  $9 \times 10^{15} \text{ Kwh. año.}$ , resulta que en México recibimos el 44% de esta cantidad, no obstante que contamos con sólo la quinta parte de su extensión territorial.

En particular el noreste del país principalmente la península de Baja California y los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Sinaloa, etc., así como la parte norte de la península de Yucatán, gozan de magníficas condiciones de insolación. En el noroeste de México, la energía que se recibe diariamente durante el verano es en promedio mayor  $8.00 \text{ Kwh.m}^{-2}$ , y en los estados menos favorecidos de la vertiente del golfo de México en los meses menos soleados de invierno, el valor mínimo es de aproximadamente  $3.50 \text{ Kwh.m}^{-2}$ . Puede decirse, en consecuencia de lo anterior, que en las regiones más asoleadas de México, el aprovechamiento de la energía solar puede llevarse a cabo tanto mediante dispositivos de captación de radiación directa como difusa; es decir, mediante captadores concentradores o planos. Por el contrario, en las regiones menos asoleadas, queda restringido el uso de dispositivos concentradores, siendo los colectores planos los más eficientes en estas zonas.

En el mapa de la figura 9 se muestra la distribución anual de la radiación solar global (promedio diario), y en el mapa de la figura 10 se muestra el promedio anual del número de horas mensuales de insolación.

En ambos mapas pueden apreciarse zonas de baja insolación, como los estados comprendidos en la vertiente del Golfo de México, pero los valores de insolación resultan ser relativamente elevados al compararse con los va

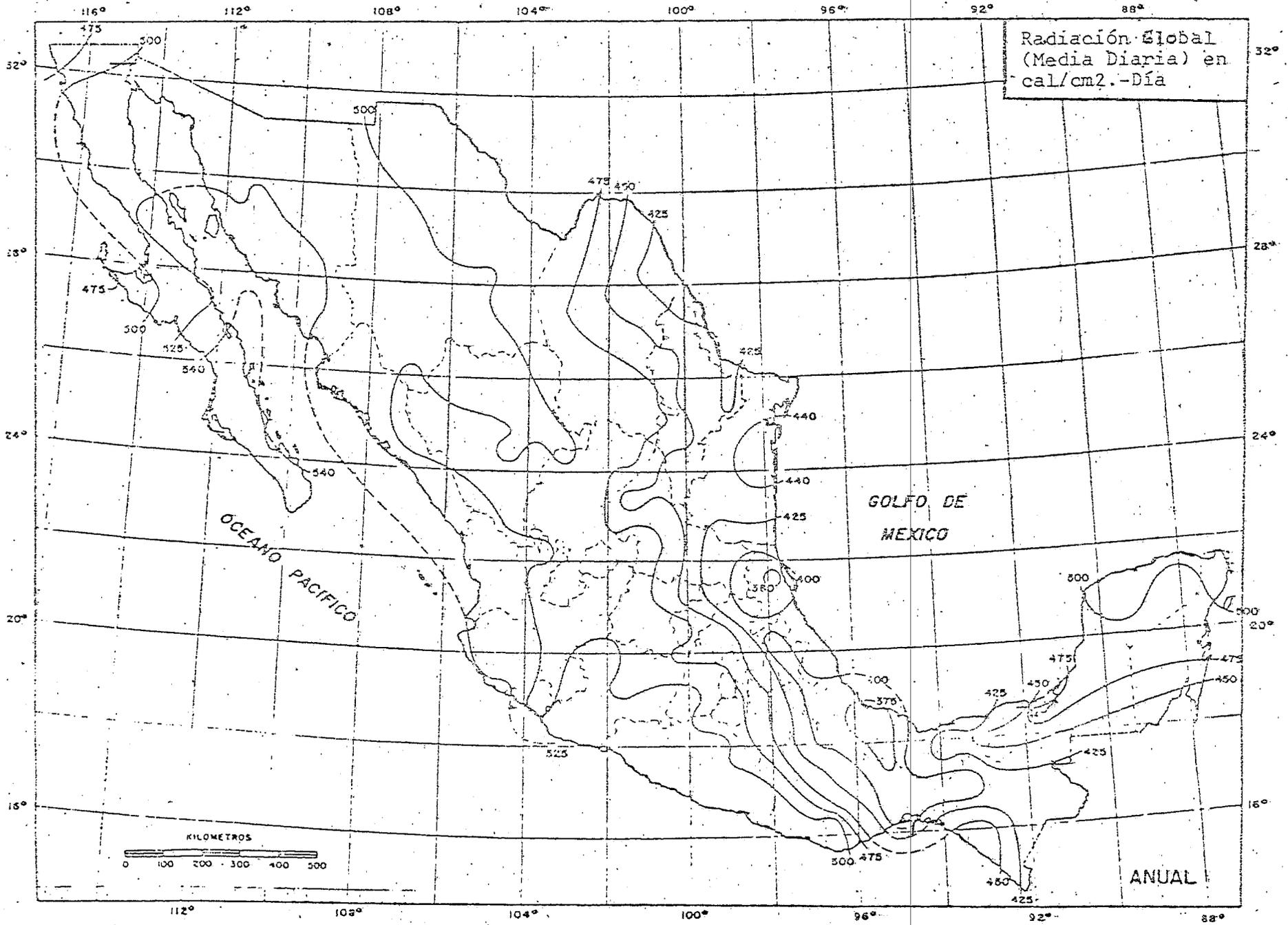
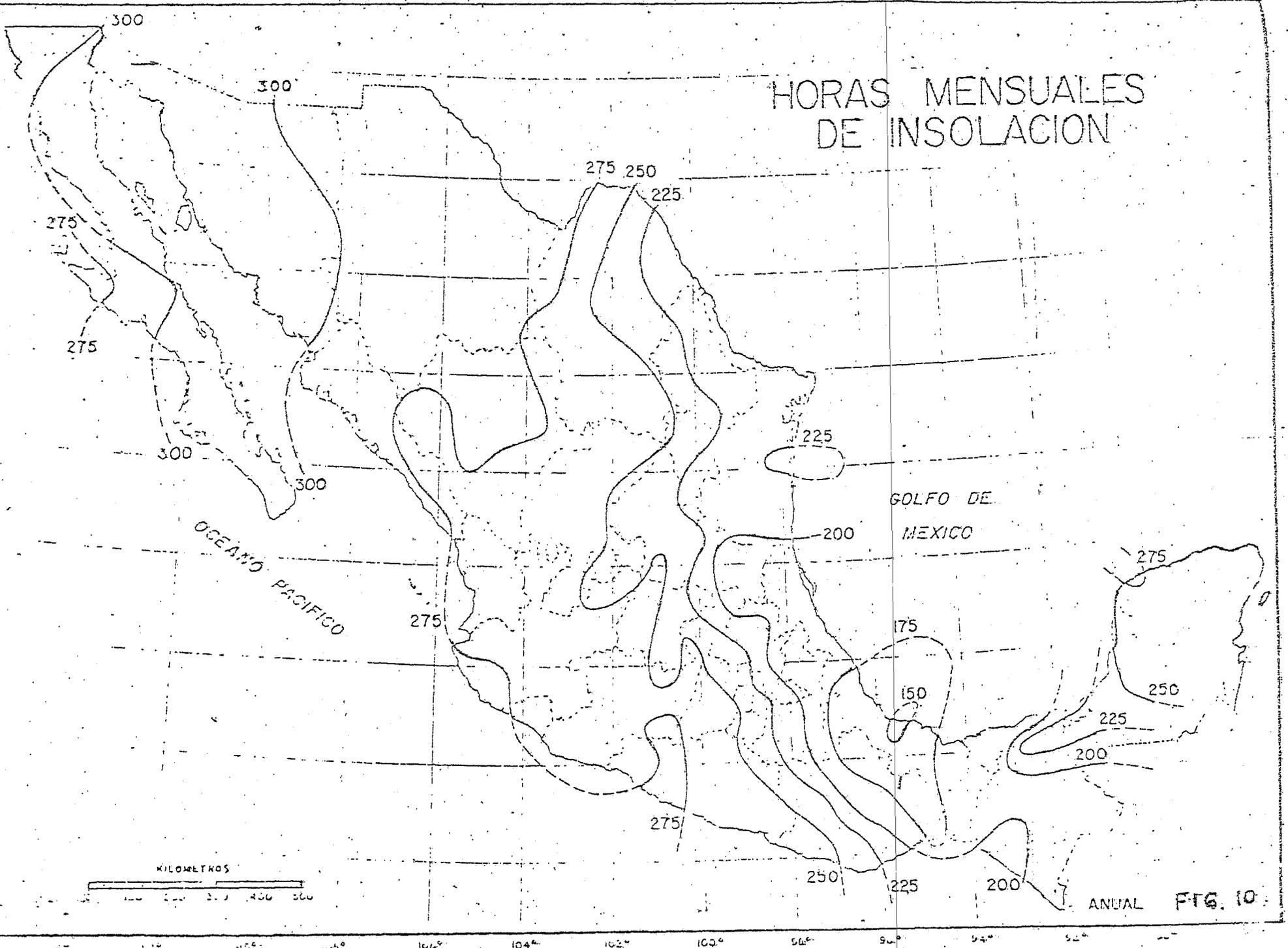


FIG. 9

# HORAS MENSUALES DE INSOLACION



ANUAL FIG. 10

lores que se registran en promedio anual en otros países de América, Europa y Asia situados más al norte de nuestro hemisferio.

La distribución anual de la insolación (que se muestra en el mapa de la figura 9), puede resumirse en el siguiente cuadro.

DISTRUBUCION ANUAL DE LA INSOLACION

Categoría	Características	Porcentajes aprox. que ocupan de la sup. total del territorio nacional.	Extensión territorial (aprox.) (Total=1,972,547 Km <sup>2</sup> )
I	Regiones con más de 500 cal. cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	38	749,570 Km <sup>2</sup>
II	Regiones comprendidas entre 500 y 400 cal. cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	57	1,124,350 Km <sup>2</sup>
III	Regiones con menos de 400 Cal. cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>	5	98,627 Km <sup>2</sup>

Considerando que anualmente el 95% del territorio nacional recibe más de 400 cal. cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (4.65 Kwh.m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>), las perspectivas de aprovechamiento de la energía solar son excelentes; tenemos muchos tipos de clima y cada uno con diferentes usos potenciales del sol. En especial las zonas áridas y semiáridas de México (que ocupan casi el 41% del país) son las más beneficiadas, disfrutan de una espléndida insolación anual y como estas zonas se encuentran casi siempre alejadas de los centros distribuidores de combustible, la energía solar puede servir como fuente energética primaria.

La cantidad de sol disponible a lo largo del año es el único factor importante cuando se trata de utilizar la energía solar en la edificación. En el caso del calentamiento solar de agua, la demanda es relativamente constante a lo largo de todo el año, y el agua caliente es tan-

necesaria en climas calientes como en fríos. No obstante, en el caso de calefacción o refrigeración de edificios, en los climas calientes se necesita poca calefacción y en los fríos poca refrigeración, y en ambos casos la demanda varía bastante según la estación.

Hay cierto equilibrio y simetría en lo que respecta a la utilización de energía solar para la refrigeración, ya que las épocas en que ésta es más necesaria son precisamente aquellas en que se dispone de más energía, ya sea en cuanto a las horas del día o las estaciones del año. Por ese motivo los sistemas de refrigeración solar necesitan de menos equipos de almacenamientos de energía que los sistemas de calefacción. Las perspectivas de refrigeración solar en países tropicales son especialmente buenas.

Pero en lo que respecta a la calefacción solar - ocurre todo lo contrario y es precisamente en los meses de invierno, cuando la radiación solar es menor cuando más se necesita esta energía. En términos generales podemos decir que el clima más apropiado para tener calefacción solar es aquel que tenga temperaturas frías en invierno, pero con sol abundante al mismo tiempo. Estas condiciones se dan sobre todo en las latitudes altas, pero no siempre de una manera regular.

No sólo son importantes las condiciones medias de la radiación solar, sino también los valores extremos. En particular, para la calefacción solar, son importantes los extremos inferiores. La frecuencia de días nublados consecutivos que es probable que se den en un lugar determinado tiene consecuencia importante en cuanto a los requisitos de capacidad de almacenamiento térmico en las instalaciones de calefacción.

Lo que es importante al considerar varias zonas geográficas con vistas al empleo de calefacción solar es la relación que se da en cada caso entre la radiación media de invierno, y la temperatura media de invierno expresada en "grados día de calefacción" (es la expresión de la diferencia entre la temperatura media ambiente exterior y 18°C de cada mes, multiplicada por el número de días que tiene el mes, en este caso para invierno, sería la suma de los tres meses correspondientes).

Ese dato será fijo para cualquier proyecto, pero según las condiciones climatológicas de cada lugar, variarán las medidas más apropiadas de conservación o control del calor (aislamiento, control de la orientación del edificio, control de su forma, superficies, ángulos y orienta

ción del edificio; control de su forma, superficies, ángulos y orientación del colector, y muchos otros factores).

Una consideración a fondo y una respuesta a estos factores podrá tal vez aportar un nuevo enfoque regionalista a la arquitectura.

---

## CAPÍTULO IV

### SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACION SOLAR (SPCS)

Los sistemas pasivos de climatización solar utilizan la estructura misma de la vivienda tanto como para co-  
lectar como para almacenar la energía calorífica. Los de -  
calentamiento usan elementos de la construcción para alma-  
cenar y distribuir energía. Los de enfriamiento también --  
usan elementos de la construcción para almacenar y distri-  
buir energía y, cuando las condiciones prevalecientes son  
favorables, para descargar calor a las partes frías del me-  
dio ambiente (tierra, atmósfera, espacio exterior). en am-  
bos casos la transferencia de energía para la construcción,  
de la construcción al exterior, y dentro de la construc-  
ción se realiza exclusivamente mediante fenómenos natura-  
les; es decir, por conducción, convección y radiación.

Puesto que en los sistemas pasivos la colección, -  
descarga, almacenamiento, y distribución de energía es ge-  
neralmente realizada por los elementos arquitectónicos com-  
ponentes de la construcción, no son fácilmente distingui-  
bles del resto de la estructura; sin embargo, son tres los  
elementos principales que los constituyen; estos son:

- un espacio para ser calentado o enfriado
- un colector donde la radiación solar sea admiti-  
da dentro del sistema y convertida a calor por-  
un absorbedor
- un almacendaro térmico

El espacio puede ser desde una simple habitación-  
hasta una construcción muy grande (viviendas, edificios de  
oficinas, etc.) Este espacio puede tratarse como un todo o  
como una variedad de multi-zonas, es decir, todo el espa-  
cio estará sujeto a un esquema de comportamiento térmico, -  
o el espacio estará dividido en multi-zonas de tal manera-  
de que cada zona pueda ser individualmente diseñada para -  
satisfacer los requerimientos térmicos y de iluminación --  
dictadas por la intención funcional del espacio. Natural-  
mente, el transporte de energía será muy crítico en cons-  
trucciones de gran escala, particularmente para aplicacio-  
nes comerciales de gran ocupación (ya que la temperatura -  
de equilibrio en el interior del local entre la temperatu-  
ra del organismo de los ocupantes y la temperatura del me-

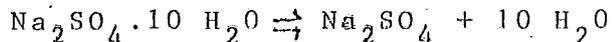
dio ambiente exterior será más difícil de predecir) o situaciones donde se requieran grandes flujos de ventilación, (ya que se requerirá que en el lugar exista gran frecuencia de vientos y como éstos a veces son irregulares y con diferentes intensidades causan cambios imprevistos en el transporte de energía). Otros factores que intervienen en los intercambios de energía son: la humedad relativa del aire, el número de renovaciones de éste, la disposición de las aberturas de entrada y salida del aire (puertas, ventanas, ...), etc.

El colector solar es una estructura plana que consta básicamente de una superficie transparente (generalmente vidrio) y de una superficie captadora (obscura y no reflejante). Esta absorbe la energía solar que pasa a través del vidrio y después la emite en forma de calor, debiendo comportarse como un cuerpo negro perfecto, es decir, el que absorbe toda la energía incidente sin reflejarla; con un tratamiento químico especial se puede aumentar la cantidad de radiación absorbida, estas superficies se llaman "superficies selectivas de radiación". Las investigaciones sobre este tipo de superficies se han dirigido principalmente a su aplicación en sistemas de energía solar en que se necesitan temperaturas muy altas y por lo tanto el máximo rendimiento de los colectores, pero alguna modalidad barata de pintura selectiva puede ser de gran valor para aumentar el rendimiento de los colectores planos empleados en edificios. La placa de vidrio (muchas veces doble) debe ser transparente a la radiación incidente y opaca a la radiación infrarroja (calor) que emite la superficie captadora. Una vez traspasado el vidrio, la radiación solar calienta el aire y la superficie captadora, esta irradia energía de nuevo pero de una longitud de onda mayor, a la que el vidrio, es opaco. Gran parte de esta energía se pierde de nuevo hacia el exterior a través del vidrio, pero el resultado neto, como en los invernaderos, consiste en que la temperatura interior, se eleva por encima de la exterior sin ninguna otra fuente de calor que el sol. Las pérdidas de calor del colector son por convección y conducción al aire que lo rodea, y otra porción por conducción a las partes adyacentes del sistema de colección o de la estructura que lo sostiene. Lo que queda se extrae hacia el depósito de calor a través de un medio de transporte de calor que puede ser aire, agua u otro líquido. Es importante que la superficie trasera del colector esté bien aislada para que las pérdidas por conducción a través de ella sean mínimas; la unión de la cubierta de vidrio con el marco del colector también debe estar bien sellada de modo que no pueda pasar nada de aire y se eviten así las pérdidas por convección; el marco se hace generalmente de madera, plástico o metal delgado y también ésta cons--

trucción debe estar hecha de modo que las pérdidas sean mínimas. El uso de más placas de vidrio permite menos pérdidas de radiación infrarroja hacia el exterior pero reduce la transferencia de energía solar a la superficie captadora. Una combinación adecuada puede aumentar la eficiencia. El espacio óptimo entre estas placas es de unos 2 ó 3 cm.

En un diseño tipo de un colector plano para climatización de edificios (entendamos por edificio cualquier tipo de construcción), después de la unidad transparente y de la superficie captadora se encuentra la unidad almacenadora de calor. En términos generales se puede almacenar el calor de dos maneras. En el primer caso usando materiales de alta capacidad calorífica, es decir, almacenando calor real en materiales tales como hormigón, piedra, agua, etc. y utilizando en cualquier caso pinturas y recubrimientos oscuros (superficies selectivas). Mediante depósitos especiales es posible almacenar energía y proporcionar el calor necesario para calentar las capas de aire adyacentes en una habitación con lo cual se origina el ascenso del aire caliente que va siendo reemplazado por el aire frío proveniente de los niveles inferiores de la habitación. La otra manera de almacenar calor consiste en emplear sales, y a veces ceras que se derriten a determinada temperatura o que sufren una transformación química dentro de los límites de temperatura en que el calor tiene que almacenarse. Por este sistema las materias químicas almacenan tanto el calor real como el latente y pueden conservar mucha mayor cantidad de calor por unidad de volumen que los depósitos de agua o los bloques de piedra. También pueden usarse sistemas semejantes para almacenar frío para la refrigeración. Además de los cambios de estado físico, el calor latente se puede también almacenar mediante ciertas reacciones químicas. Por ejemplo, uno de los materiales más usados para almacenamiento de calor ha sido el sulfato sódico hidratado o sal de Glauber, cuya fórmula química es  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ . Es una substancia relativamente barata y en cualquier caso, se necesitan cantidades mucho menores que las que se requerirían usando piedras o agua.

Cuando la sal de Glauber alcanza temperaturas por encima de los  $32^\circ\text{C}$  se disocia en la forma anhidra  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y agua resultando una solución concentrada de sal en agua. La reacción es:



Según avanza la reacción en una dirección almacena mucho calor, y según avanza en la otra, lo expulsa. Para uso práctico, lo que se necesita es una reacción química

ca o un cambio físico que se produzca dentro de los límites de temperatura en que se recoge y almacena el calor y para la calefacción la reacción de la sal de Glauber a  $32^{\circ}\text{C}$  resulta muy apropiada. Sin embargo, algunas experiencias en casas solares de Estados Unidos han demostrado que esta reacción a medida que pasa el tiempo (poco más de un año) disminuye su reversibilidad por lo que se están realizando estudios para alargar su efectividad para períodos más prolongados.

La importancia del almacenamiento de calor latente a diferencia del almacenamiento de calor real que se hace por medio de piedras o agua, reside en que generalmente se necesita menos volumen de almacenamiento para una capacidad térmica dada. Para que una sustancia se derrita necesita de un calor que necesariamente deberá extraer de sus alrededores. Suponiendo que determinado material se funde a los  $32^{\circ}\text{C}$ , el calor que se necesita para aumentar su temperatura de  $31^{\circ}\text{C}$  a  $33^{\circ}\text{C}$  y producir la transición del estado sólido al líquido es mucho mayor que la que se necesitaría para aumentarla desde, por ejemplo,  $30^{\circ}\text{C}$  a  $31^{\circ}\text{C}$  o de  $33^{\circ}\text{C}$  a  $34^{\circ}\text{C}$ . Cuando la temperatura del material líquido disminuye de nuevo, en este caso por debajo de  $32^{\circ}\text{C}$ , al retirarse el calor exterior expulsa este "calor latente de fusión" y se solidifica. Como consecuencia, si se almacena este calor latente en lugar de guardar sólo calor real, se necesitará un depósito de menor tamaño que puede funcionar también con temperaturas más bajas y necesitar menor aislamiento.

La selección de una unidad almacenadora de calor se hace en base del volumen requerido y de su costo. La capacidad calorífica de la piedra es bastante menor que la del agua, pero su densidad es mayor; así, cuando se usa agua se requiere un volumen de almacenamiento de aproximadamente un  $\text{m}^3$  por cada  $\text{m}^2$  de colector, las piedras sin embargo, requieren un volumen tres veces mayor para retener la misma cantidad de calor que el agua. Los productos químicos permiten disminuir el volumen requerido a una décima parte, aunque su elevado costo y los riesgos de contaminación del fluido circulante restringen mucho su uso.

Hay dos maneras de hacer funcionar el muro almacenador, la primera de ellas es dejando que actúe mediante carga y descarga de calor. La otra manera más adecuada sería hacerlo adiabático mediante medios de aislamiento adecuados como vidrio, espuma de poliuretano, poliestireno, polietileno, fibra de vidrio, etc. La distribución de la energía colectada es transferida entonces (como veremos más adelante) ya sea por radiación de la pared almacenadora al espacio y/o por convección natural del aire caliente sobre el frío.

Las variables más importantes en la construcción de un colector de superficie plana para climatización de edificios son la orientación y el ángulo de inclinación -- (factores que ya vimos en el capítulo anterior); las propiedades ópticas del vidrio y otros materiales transparentes de las capas que lo cubren; las propiedades de absorción de la superficie negra y las propiedades de aislamiento de la estructura que contiene y sostiene al colector; además la eficiencia de ciertos materiales para almacenar el calor o el frío generado. La superficie necesaria del colector dependerá de las condiciones particulares del clima de cada lugar y de la demanda total de calor así como de muchos factores de rendimiento en el funcionamiento que veremos en el próximo capítulo.

Los posibles intercambios de energía de los SPCS existen entre:

- colector y almacenador
- colector y espacio
- almacenador y espacio

En un sistema de calentamiento y enfriamiento dado, algunos de los intercambios pueden no existir o al menos ellos pueden ser insignificantes. Cuando alguno de los intercambios significativos envuelve predominantemente flujo natural pero también se incorporan dispositivos mecánicos para mover energía (como un ventilador) entonces el sistema deja de ser pasivo y se clasifica como un sistema híbrido. De la misma manera, si todos los intercambios significativos entre los tres elementos envuelven flujo forzado, el sistema es clasificado como activo.

El equipo mecánico puede ser usado eficientemente para aumentar el flujo natural de energía cuando el costo de capital, y la energía operante se justifica para lograr mejor desempeño del sistema. Los sistemas activos, en general, están menos expuestos a pérdidas de calor debido a -- que su diseño se caracteriza por ser más hermético, en consecuencia, son más eficientes que los pasivos aunque definitivamente son mucho más costosos respecto a su inversión inicial y mantenimiento. El transporte y distribución del calor en los circuitos de calefacción, enfriamiento o ventilación son los procesos más complicados de estos sistemas y muchas veces implican el consumo de un energético -- convencional. Utilizan también colectores planos aunque es frecuente encontrar concentradores focales (dirigen los rayos paralelos del sol hacia un punto focal) tales como espejos o lentes de Fresnel cuando se pretenden alcanzar temperaturas elevadas. Un ejemplo típico de ello es el enfriamiento por absorción donde el refrigerante empleado requiere elevadas temperaturas de evaporación (mayores de 85°C) --

que se alcanzan mediante colectores concentradores. En el Capítulo I hemos descrito algunos sistemas activos.

#### IV. a. CALENTAMIENTO PASIVO

Hay dos factores particularmente importantes que caracterizan a los sistemas pasivos de calentamiento solar:

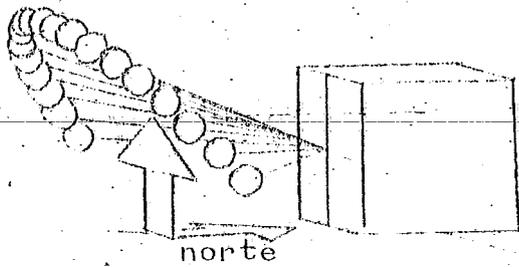
- (1) Las características del colector
  - orientación e inclinación
  - localización relativa al resto de la estructura
- (2) La forma de liberación de energía al espacio climatizado
  - el mecanismo o mecanismos de energía
  - grado inherente de control térmico

#### IV. a. (1) LAS CARACTERÍSTICAS DEL COLECTOR

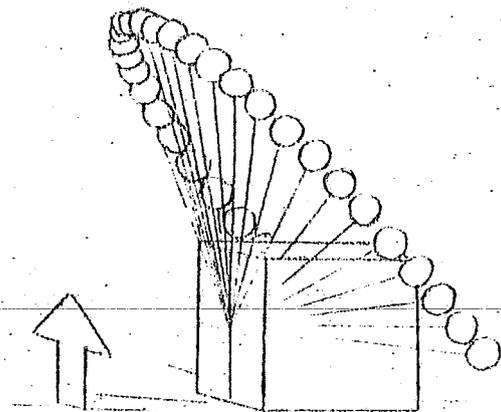
La integración arquitectónica de los colectores en los SPCS da cabida a tres grandes categorías: fachadas verticales, techumbres y fachadas inclinadas.

La fachada vertical es la más indicada en las latitudes medias o mayores (más de  $30^\circ$ ) ya que la inclinación de los rayos del sol es más pronunciada y en consecuencia esta fachada capta los rayos casi perpendicularmente aumentando así la intensidad de radiación por unidad de superficie porque la radiación reflejada es menor al ser el ángulo de incidencia más próximo a la normal.

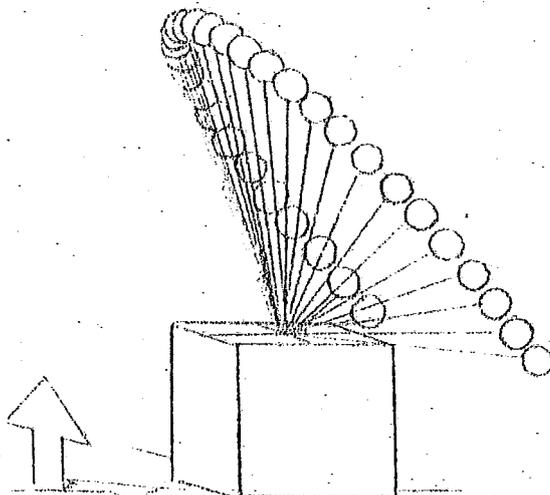
La orientación del colector debe ser optimizada respecto a la posición media anual del sol al medio día, lo cual requiere un conocimiento previo de la trayectoria anual del sol respecto al sitio escogido (capítulo anterior). En las regiones del hemisferio norte de la tierra y para fines de calentamiento, el colector vertical orientado al sur es el más adecuado ya que de este modo en el invierno la radiación solar es captada con ángulos favorables de incidencia durante gran parte del día y durante el verano cuando se requiera enfriamiento el ángulo de incidencia es desfavorable para su penetración (figura 1). Esto se debe a que durante el invierno el sol tiene una trayectoria S-SEW y durante el verano es de NE-NW. Así, la energía captada por un colector orientado al sur (en las latitudes altas) en un día soleado de invierno es mayor que la que entra por el mismo colector en un día soleado



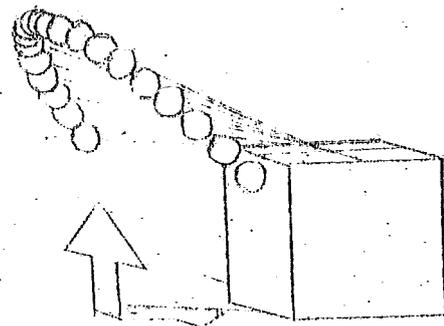
ANGULOS SOLARES DE INVIERNO SOBRE UNA SUPERFICIE CON ORIENTACION SUR



ANGULOS SOLARES DE VERANO SOBRE UNA SUPERFICIE CON ORIENTACION SUR



ANGULOS SOLARES DE VERANO SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL



ANGULOS SOLARES DE INVIERNO SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

FIGURA 1. ANGULOS SOLARES DE INCIDENCIA SOBRE FACHADAS HORIZONTALES Y VERTICALES

de verano (figura 4 del capítulo anterior).

La colocación de colectores solares en fachadas verticales es posible desde el punto de vista técnico. Además no cambia la forma misma de la construcción y puede llegar a proporcionar resultados energéticamente aceptables.

La figura 2 muestra un ejemplo típico de un colector solar orientado al sur, Trombe y Michel emplean una pared gruesa de concreto pintada de negro. Delante del concreto se colocan uno o varios vidrios, y se deja circular el aire en el espacio intermedio. El aire de las habitaciones penetra a través de unas aberturas en la parte inferior de la pared hacia el espacio antes mencionado. Según se calienta éste circula por la cámara y se introduce de nuevo en las habitaciones por otra serie de orificios localizados en la parte superior. Como la circulación del aire se realiza por convección natural, no hay ningún dispositivo impulsor. Para impedir que el aire caliente fluya dentro de la habitación en verano, las aberturas superiores del muro se cierran, y por medio de unas ventilas móviles localizadas en el extremo superior del ventanal, el aire caliente es desviado hacia el exterior de la casa, (más detalles de esta casa se encuentran en el primer capítulo).

Con casi el mismo enfoque de Trombe, Steve Baer diseñó en Albuquerque, N.M. una casa prototipo como la que se muestra en la figura 3; consta de ventanales en la fachada sur detrás de los cuales existen varios depósitos (tambores) superpuestos horizontalmente con las bases que dan hacia la ventana pintadas de negro. De este modo la cara situada detrás del ventanal actúa como un colector plano común y corriente tal que el calor captado se transfiere directamente al agua contenida en los tambores. Durante las noches de invierno y en verano las paredes del colector son tapadas por cubiertas aislantes revestidas interiormente de aluminio y sujetas con bisagras en la parte inferior. Cuando en los días de invierno se bajan las cubiertas, el aluminio actúa como reflector aumentando la radiación incidente sobre la superficie del colector.

En las latitudes más bajas puede ser posible colocar el colector en la superficie de algún tejado horizontal. El colector horizontal recibe cantidades modestas de radiación directa solar en invierno, generalmente a ángulos de incidencia desfavorables, y está sujeto a la severa radiación directa en verano. En consecuencia su exposición al sol debe ser controlada por métodos especiales, por ejemplo, con aislamiento móvil que puede ser una cubierta corrediza que sea reflejante tanto de la radiación solar.

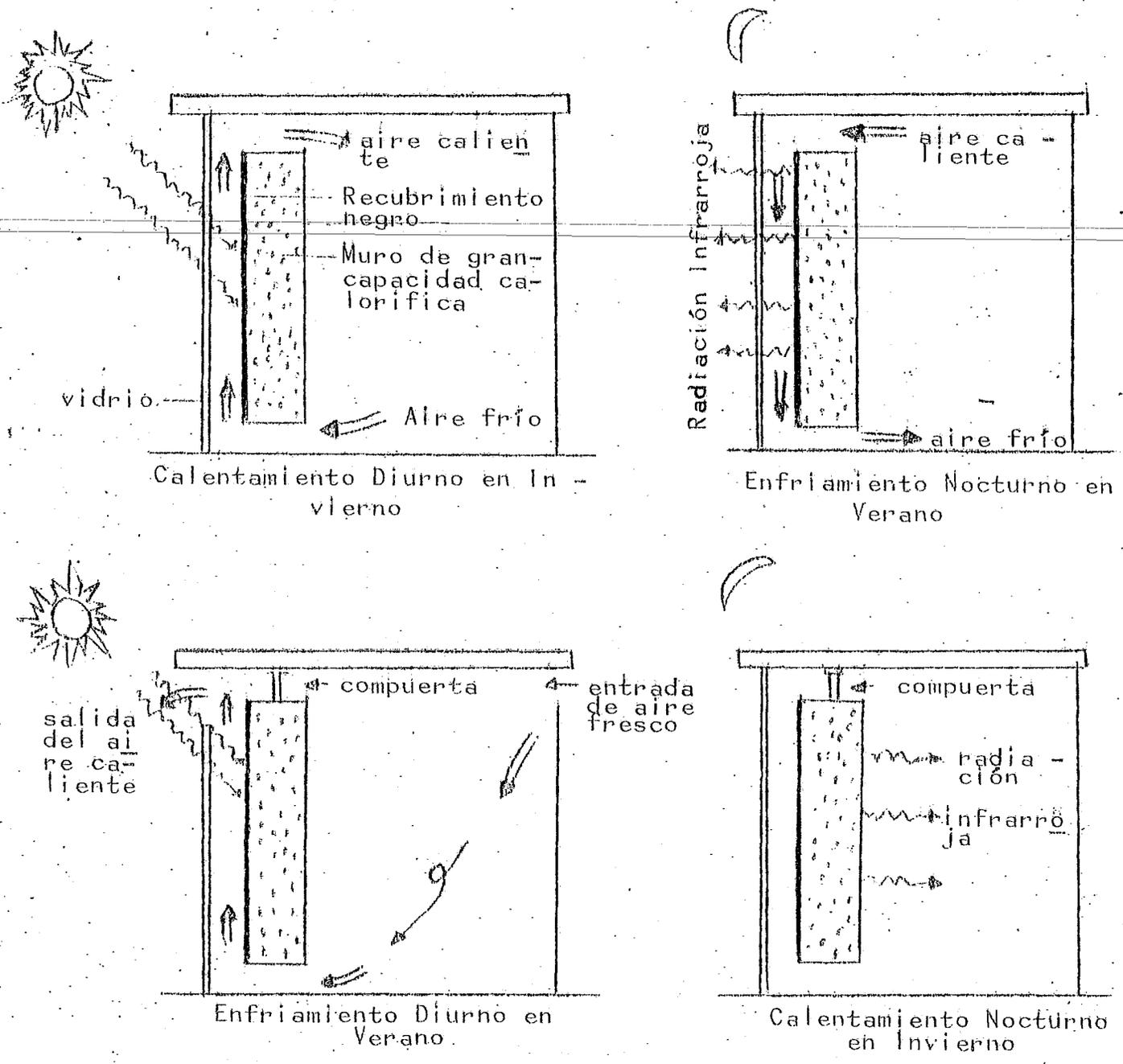
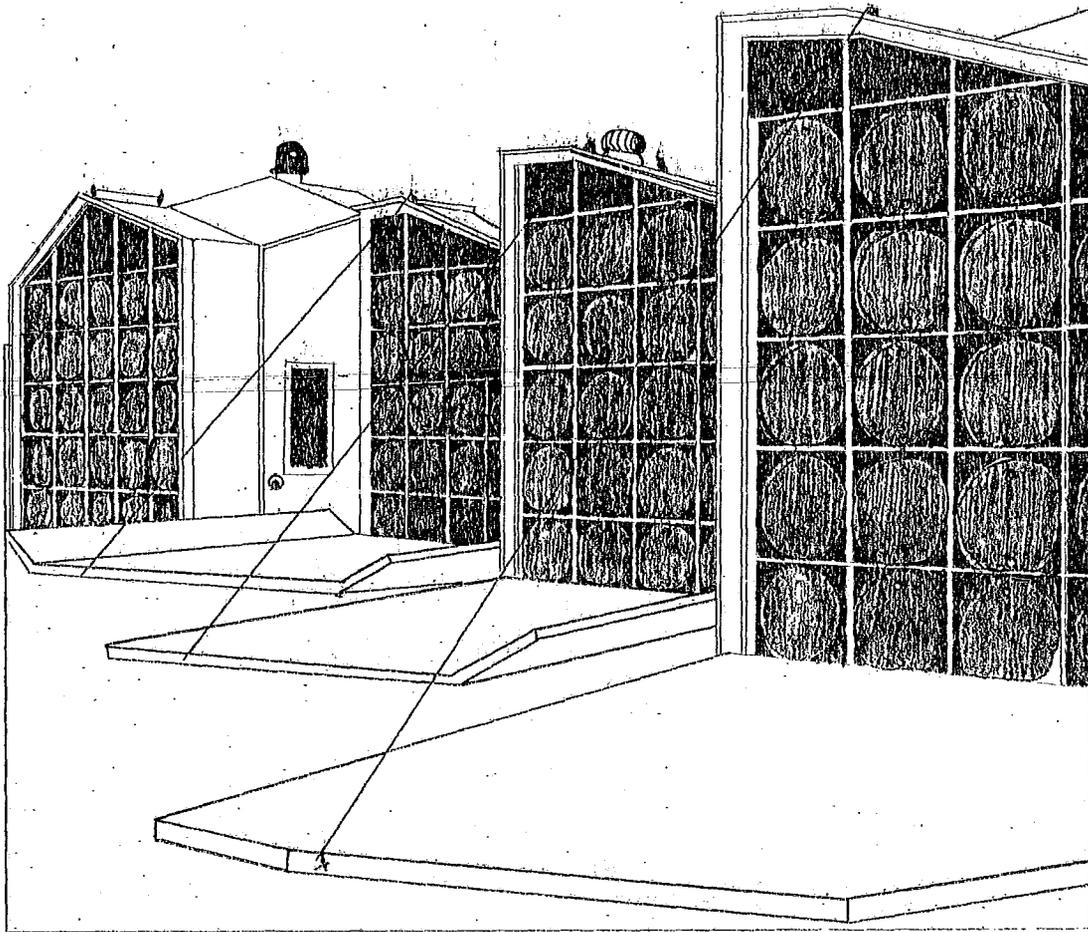


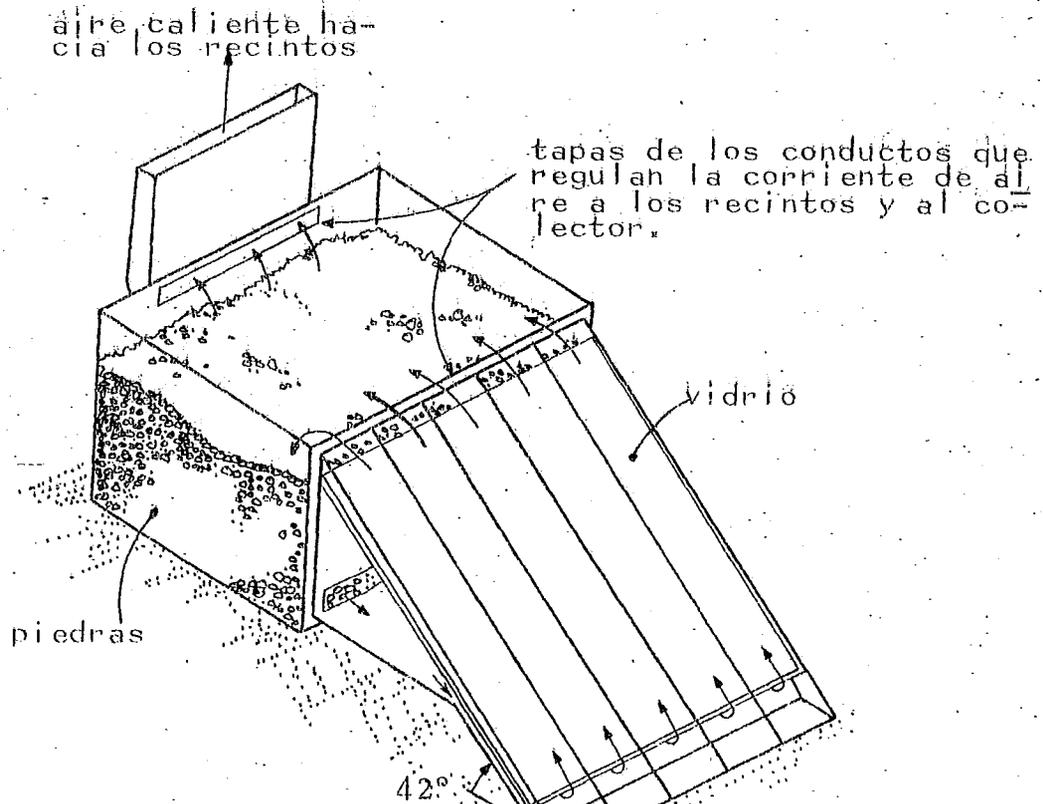
FIGURA 2. SISTEMAS PASIVOS BASADOS EN:

- LA TERMOCIRCULACIÓN NATURAL DEL AIRE (ASCENDENTE Y DESCENDENTE)
- LA EMISION DE RADIACION INFRARROJA - HACIA EL INTERIOR Y EXTERIOR DE LA - HABITACION (MURO EMISOR TIPO TROMBE)



CASA BAER CONSTRUIDA EN CORRALES, ALBUQUERQUE, NEW MEXICO EN 1972.

Fig. 3



DISEÑO DE STEVE BAER PARA UN CALENTADOR DEL TIPO "CHIMENEA SOLAR"

como de la calorífica desprendida al interior. De este modo, según la hora del día y estación del año, el colector se pone al sol durante el día, o a cielo abierto durante la noche cuando se requiera enfriamiento nocturno (fenómeno de enfriamiento por radiación infrarroja nocturna).

En varias casas solares no se ha hecho ninguna separación entre el colector solar y el depósito de almacenamiento de calor, y el material usado para almacenamiento se ha calentado directamente por exposición al sol. Este es el método adoptado por el diseñador Harold Hay, cuyo sistema incluye la utilización de "estanques" de agua en los tejados de los edificios. La primera estructura de este tipo, construida en Phoenix en 1967-68 por Hay y John Yellott fue un pequeño edificio experimental con una serie de bolsas plásticas llenas de agua sobre el techo. Las bolsas se sujetaban dentro de canalillos forrados de láminas de plástico negro, dispuestos entre las viguetas del techo. Sobre las bolsas de agua colocaron una cubierta aislante corrediza que se deslizaba horizontalmente sobre carriles de metal.

El principio del funcionamiento del sistema de Hay consiste en que en días soleados de invierno la placa aislante se recorre para que el colector quede expuesto al sol y se caliente. Por la noche y en los días nublados se cubre de nuevo el depósito que actúa así como almacén de calor. El calor se conduce y se irradia hacia el interior del edificio a través de la cubierta de acero del tejado. En la edificación de Phoenix, Hay y Yellott también consiguieron un efecto de enfriamiento por irradiación durante las noches de verano dejando las bolsas de agua al descubierto en las noches despejadas. Si se cubría la superficie de las bolsas con una capa fina de agua expuesta a la intemperie, podría producirse un enfriamiento adicional mediante la evaporación de esta capa de agua.

En 1973, Hay y un grupo del Instituto Politécnico de California construyeron en San Luis Obispo una casa que funcionaba sobre la base del mismo principio que la casa de Phoenix, con un estanque de agua de 30 cm de profundidad que cubría todo el techo del edificio de una planta, y con cubierta aislante corrediza. El método es sencillo y eficaz para latitudes bajas (según Hay, hasta 35°). El colector horizontal sobre el tejado se adapta bien a la arquitectura de las casas y no interfiere con la luz del día o con la visibilidad desde el interior. Tiene el inconveniente de que le caen las hojas de los árboles y en los climas menos benignos, la nieve; por otra parte este tipo de estanques de tejados son inoperantes en climas que pueden alcanzar temperaturas por debajo de 0°C.

Como el almacenamiento de calor está conjugado con el colector, y el transporte de calor se hace directamente mediante conducción y radiación, las casas tipo Hay no necesitan sistemas mecánicos de bombas o de ventiladores (en algunos casos si se requiere ventilador para producir enfriamiento evaporativo noches húmedas), aunque si es preciso utilizar motores y mecanismos de control para mover los paneles aislantes. Uno de los problemas que presenta el hecho de que el depósito esté directamente sobre las habitaciones es que el paso de calor se controla muy difícilmente. En un día soleado durante la temporada de calefacción los cuartos pueden resultar excesivamente calentados aunque naturalmente esto se puede evitar abriendo las ventanas, etc.

El principio del funcionamiento de las casas de Hay se ilustra en la figura 4.

Para aprovechar el fenómeno de enfriamiento nocturno por disipación de radiación infrarroja hacia el espacio, se requieren tres condiciones: baja humedad relativa, gran oscilación de temperatura ambiente entre el día y la noche, y preferentemente que el sitio sea elevado respecto al nivel del mar (más de 500 m.); aunque ésta última condición es ideal más no indispensable. En México, este sistema resulta ideal especialmente en las zonas áridas y semi-áridas del Norte y Centro del país.

Desde el punto de vista de la conveniencia arquitectónica y para las instalaciones de calefacción, en ciertas latitudes puede ser posible colocar el colector en la superficie de algún tejado inclinado, obteniéndose así la inclinación deseada muy fácilmente. Otra posibilidad consiste en colocar una serie de colectores menores alargados e inclinados sobre una cubierta plana, en forma de dientes de sierra o como una persiana veneciana de gran tamaño (figura 5).

Un colector tipo persiana veneciana consiste de elementos de vidrio vertical y elementos inclinados opacos sobre el techo. Tal apertura acepta radiación predominantemente de la parte sur del cielo (sol de invierno).

También el colector puede ponerse a cualquier ángulo (figura 6) para aceptar radiación de cualquier parte del cielo (colocación remota).

## (2) EL METODO DE LIBERACION DE ENERGIA AL ESPACIO

La manera en que la energía es repartida al espacio acondicionado tiene un profundo impacto sobre el grado

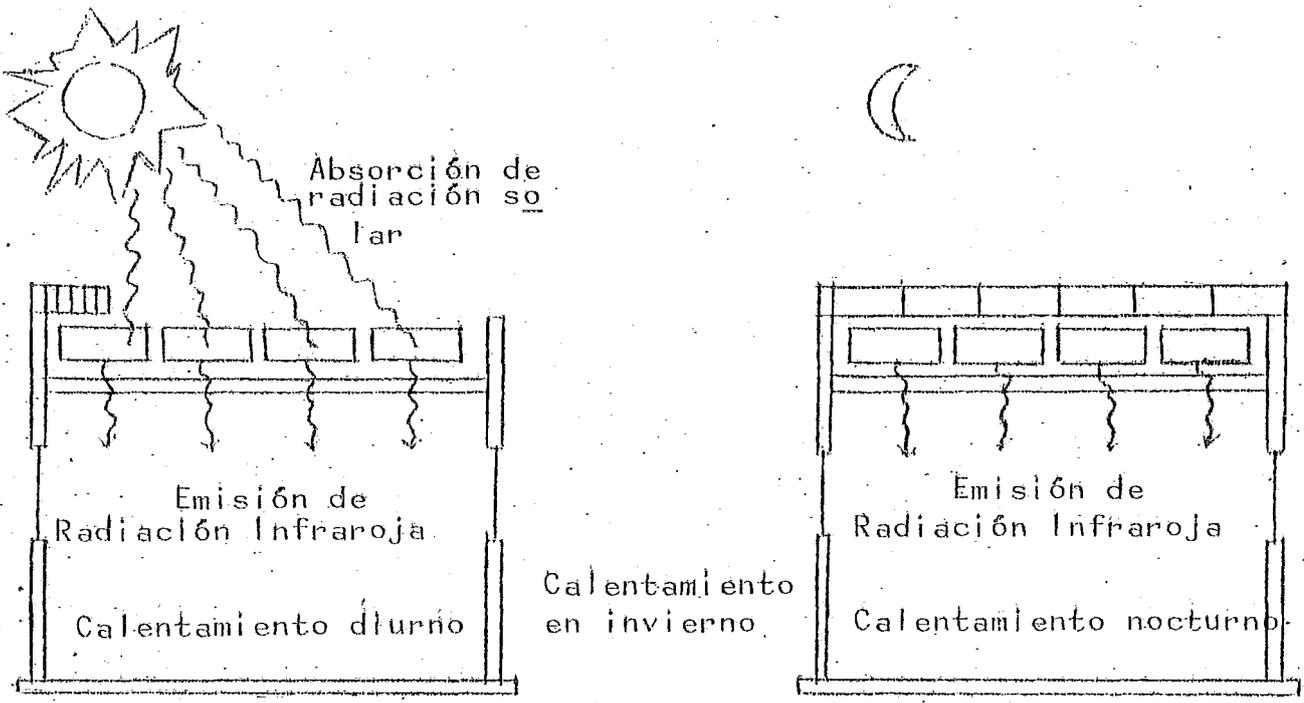
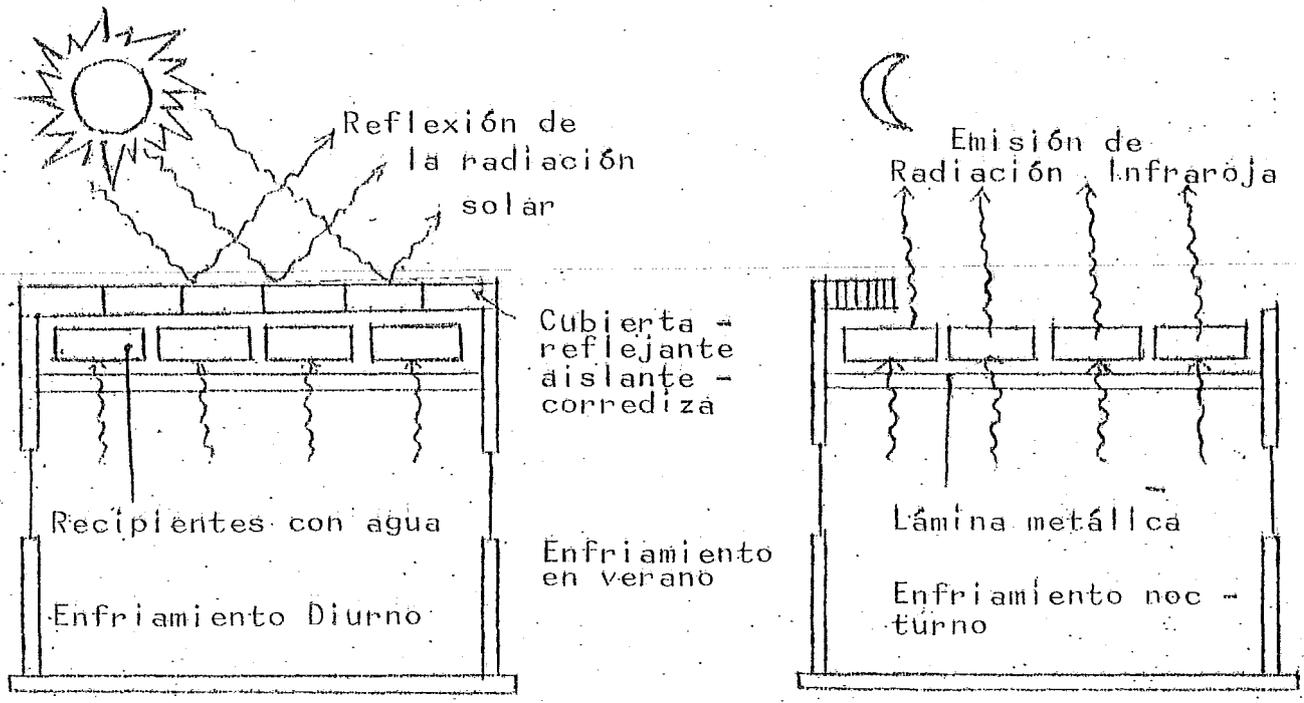
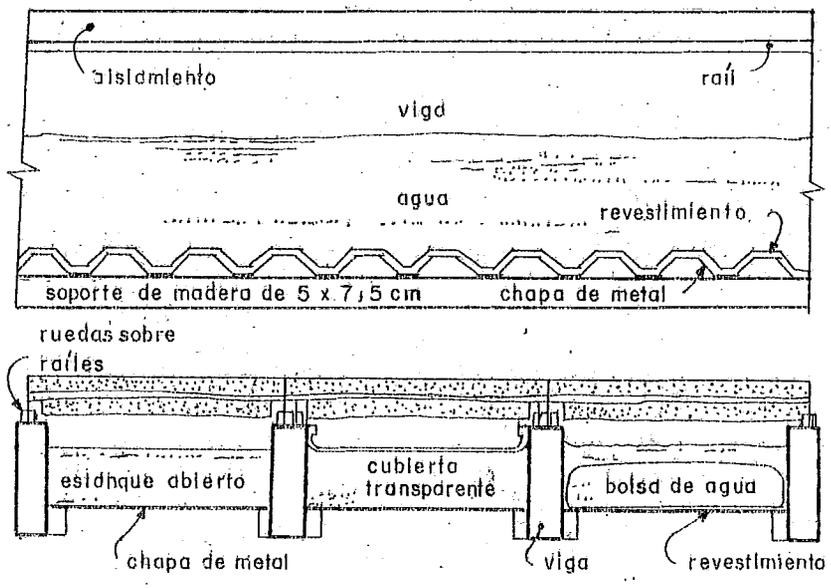


FIGURA 4. SISTEMA PASIVO BASADO EN LA ABSORCION DE RADIACION SOLAR Y EMISION DE RADIACION - INFRAROJA HACIA EL EXTERIOR O INTERIOR - PRODUCIENDO EL ENFRIAMIENTO O CALENTAMIENTO RESPECTIVO.



SECCION VERTICAL ESQUEMATICA DE LOS ESTANQUES DE TEJADO DE HAY.

de uniformidad térmica que pueda ser impuesto. La selección del sistema de mayor efectividad económica para alguna aplicación está fuertemente influenciada por la severidad de los requerimientos térmicos.

Hay tres amplias categorías de sistemas pasivos de calentamiento solar basadas en el método de liberación de energía al espacio:

• Por calentamiento directo. En este tipo de sistema la radiación solar es admitida directamente al espacio, donde es convertida a calor por absorción sobre las superficies interiores y contenido del espacio (gente, muebles, plantas, etc.) La temperatura del aire en dicho espacio dependerá del tipo de superficie absorbente y/o del tipo de almacenador usados.

• Por calentamiento indirecto. La radiación es convertida a calor por absorción sobre una superficie externa del espacio (por ejemplo, muro tipo Trombe). La temperatura del aire en el espacio también cambia con el absorbedor y/o al almacenador.

• Por calentamiento aislado. La radiación es convertida a calor por absorción sobre una superficie externa del espacio. La temperatura del aire en el espacio interior puede ser regulada independientemente del absorbedor y almacenador.

En la figura 7 se muestran varias combinaciones de localización del colector y mecanismos para la transferencia de energía al espacio interior climatizado.

Las configuraciones mostradas incluyen los sistemas pasivos de calentamiento más comunes. Existen infinidad de combinaciones pero los mecanismos de transferencia de calor son esencialmente los mismos.

La preferencia de un sistema de ganancia directa, indirecta o aislada está fuertemente influenciada por el grado deseado de uniformidad térmica. Cuando un control térmico muy riguroso es estipulado, los sistemas aislados serán generalmente preferidos. Si una fluctuación térmica considerable puede ser tolerada y una mínima cantidad de energía es deseada, los sistemas de calentamiento directo o indirecto serán preferidos.

Dadas estas definiciones básicas, nosotros podemos clasificar los sistemas pasivos de calentamiento comunes en términos de la siguiente tabla:

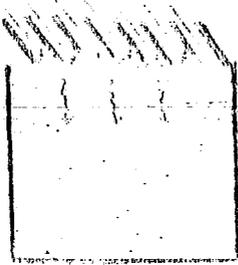


FIGURA 5. COLECTOR TIPO PERSIANA VENE CIANA

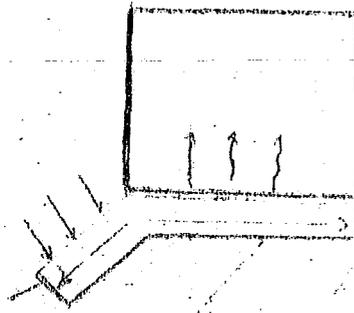


FIGURA 6. COLECTOR EN COLOCACION REMOTA

DIRECTO	INDIRECTO	AISLADO

FIGURA 7. EJEMPLOS DE SISTEMAS PASIVOS DE CALENTAMIENTO SOLAR

	DIRECTO	INDIRECTO	AISLADO
FACHADA VER- TICAL			
TECHUMBRE			
FACHADA IN- CLINADA			
REMOTA			

IV b)

ENFRIAMIENTO PASIVO

Los sistemas pasivos de enfriamiento envuelven la disipación de energía por acoplamiento selectivo del sistema a las partes frías del medio ambiente. Si las condiciones ambientales son propicias, este flujo de energía ocurrirá por medios naturales. Las posibles fugas ambientales del calor del sistema son el espacio exterior, atmósfera, y tierra.

En el enfriamiento hacia el espacio exterior, la radiación del sistema pasa a través de la atmósfera y se disipa dentro de otro espacio. El enfriamiento radiativo al espacio exterior trabaja bien en medios ambientes con cielos despejados (claros), y tiene el potencial para enfriar el sistema abajo de la temperatura ambiente del aire. La primera limitante de este mecanismo de enfriamiento es la ganancia de calor convectivo y radiativo de la atmósfera circundante (por lo que el lugar debe tener poca nubosidad).

La energía del sistema puede también descargarse directamente a la atmósfera durante el tiempo en que las condiciones del aire sean favorables para tal intercambio. El calor se disipa al aire circundante aumentando el calor sensible de éste o cambiando su grado higrométrico. En cualquier caso, la energía transferida puede ser mejorada por el incremento del movimiento del aire. La fuerza impulsora de este movimiento puede provenir del viento, ventila

dor (sistema híbrido), o por mecanismos convectivos impulsores especiales.

En el primer caso se aprovechan las corrientes naturales de aire haciéndolas pasar por el espacio interior de la construcción de manera efectiva controlando la disposición de las aberturas de la casa, éstas deben ser pequeñas a sotavento y grandes a barlovento para evitar zonas de depresión que frenen la velocidad y por lo tanto reduzcan el volumen del aire en circulación; para evitar la acumulación de aire caliente cerca del techo deben preverse también salidas en la parte superior de la pared. El uso de ventilador es justificado cuando se mejore así el desempeño del sistema. Frecuentemente no basta utilizar al máximo las condiciones naturales; ellas pueden mejorarse mediante la aplicación de ciertos principios físicos como el tiraje térmico (propiedad del aire a ascender en la medida en que sus partículas disminuyen su densidad por acción del calentamiento y los efectos conocidos como Venturi y Bernoulli. Estos efectos se aplican principalmente para crear presiones de aire, cambiar el curso de las corrientes naturales y evitar la creación de zonas de depresión. Dentro de estos mecanismos convectivos impulsores se encuentran los ductos verticales o chimeneas solares dentro de los cuales el aire adquiere una mayor velocidad (tiraje térmico) favoreciendo la succión del aire caliente del interior hacia el aire circundante exterior; otras veces puede aplicarse la simple presión exterior del aire para construir ductos horizontales que atraviesan la planta, sobre todo en edificios de varios pisos, y que surten efectos parecidos en cuanto a la renovación del aire interior.

Además de la utilización de los principios físicos que se han señalado, es también posible, y ciertamente recomendable "tratar" el aire caliente (el aire caliente puede estar muy húmedo ó muy seco, y esto puede resultar molesto para el efecto de climatización deseado) que penetra en la construcción. Procesos de este tipo no tienen por qué significar necesariamente el uso de equipo electromecánico de acondicionamiento de aire. En medios ambientales secos, el enfriamiento evaporativo (enfriamiento del aire producido por su humidificación al hacersele pasar sobre medios húmedos: fuentes, ríos, tierra húmeda, etc.) tiene gran potencialidad, y en combinación con el enfriamiento producido por radiación al cielo, la temperatura del sistema se reduce por abajo de la temperatura del aire ambiente. En algunos lugares de Irán, por ejemplo, la arquitectura tradicional cuenta con un ingenioso sistema de refrigeración del aire (torres de viento) que equivale en sus resultados a un equipo mecánico de aire acondicionado. Este sistema puede enfriar el aire sin cambiar sus humedad

o contenido de vapor de agua (enfriamiento sensible, figura 4 del capítulo VII), o cambiando su humedad (enfriamiento evaporativo, figuras 5 y 6 del capítulo VII). Las torres de viento serán motivo de estudio en los capítulos V y VI.

En climas húmedos calientes el aire puede ser acondicionado haciéndolo pasar por un material desecante. Entre los desecantes sólidos con mayor mercado tenemos: la sílica gel, muy porosa y se regenera indefinidamente a  $120^{\circ}\text{C}$ ; el sulfato de calcio, o anhydrotel, fácil de regenerar en una o dos horas de  $200^{\circ}\text{C}$  más los gránulos se rompen; la alúmina activada, que puede ser regenerada a  $180-400^{\circ}\text{C}$ . De estos tres desecantes de los cuales los precios son comparables, la sílica gel es la única que puede funcionar con la energía solar, los otros tienen temperaturas de regeneración muy elevadas. El desecante se coloca en los muros este y oeste de la construcción (figura 10). El muro se encuentra detrás de un vidrio con un espacio de aire entre ambos; en la superficie del muro que da hacia el vidrio está el desecante y del otro lado tabique (u otro material acumulador de calor) aislado perfectamente para evitar el paso de calor hacia el interior (el aislamiento de esta pared involucra un gran problema de costo). Durante la mañana el aire húmedo caliente penetra por la fachada oeste del sistema y al pasar a través del material desecante se deshumidifica pero a la vez se calienta, por esto se coloca un humidificador en la parte inferior del muro que lo enfría a su paso. Después penetra al interior como aire fresco. Como por la mañana el sol calienta la fachada Este el aire sube naturalmente por ésta, secando y regenerando el material desecante que quedó humedecido la tarde anterior cuando el sol calentaba la fachada Oeste y cuando la circulación del aire se efectuaba en sentido inverso al matutino. Este ejemplo ilustra también la conveniencia de tener la forma alargada de la construcción sobre la dirección Oriente-Poniente ya que el aire caliente no requiere de un extractor pues naturalmente tenderá a subir. Las formas alargadas sobre el eje norte-sur trabajan con menos eficiencia que la forma cuadrada, tanto en invierno como en verano.

En regiones muy secas, los sistemas pasivos pueden incluir también grandes o pequeños invernaderos integrados a las viviendas (figura 11). Estos, además de almacenar considerables cantidades de energía permiten optimizar las condiciones de humedad, independientemente de las mejoras estéticas del conjunto que puedan alcanzarse y del buen impacto anímico que proporciona la vegetación.

El enfriamiento hacia el suelo puede ser usado pa

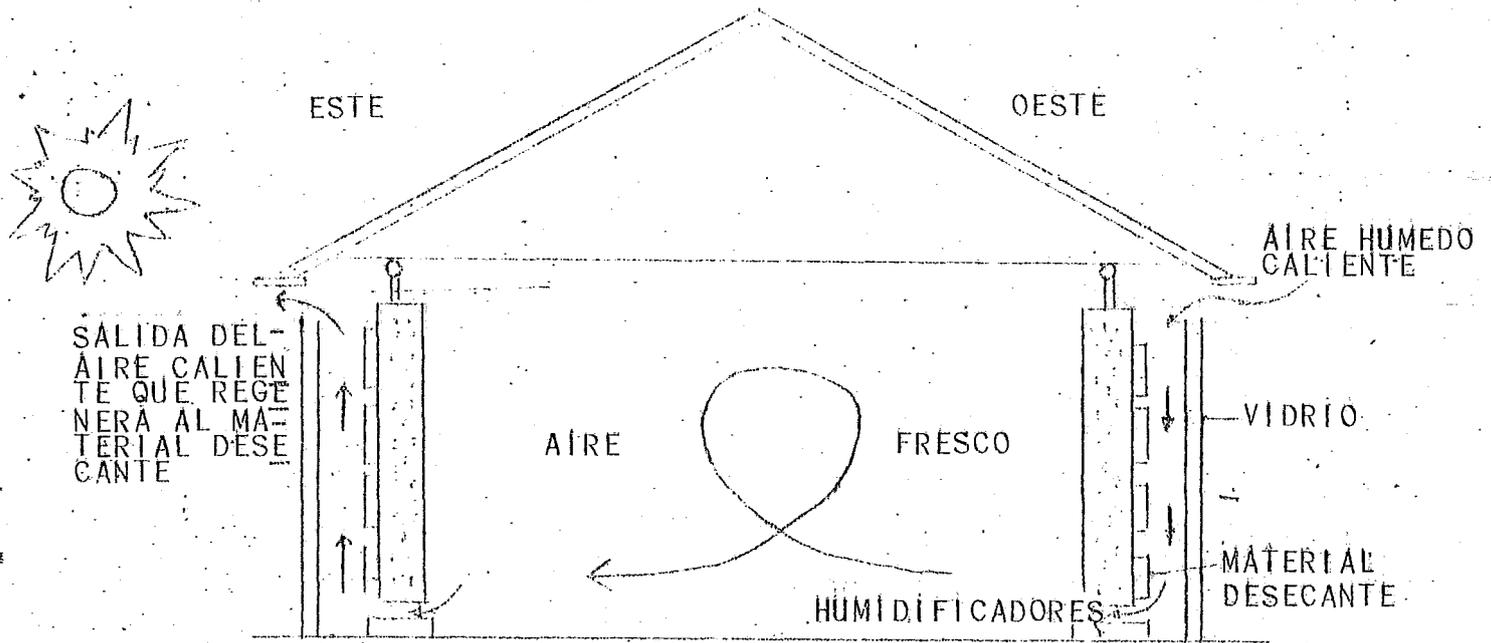


FIGURA 10. SISTEMA PASIVO DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

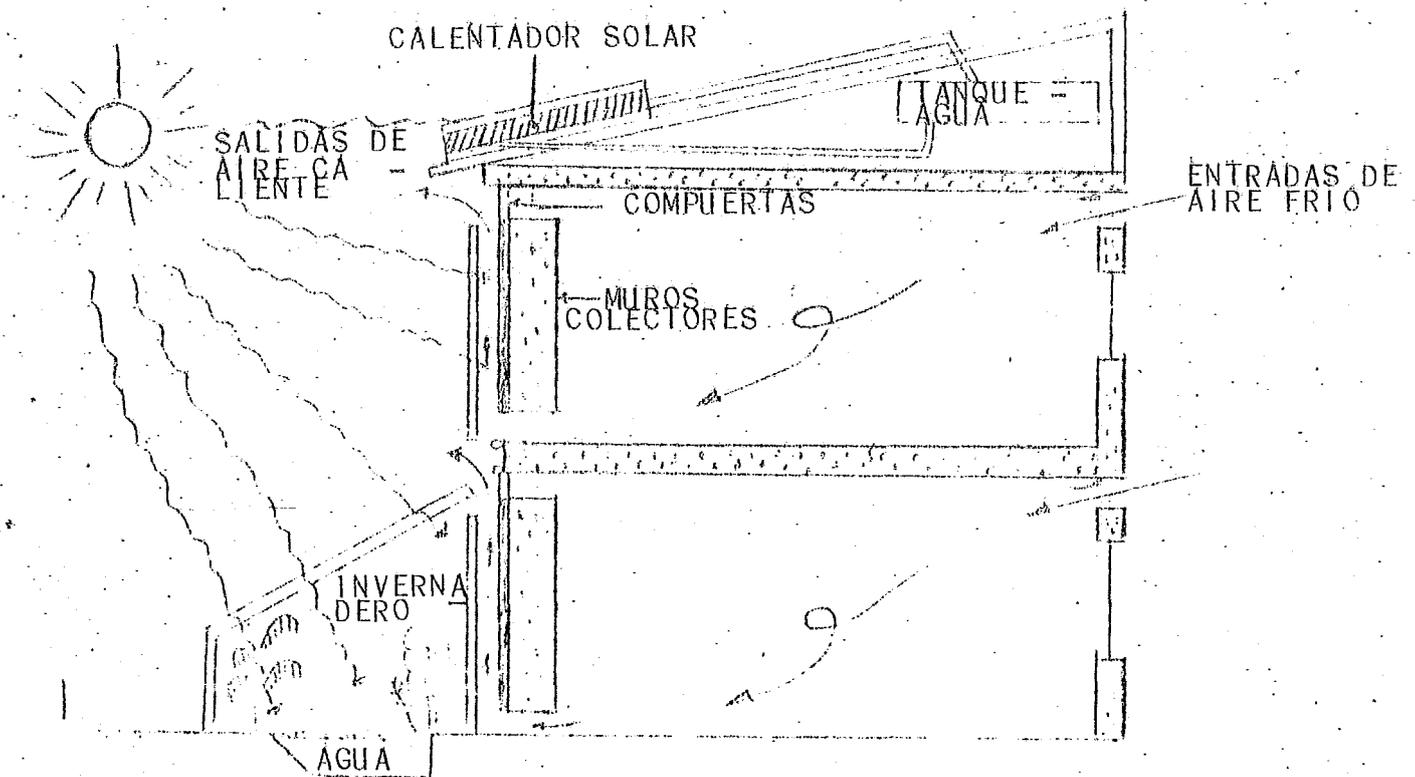


FIGURA 11. SISTEMA PASIVO INTEGRAL: CALENTAMIENTO DE AGUA, VENTILACION POR TERMOCIRCULACION DEL AIRE Y HUMIDIFICACION POR INVERNADERO

ra desplazar una fracción substancial de la carga de enfriamiento normal ya que la temperatura del suelo durante el verano está normalmente unos grados abajo de la temperatura del aire ambiente.

La siguiente tabla concreta las disipaciones ambientales, junto con los mecanismos primarios envueltos en la transferencia de energía.

DISIPANTE	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA PRIMARIA
ESPACIO EXTERIOR	RADIACION
Atmósfera	CONVECCION (incluye evaporación)
Suelo	CONDUCCION

En analogía a los sistemas de calentamiento, hay procesos de enfriamiento directos, indirectos y aislados. Podemos clasificar los sistemas de enfriamiento en términos de la siguiente tabla:

	DIRECTO	INDIRECTO	AISLADO
ESPACIO EXTERIOR			
ATMOSFERA			
SUELO			

Una muestra representativa de combinaciones de los dispersores de energía térmica del medio ambiente y los mecanismos de transferencia de energía al espacio interior climatizado se ilustran en la figura 12. La figura introduce una nomenclatura general para la descripción de los sistemas pasivos de enfriamiento y se enfatizan aquellos donde los elementos pueden servir para calentamiento y enfriamiento, y cuando es posible la nomenclatura de los sistemas de calentamiento es retenida.

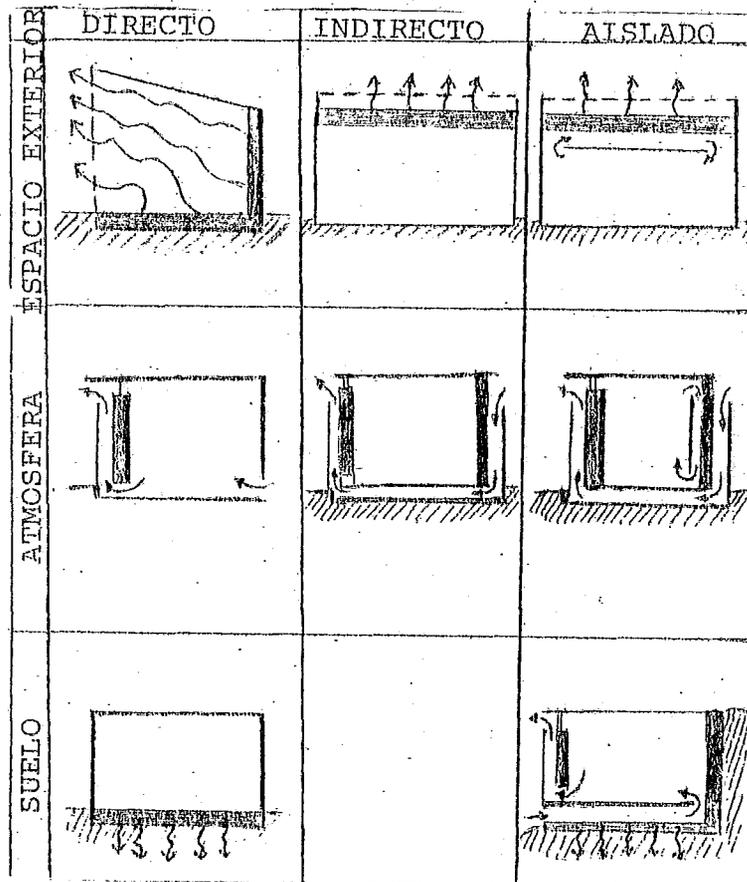


FIGURA 12

Como hemos podido darnos cuenta a través de la descripción de las componentes de los SPCS y de su funcionamiento, ellos no recurren a arquitecturas sofisticadas, ni mucho menos a equipos que entrañen grandes costos. Los SPCS son construcciones en las que la arquitectura debe cumplir el requisito fundamental de crear un entorno habitable y sobre todo son construcciones que implican un mínimo consumo de energía convencional; representan el punto intermedio entre los dos polos extremos de los que tratamos en la "Introducción" de este trabajo y que son: la ar-

arquitectura actual totalmente dependiente de las redes de suministro de energía centrales, y las casas autónomas casi totalmente independientes de esas redes.

En este tipo de arquitectura e ingeniería solar es necesario tomar en cuenta el clima de cada lugar y examinar bien las posibilidades para calentamiento y enfriamiento pasivos, y sistemas de ventilación natural. Así llegamos a tener un tipo de arquitectura más acorde con las características climáticas del lugar, propiciando entonces que la gente se sienta en estado confortable en el interior de su casa y que las transiciones interior-exterior no lleguen a ser cambios difíciles. Las casas así diseñadas no son casas anti-climáticas o anti-exterior, sino al contrario, son casas que aprovechan los elementos: insolación, viento, radiación terrestre, altitud y lluvia; para proporcionar confort térmico fisiológico a sus habitantes.

No obstante que los principios de operación de los sistemas pasivos son de apariencia simple es importante hacer notar que para su funcionamiento y óptima eficiencia es necesario realizar un concienzudo estudio que involucre:

- características de insolación.
- condiciones del microclima local
- tipo de función que desempeñe la edificación: (habitacional, escuela, fábrica, centro comercial, hospital, etc.)
- volumen de la construcción.
- características mecánicas y térmicas de los materiales
- orientación óptima de la edificación
- diseño adecuado de muros, pisos y techos, especialmente su forma dimensiones y materiales.
- estimación de la transferencia de calor (radiación, convección y conducción) y de masa (convección) en la construcción misma y con su medio ambiental.

En lo que respecta a las condiciones del microclima (el microclima no excede por lo general a superficies mayores de 1 km<sup>2</sup>, mientras que el mesoclima o clima regional, comprende superficies más extensas) local donde debe implantarse un sistema pasivo ya sea para calefacción, enfriamiento o ventilación, es necesario examinar los siguientes elementos meteorológicos:

- temperatura del aire (extremas y medias)
- duración e intensidad de la radiación solar
- humedad del aire

- velocidad, dirección y frecuencia del viento
- nubosidad
- precipitación
- contaminación atmosférica

entre los más importantes.

Deben considerarse además características como la vegetación circundante y muy importante es también la topografía del sitio ya que determinará en gran medida la pendiente, orientación, elevación de la construcción y su exposición a los rayos solares durante el año.

Las características del suelo en su estado natural o modificado son importantes porque su reflectividad puede influir positiva o negativamente sobre la construcción al reflejar más o menos radiación solar sobre ésta. Pueden esperarse repercusiones similares cuando alrededor de la construcción existen objetos (casas, edificios, árboles, etc.) capaces de desviar la dirección de los vientos locales predominantes (la velocidad de viento se reduce en las áreas urbanas en términos generales a un tercio de la velocidad natural en campo abierto) y de proyectar sombras sobre la construcción, las cuales pueden ser benéficas quizá en verano cuando se requiere enfriamiento o perjudiciales en invierno cuando se necesita calentamiento. El estudio del movimiento anual de las sombras proyectadas por los cuerpos adyacentes a la construcción es indispensable al considerar cualquier sistema de climatización ya sea de tipo pasivo o activo. Para esto debe recurrirse al empleo de las gráficas solares como las mostradas en las figuras 3, 4, 5 y 6 del capítulo anterior. También hay que tener en cuenta los materiales de que están hechas las construcciones próximas ya que si son de hormigón o de superficies duras, éstas reflejan el calor que reciben hacia el edificio en cuestión (efecto que puede evitarse, si es perjudicial, plantando vegetación y césped). La absorción o reflexión del calor está relacionada con el color de las superficies y pueden emplearse colores claros para reducir la absorción de calor, sobre todo en los tejados.

De no tomar en cuenta todos los factores anteriores, por simples que parezcan los principios de funcionamiento de los SPCS; ya sea para calentamiento, enfriamiento, y/o ventilación natural; se ha comprobado que el diseñador puede fracasar irremisiblemente en su intento, logrando muchas veces el efecto de climatización contrario al deseado, o en el mejor de los casos, un funcionamiento deficiente.

## CAPÍTULO V

### METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LOS SPCS PARA DISTINTOS TIPOS DE CLIMA

Un SPCS puede ser tan sencillo o complicado como las condiciones climatológicas del lugar lo requiera. Es de suma importancia por lo tanto tener un panorama claro del tipo de clima del lugar donde se pretende construir un SPCS así como determinar las necesidades de confort fisiológico que el sistema debe satisfacer. Para seleccionar el SPCS que satisfaga esas necesidades de confort, y dado que en México apenas se ha comenzado a estudiar el comportamiento de los SPCS, es necesario recurrir a la siguiente metodología que no es la única pero que resulta suficiente para nuestro propósito de introducirnos al campo de la climatización solar de viviendas. Esta metodología es la siguiente:

- 1).- Análisis climatológico del lugar donde se pretende -- construir un SPCS.
- 2).- Evaluación del impacto bioclimático local sobre el -- hombre y clasificación de sus necesidades de confort: radiación solar, sombra, efectos del viento, temperatura, humedad, etc.
- 3).- Selección del SPCS que satisfaga las necesidades de -- confort en la construcción analizando los SPCS que se hayan utilizado en casos cuya problemática sea simi-- lar.

- 1).- ANALISIS CLIMATOLOGICO DEL LUGAR DONDE SE PRETENDE -- CONSTRUIR UN SPCS.

El clima puede ser considerado como el resultado de la variabilidad de los principales elementos meteorológicos durante un período de tiempo considerablemente amplio. Los elementos moduladores del clima son esencialmente: duración e intensidad de la insolación, temperatura, humedad, precipitación y presión atmosférica. Estos elementos o condiciones momentáneas del tiempo se derivan de factores constantes o característicos de la localidad, tales como: latitud, altitud, distribución de tierras y aguas, accidentes geográficos y tipo de suelo. El mesomicroclima supone una modificación de las condiciones climáticas generales.--

El microclima es a su vez una variante del mesomicroclima o clima regional y origina una combinación local que corresponde a un medio físico bien delimitado. Es el microclima el que debe tenerse en cuenta al diseñar un SPCS para lograr su mejor funcionamiento. En consecuencia el diseño de un SPCS debe ajustarse a las características especiales de ese microclima en particular. De esta observación se infiere que no existe un SPCS universal.

Los valores medios de los elementos climáticos vienen reportados en varias publicaciones. Además de los valores medios deben considerarse los valores medios máximos y mínimos así como los extremos, especialmente de temperatura y humedad. Deberá procurarse contar con la información más detallada posible seleccionando valores medios que correspondan preferentemente a períodos de 10 años o más. La información climatológica más importante en helio diseño consiste de:

- duración e intensidad de la insolación (global)
- proporción de radiación directa y difusa
- temperaturas medias
- promedio de temperaturas medias máximas
- temperaturas medias máximas extremas
- promedio de temperaturas medias mínimas
- temperaturas medias mínimas extremas
- oscilación de temperatura (rango diurno-nocturno)
- humedad (relativa y absoluta)
- velocidad, dirección y frecuencia de los vientos predominantes
- nubosidad
- precipitación
- eventos especiales tales como huracanes, granizo o frecuencia y ocurrencia de tormentas eléctricas.

Estos valores nos darán una idea de los requerimientos estacionales de climatización en la localidad; de cuál es el mes más frío o caliente; si éste es muy caluroso y húmedo o muy caluroso y seco, etc.

## 2).- EVALUACIÓN DEL IMPACTO BIOCLIMÁTICO LOCAL SOBRE EL HOMBRE Y CLASIFICACION DE SUS NECESIDADES DE CONFORT: RADIACION, SOMBRA, EFECTOS DEL VIENTO, TEMPERATURA, HUMEDAD, ETC.

La evaluación bioclimática consiste en el análisis de los elementos climatológicos acorde a las necesidades de confort higrotérmico fisiológico. Cuatro elementos climáticos: temperatura, humedad, movimiento del aire y radiación solar afectan conjuntamente las pérdidas o ganan-

cias de calor en el ser humano y determinan su nivel de confort en el medio físico en que se encuentra.

Para referir el grado de "habitabilidad" en cierto tipo de clima se utiliza el concepto de "confort térmico" o zona de comodidad térmica. Se le llama zona de confort térmico a aquella que permite al ser humano sentirse cómodo y está indudablemente ligada al nivel de compatibilidad del cuerpo humano con las condiciones higrotérmicas y de radiación circundantes. Para delimitar la zona de confort es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones.

Las sensaciones de calor o de frío no dependen únicamente de la temperatura sino también del movimiento del aire, de la humedad, de la radiación solar y de la radiación calorífica desprendida por los cuerpos circundantes (techos, paredes, pisos, etc.). Es necesario distinguir entre el concepto objetivo de temperatura y el subjetivo de sensación térmica. La temperatura del cuerpo (aproximadamente 37°C) y las sensaciones biotérmicas cambian al variar las condiciones ambientales. Una misma temperatura del aire puede dar distintas sensaciones de comodidad según sean los valores de los otros elementos meteorológicos en las diferentes estaciones del año.

La acción de la radiación solar sobre las barretas exteriores e interiores (paredes, ventanas, pisos, techos, etc.) afecta la sensación de confort dentro de la edificación. Este efecto se resume con el concepto de temperatura media radiante (t<sub>mr</sub>) que se refiere a la temperatura media aproximada de todas las superficies del entorno ambiental. A esta temperatura también se le acostumbra llamar temperatura "aire-sol".

Para mantener el nivel de confort adecuado a temperaturas altas, se requiere una baja temperatura media de radiación. Recíprocamente, a bajas temperaturas del aire, la t<sub>mr</sub> tiene que mantenerse alta para lograr un ambiente confortable.

En términos psicométricos de temperatura y humedad ambiental, existen parejas de valores: temperatura-humedad relativa, que para la mayoría de la gente resultan adecuadas para el desarrollo de las actividades humanas simples o ligeras. Otras en cambio, causan incomodidad. Pueden soportarse cómodamente temperaturas altas siempre que la atmósfera esté seca. Del mismo modo podemos sentirnos cómodos a temperaturas no muy bajas, siempre que la humedad relativa sea moderadamente alta (60%), ya que el

cuerpo pierde menos calor a través de la respiración, por el contrario, a temperaturas más bajas la humedad debe ser mínima. En climas húmedos el confort térmico está dado -- por las condiciones de temperatura y humedad relativa que hace posible la disipación del calor excedente que produce el cuerpo humano por su actividad metabólica. Esta disipación se lleva a cabo mediante la evaporación del sudor acumulado en la piel producto de la transpiración y por convección del calor excedente hacia las capas de aire circundantes. La combinación de temperaturas y humedades elevadas causa una sensación de depresión y bochorno porque el cuerpo no tiene oportunidad de transpirar (por la elevada presión del vapor de agua ambiental) y la disipación calorífica por convección y radiación es prácticamente nula. -- En este caso, la evaporación se convierte en la forma de disipación potencial del calor, sobre todo cuando hay movimiento de aire que remueve la película de aire saturado -- que se forma continuamente sobre la piel a consecuencia de la misma evapotranspiración.

El movimiento del aire generalmente provoca un aumento de evaporación en el cuerpo produciendo una sensación de enfriamiento. A temperaturas altas se pueden alcanzar sensaciones de confort si se disponen de corrientes de aire intensas y de menor temperatura externa. Sin embargo, a temperaturas y humedades muy altas el viento puede llegar a producir sensaciones de bochorno. Si por el contrario se tienen temperaturas altas y humedades relativas bajas, puede ocurrir que el efecto del viento sea insuficiente para compensar la sensación de incomodidad, en tales condiciones la solución sería recurrir a procesos de humidificación.

De estas relaciones podemos llegar a la conclusión de que a medida que la temperatura es más alta se puede propiciar la sensación de confort (dentro de ciertos límites) mediante: incremento de velocidades del aire; disminución de la temperatura radiante (que se traduce en la protección de paredes, techos, etc. de la radiación solar incidente); y en algunos casos, mediante humidificación. -- A temperaturas bajas la sensación de confort se logra mediante la reducción de la velocidad del aire, y con temperaturas radiantes altas.

Sobre las bases descritas se han llegado a construir diagramas bioclimáticos donde se señalan las zonas de confort más recomendables. Cada país en particular ha adoptado una determinada zona de confort. Así, la zona de confort británica está alrededor de 14.5 a 20.6°C y con humedades relativas entre 30 y 70%. En E.U. el polígono de confort queda comprendido entre las temperaturas de --

20.6 a 27°C y con humedades relativas entre 30 y 70%. En los trópicos se ha enmarcado entre los 18 y 30°C de temperatura y los 20-70% de humedad relativa. En Francia entre 21 y 28°C de temperatura y entre 30 y 70% de humedad relativa. En México aún no se ha definido con precisión estos valores aunque en la actualidad el IIM desarrolla un estudio para determinarlos. Prácticamente puede considerarse entre 18 y 30°C y 15 y 75% de humedad relativa.

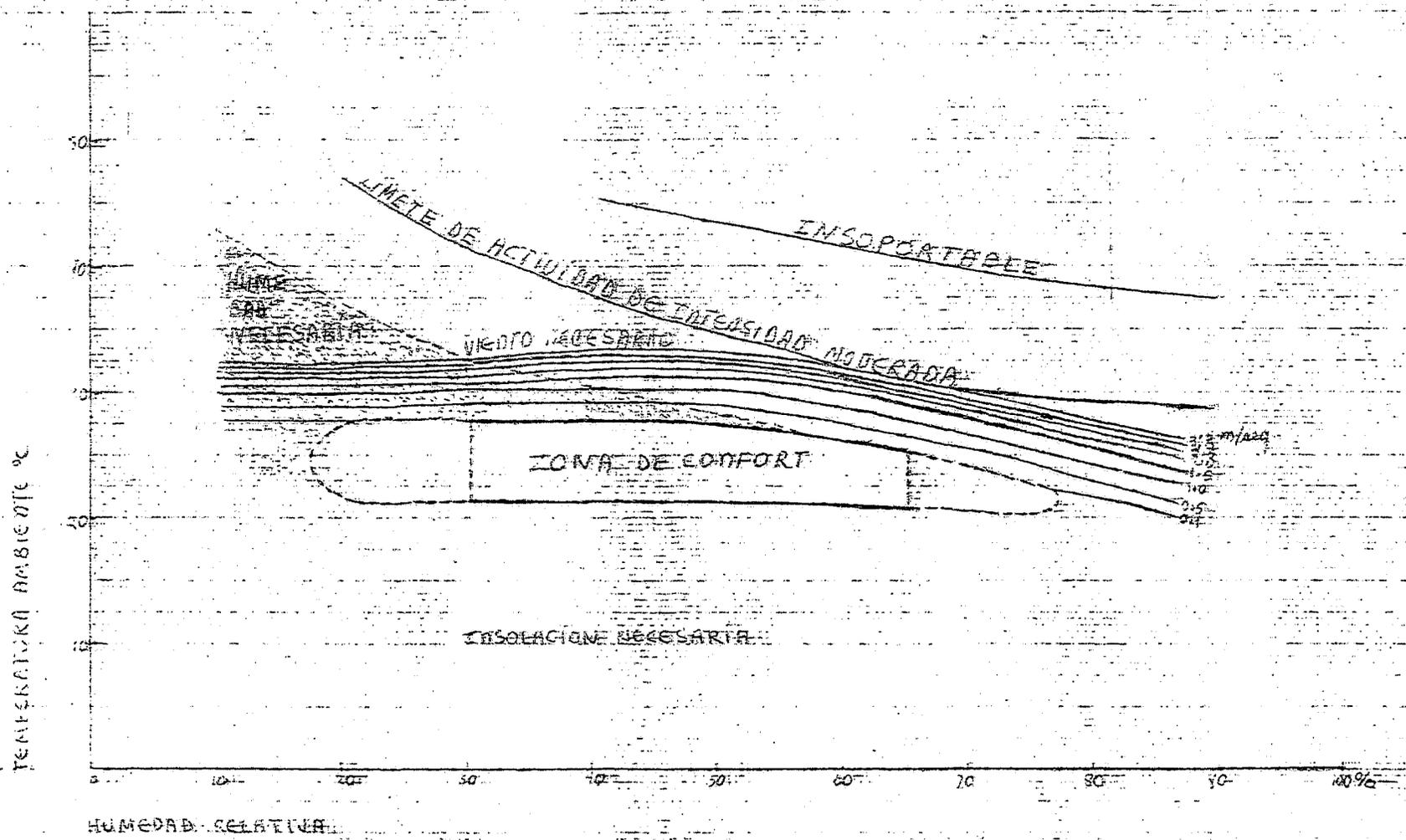
La sensación de bienestar higrotérmico, aunque depende de múltiples factores tales como: edad, sexo, vestimenta, color de la piel, estado anímico, peso, estado de salud, nivel de aclimatación, alimentación, actividad, hábito, etc., se produce generalmente dentro del polígono -- mostrado en la figura 1.

La gráfica de los "puntos-dato" correspondiente a las temperaturas y humedad relativa ambientales sobre la carta bioclimática, mostrará los niveles de confort o incomodidad que se presentan bajo el clima local. Conviene -- graficar los puntos-dato de valores medios, máximos y mínimos promedio, y máximos y mínimos extremos. El análisis -- de las gráficas permite detectar con relativa facilidad -- los requerimientos estacionales de: ventilación, enfriamiento, o calefacción. Acorde a estos requerimientos estacionales se selecciona el SPCS que satisfaga las necesidades de confort.

El diagrama muestra las zonas higrotérmicas en relación al confort fisiológico indicando además los requerimientos de:

- a). radiación y temperatura (área inferior del -- diagrama).
- b). sombra (desde la línea inferior de la zona de confort hacia arriba).
- c). vientos (desde la línea superior de la zona -- de confort hacia arriba)
- d). humedad (área superior izquierda).

Para conocer las necesidades de confort prioritarias en una cierta localidad puede llevarse a cabo el método siguiente: graficar los datos de temperatura y humedad sobre la carta bioclimática a intervalos regulares de tiempo que abarque todo el año. Dependiendo del número de puntos que queden comprendidos en una de las áreas antes descritas (a, b, c y d) se calculan los porcentajes anuales --



# DIAGRAMA BIOCLIMÁTICO

Figura 1

de los requerimientos específicos de ventilación, enfriamiento o calentamiento. Habrá localidades en que una o dos necesidades competirán entre sí en prioridad, esto ocurre en las regiones de clima extremo donde en la época de calor puede requerirse mucho enfriamiento ya sea mediante efectos del viento, sombra, o acondicionamiento de aire, y en la época de frío puede requerirse demasiada calefacción ya sea mediante efectos de la radiación o temperatura. También hay regiones que requieren enfriamiento matutino o vespertino y calentamiento nocturno. Esto último sucede sobre todo en la región del altiplano, donde ocurren grandes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche y la humedad absoluta permanece casi constante.

3).-- SELECCION DEL SPCS QUE SATISFAGA LAS NECESIDADES DE CONFORT EN LA CONSTRUCCION ANALIZANDO LOS SPCS QUE SE HAYAN UTILIZADO EN CASOS CUYA PROBLEMATICA SEA SIMILAR.

Cuando la localidad estudiada muestra escasas necesidades de climatización durante el año, bastará con un diseño adecuado de la construcción que permita aprovechar al máximo los elementos naturales que satisfagan esas necesidades. En este caso, no será necesario instalar algún SPCS muy especial.

Cuando las necesidades de confort no pueden satisfacerse simplemente con consideraciones de diseño básicas (aislamiento, buena ventilación natural, orientación óptima de la casa, etc.), habrá necesidad de recurrir a SPCS especiales que como ya hemos mencionado son sistemas capaces de cubrir las demandas de ventilación, calefacción, o enfriamiento en la construcción sin necesidad de recurrir al acondicionamiento artificial (electromecánico).

Para satisfacer las necesidades extremas de confort existen gran variedad de SPCS. Algunos de estos sistemas los hemos descrito en los capítulos II y IV.

En regiones húmedo calientes, donde las necesidades de confort pueden llegar a satisfacerse con los efectos del viento y en algunos casos con la deshumidificación y humidificación del aire, es conveniente emplear el sistema pasivo de acondicionamiento de aire mostrado en la figura 10 del capítulo anterior. Para que este sistema funcione eficientemente, la proporción local de radiación directa respecto a la difusa debe ser cuantiosa, y la humedad no demasiado alta. De esta manera se activa el fenómeno de termocirculación del aire y la regeneración del material desecante. En ausencia de suficiente radiación solar directa, el aislamiento térmico de las paredes y la estabilidad del aire en el interior eleva la temperatura en la --

construcción.

En regiones relativamente secas y no muy calientes en donde se requiere ventilación y humidificación para satisfacer las necesidades de confort, puede emplearse el sistema pasivo integral mostrado en la figura 11. El invernadero almacena considerables cantidades de energía y optimiza las condiciones de humedad.

En las zonas áridas y semi-áridas del norte y centro del país, con humedades relativas bajas, gran oscilación diaria de temperatura, y en aquellas con gran altitud (más de 500 m), es conveniente emplear el sistema mostrado en la figura 4. Como sabemos este sistema produce enfriamiento o calentamiento por lo que resulta adecuado en estas regiones de clima extremo.

Otro sistema que funciona de manera bilateral es el muro emisor tipo Trombe. Funciona bastante bien en regiones frías durante el invierno y satisface las necesidades de confort de calentamiento aún cuando las temperaturas ambientales estén por debajo de 0°C. En verano puede usarse el muro para propósitos de ventilación.

En regiones desérticas con veranos demasiado calientes, con gran oscilación diaria de temperatura, y con cielos nocturnos despejados, las necesidades de confort pueden satisfacerse con los efectos del viento. Si este viento es caliente lo recomendable es enfriarlo. Un sistema de este tipo es la torre de viento (figura 1 del capítulo VII) que enfría el aire sensiblemente en su interior y lo hace circular a través de la construcción. Si se trata de una región demasiado seca conviene colocar a la salida de la torre un dispositivo humidificador (fuente, estanque, etc.) para que de esta manera se enfríe el aire circulante proporcionando una sensación cercana a la de confort.

Los SPCS descritos han mostrado su eficacia en varias partes del mundo (Estados Unidos, Francia, Irán, México, etc.). Para que se pueda garantizar su funcionamiento es necesario realizar una serie de estudios, consideraciones previas y evaluaciones que analicen la factibilidad de su funcionamiento bajo las distintas condiciones micrometeorológicas que se presentan en nuestro país. Esto es importante porque las condiciones climatológicas, el estilo de vida, y los materiales de construcción no son los mismos. En consecuencia diseños de los SPCS, aún del mismo tipo, pueden tener diferencias notables.

Los prototipos que actualmente se construyen y prueban en los distintos lugares de México donde el IIM

realiza sus proyectos, permitirán optimizar los diseños SPCS de las edificaciones, adecuándolas al microclima local.

El diseño teórico preliminar del SPCS seleccionado se hace en base a las experiencias obtenidas en módulos solares en microclimas semejantes al lugar donde se pretende construir el sistema. Este diseño preliminar debe ajustarse y modificarse para corregir deficiencias en el comportamiento identificadas por cálculos detallados. Mediante una segunda evaluación matemática se checa el efecto de las modificaciones introducidas. Este procedimiento es cíclico y repetido hasta alcanzar el comportamiento térmico deseado.

## CAPITULO VI

### ASPECTOS TERMICOS DEL BALANCE ENERGETICO EN LOS SPCS

Los métodos para la estimación del comportamiento térmico de las construcciones solares pasivas son notablemente diferentes de los métodos convencionales comúnmente usados hasta ahora para calcular los requerimientos de calentamiento y enfriamiento de una construcción. En el método tradicional se determina el tamaño del equipo electromecánico de climatización según el comportamiento térmico de la construcción a las peores condiciones del tiempo que pudiera haber en la localidad. En consecuencia, la mayoría de las veces estos sistemas de calefacción y aire acondicionado convencionales producen calentamientos y enfriamientos excesivos.

En los SPCS toda la construcción en sí constituye el equipo solar que climatizará su medio ambiente interior. Por esta razón es difícil calcular de manera independiente algún aditamento solar especial que trate de adaptarse a edificaciones ya construídas o por construirse. Es necesario predecir las temperaturas de los lugares críticos de la construcción, y como éstas dependen fundamentalmente de las condiciones del tiempo, deberá hacerse un estudio detallado de sus fluctuaciones de una manera continua, es decir, para un intervalo largo de tiempo que puede ser desde 5 días hasta más de un año (modelo de simulación matemática). Es de práctica común escoger intervalos que tengan grandes cambios en las condiciones del tiempo. Esto ocurre en las temporadas de verano e invierno en las cuales las temperaturas y humedades ambientales sufren variaciones considerables. Si los SPCS satisfacen las necesidades de climatización bajo esas condiciones extremosas del tiempo, es de esperarse que lo hagan también durante todo el año. No obstante, el estudio se hace también para condiciones no extremosas.

En los SPCSS toda la construcción constituye el equipo solar que climatiza su interior, sin embargo, no todas las partes de ella proporcionan al mismo nivel el efecto de climatización deseado. Esto es, no todas las partes contribuirán de igual forma en las aportaciones de calor -

o frío hacia el medio ambiente interior de la construcción. Hay que recordar que algunos SPCS están lo suficientemente aislados como para que algunas barreras físicas del sistema casi no contribuyan a las cargas y pérdidas térmicas de la construcción. El sistema de ganancia solar directa es uno de los SPCS en donde ciertos pisos y paredes de la construcción juegan el papel principal en dichas aportaciones. En otros SPCS, la fuente principal de calor o frío proviene de algún aditamento solar especial, por ejemplo, de un muro Trombe, de una pared de recipientes almacenadores de agua, de un estanque de agua en el techo, etc. El aire calentado o enfriado por estos aditamentos especiales interactúa con las demás estructuras de la construcción (además de la interacción con muebles, personas, etc.) Modificando en cierta medida la temperatura del aire generada por ellos; en los sistemas de ganancia directa habrá mucha interacción energética entre todos los elementos de la construcción.

Dos conceptos son críticos para el entendimiento del comportamiento térmico de un espacio calentado y enfriado pasivamente. Ellos son:

1. Que el área de ventanas en la fachada sur, propiedades aislantes de la estructura, y condiciones climáticas exteriores determinarán la temperatura media del espacio durante el día.

y,

2. Que la dimensión, distribución, material, y en algunos casos (sistemas de ganancia directa) el color de la superficie de las paredes y pisos determinarán la fluctuación diaria por encima o por debajo de la temperatura media interior.

La ganancia de calor a través de cualquier ventana es relativamente fácil de calcular. Sin embargo, el control del almacenamiento y disipación de calor en un espacio calentado o enfriado pasivamente es el mayor problema que se confronta al optimizar un diseño. Para cada sistema, la integración de la masa térmica en un espacio determinará la fluctuación diaria de la temperatura interior. Así, en un sistema de ganancia directa, con gran masa térmica estructural, los mayores determinantes de las fluctuaciones de la temperatura del aire interior, son las proporciones de superficies expuestas a la radiación solar así como la distribución de esta radiación sobre ellas. En un muro de almacenamiento térmico, es el espesor del material usado para construir la pared. Y, en un sistema de techo de agua, es la cantidad de agua usada.

Uno de los mayores impactos sobre el comportamiento del sistema ocurre con un cambio en la conductividad térmica del material. Usando una masa térmica de gran conductividad, las fluctuaciones de la temperatura del aire en el espacio interior son minimizadas (la pared isotérmica corresponde a el caso de conductividad infinita). Cuando se usan materiales de gran masa, la elevada conductividad estructural produce reducciones sensibles de la oscilación interior de la temperatura.

Estos, y otros efectos de las variables de diseño sobre el comportamiento térmico de los SPCS, como:

- a) La variación de la difusividad térmica (relación entre el efecto aislante y la capacidad calorífica:  $k/\rho C_p$ ) del material almacenador de calor.
- b) El uso de vidrio simple o doble con o sin aislamiento nocturno.
- c) La variación del área de vidrio.
- d) La ubicación del colector y almacenador solares con respecto al resto de la estructura.
- e) El de permitir o evitar la termocirculación natural del aire, etc.

Solamente pueden ser identificados y cuantificados a través de la experimentación en módulos solares (en regiones climáticas específicas), y a través de la predicción de su comportamiento por medio de la simulación (digital y analógica) físicomatemática y métodos computacionales. Cada sistema es analizado para diferentes parámetros de diseño como los mencionados arriba. En cada caso el modelo de simulación permite la variación de un parámetro mientras los otros permanecen constantes. La radiación solar sobre el vidrio captador, la temperatura del aire ambiente y la velocidad del viento son las principales variables climatológicas suministradas para el análisis (dadas a intervalos horarios).

La experimentación en módulos solares (durante un período mínimo de un año), y los modelos de simulación computacionales, proporcionan el conocimiento de las necesidades cuantitativas básicas de diseño. Países con amplia experiencia en este campo han desarrollado reglas prácticas que hacen que el diseño de un SPCS sea más rápido, fácil y confiable. Los sistemas estudiados más ampliamente son: ganancia directa, pared de almacenamiento térmico (sólida o con agua), muro Trombe, y recipientes plásticos con agua en el techo.

La predicción del comportamiento de los SPCS inevitablemente envuelve la solución de un conjunto de ecuaciones simultáneas en las cuales las incógnitas son las temperaturas de los lugares críticos en el sistema. Tales temperaturas pueden ser:

-temperaturas del aire del medio ambiente exterior

-temperaturas del aire interior del espacio climatizado

-temperaturas del aire que circula a través del espacio comprendido entre el vidrio colector y el muro almacenador de calor

-temperaturas del material almacenador de calor a varios espesores

-temperaturas de paredes, pisos, y techos; etc.

La forma de la solución es diferente dependiendo de si la temperatura del espacio climatizado es restringida a un rango o de si varía por encima o por debajo de este. En la primera situación, la temperatura del espacio adquiere el valor calculado y el diseño no se modifica. La segunda situación presenta dos posibilidades: la temperatura del espacio calculada es menor que la mínima permitida, en esta circunstancia la energía auxiliar (que se alcanza al modificar el diseño) es calculada como la requerida para llevar el espacio a la temperatura mínima requerida. La otra posibilidad es cuando la temperatura del espacio calculada es mayor que la temperatura máxima permitida, en este caso se busca la manera de propiciar más la pérdida de calor (para el medio ambiente, presumiblemente por ventilación) para llevar así la temperatura del aire a la temperatura máxima permitida.



Las ecuaciones de balance de energía se hacen para cada nodo cuantificando: la energía calorífica transportada por radiación, conducción y convección; las aportaciones de calor del sol, luz, gente, equipo electromecánico, etc.; y la energía térmica sensible almacenada en el muro. El comportamiento de la temperatura de cada sitio se simula por solución de estas ecuaciones de energía usando datos horarios de radiación solar, temperatura del aire ambiente y velocidad del viento.

La radiación solar sobre la superficie de vidrio vertical se calcula a partir de los datos de la radiación solar sobre una superficie horizontal considerando sus componentes directa y difusa y aplicando algunas transformaciones geométricas. La transmisividad del vidrio se calcula como una función del ángulo de incidencia, y se considera que toda la radiación transmitida a través del vidrio es absorbida en el nodo 6. El almacenamiento de energía ocurre únicamente en los nodos 7, 8, 9 y 10.

La energía térmica que fluye entre los nodos se calcula basándose en la diferencia de temperatura y el valor apropiado de  $U$ . Los valores de  $U_2$ ,  $U_4$  y  $U_5$  incluyen términos de radiación no lineales (abarcando efectos de radiación más conducción de la película exterior). Todas las emitanancias se consideran iguales. Los valores de  $U_3$ ,  $U_6$  y  $U_7$  son los mismos.

Los valores de  $U_8, U_9, U_{10}, U_{11}$ , y  $U_{12}$  representan las conducciones térmicas a través del concreto:  $U_8 = U_{12}$  y  $U_9 = U_{10} = U_{11}$ .

Cuando se permite la termocirculación natural, esta incluye un mecanismo para flujo instantáneo de calor interno del cuarto durante el día. La conductancia  $U_{12}$  representa este sendero del flujo de energía. El flujo de aire volumétrico se determina por la siguiente relación:

$$CdA'd \sqrt{g\beta(T_5 - T_2)}/H$$

donde  $Cd$  = coeficiente de descarga en la ventila superior del muro.

$A'd$  = área de la ventila por unidad de longitud.

$H$  = altura del muro

$$\beta = 1/T_5$$

Este modelo alcanzó una aproximación de  $\pm 1^\circ\text{C}$  de las temperaturas experimentales. Las temperaturas medias del cuarto alcanzadas por este sistema de muro almacenador fueron alrededor de  $15.6^\circ\text{C}$  a  $21.1^\circ\text{C}$  arriba de las temperaturas medias ambientales durante un día típico de insolaación a mediados de invierno.

El modelo también funciona bastante bien para un cuarto de prueba que en vez de muro de concreto tenga una "pared de agua". Esta se analiza reemplazando los nodos 6, 7, 8, 9, 10 y 11 con un nodo simple 6 que representa toda la masa de agua.

Con modelos más complejos que el anterior se ha llegado a predecir el comportamiento térmico de construcciones solares pasivas más sofisticadas que un cuarto de prueba. Estas construcciones pueden ser desde una pequeña casa de un solo nivel, hasta construcciones de varios niveles, y pueden integrar uno o más dispositivos solares especiales como un muro Trombe y un invernadero o un muro Trombe y ganancia directa, etc.

Sin embargo, por más complejo que sea el modelo de simulación, éste se basa, para su balance energético, en las tres formas de transmisión de calor:

.Por conducción

.Por convección

.Por radiación

y en factores tales como:

Transmisión de calor sensible a través de paredes, techos y pisos: por conducción a través de los diferentes materiales de una barrera, y por convección entre la superficie y el aire. Esta transmisión es ocasionada por la diferencia de temperatura entre los medios exterior e interior.

Ganancia de calor debida al efecto solar: calor transmitido por radiación a través de ventanas y colectores, y calor absorbido por las paredes, techos o muros de almacenamiento.

Ganancias o pérdidas de calor sensible o latente debidas al aire que entra al espacio, ya sea por infiltración o ventilación.

Ganancias o pérdidas de calor debido a otros factores como la presencia de personas, aparatos electromecánicos, etc.

Las ecuaciones fundamentales para cuantificar la transmisión de calor son las siguientes:

Ecuación de la transmisión de calor por conducción formulada por Fourier:

$$q = -kAdt/dx$$

Ecuación de la transmisión de calor por convección formulada por Newton:

$$q = hA(t_s - t_f)$$

Ecuación de la transmisión de calor por radiación

$$E = \sigma T^4$$

La transmisión de calor ocasionada por la diferencia de temperatura entre los medios exterior e interior se calcula con la siguiente ecuación

$$Q = UA (t_i - t_e)$$

La transmisión de calor sensible o latente debidas al aire que entra al espacio se calcula con las siguientes expresiones

calor sensible

$$Q_s = C_p G (t_i - t_e)$$

calor latente

$$\lambda = G (Y_i H_i - Y_e H_e)$$

La nomenclatura de las fórmulas anteriores es la siguiente:

q = calor transmitido por unidad de tiempo (Cal/h)

k = conductividad térmica (cal. cm/h.cm<sup>2</sup>.°C<sup>2</sup>)

A = área neta de transmisión de calor (cm<sup>2</sup>)

dt/dx = gradiente de temperatura en dirección del flujo de calor (°C/cm)

h = coeficiente de convección térmica o de película (Cal/h.cm.°C)

t<sub>s</sub> = temperatura de la superficie (°C)

t<sub>f</sub> = temperatura del fluido (aire) (°C)

t<sub>i</sub> = temperatura del aire interior del espacio climatizado (°C)

t<sub>e</sub> = temperatura del medio ambiente exterior (°C)

Q = transmisión de calor por unidad de tiempo (Cal/h)

Q<sub>s</sub> = transmisión de calor sensible por unidad de tiempo (Cal/h)

C<sub>p</sub> = capacidad calorífica del aire (Cal/Kg°C)

G = gasto másico del aire (Kg/h)

λ = transmisión de calor latente por unidad de tiempo (Cal/h)

Y<sub>i</sub> = humedad absoluta en el interior (Kg vapor/Kg seco)

$Y_e$  = humedad absoluta en el exterior (Kg vapor/Kg a. seco)

$H_i$  = entalpia del aire interior (Cal/Kg)

$H_e$  = entalpia del aire exterior (Cal/Kg)

$E$  = flujo total de energía (Cal/cm<sup>2</sup> min)

$\sigma$  = constante universal de Stefan - Boltzmann =

$$8.12 \times 10^{-11} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ oK}^{-4}$$

$T$  = temperatura absoluta (°K)

CAPITULO VII

FÁCTIBILIDAD DE IMPLANTACION DE UNA TORRE  
DE VIENTO (SISTEMA PASIVO DE ENFRIAMIENTO  
TRADICIONAL DE IRAN) EN ZONAS ARIDAS Y SE  
MI-ARIDAS DE MEXICO

La arquitectura tradicional de muchas culturas de clima extremo-  
so, como Irán, Pakistán, Arabia Saudita, Asia Central, Egipto y  
Africa, ofrece ejemplos de soluciones muy ingeniosas a los pro-  
blemas que presenta el clima a la arquitectura. Una de estas so-  
luciones es el uso de las torres de viento o "captadores de vien-  
to" empleadas desde hace mucho tiempo en Irán, en las áreas alre-  
dedor de Yazd, Bam, Kerman, y en el este del desierto de Teheran.  
Estos lugares pertenecen a la parte central de Irán que se carac-  
teriza por un tipo de clima desértico con cielos nocturnos extre-  
madamente claros y un alto índice de insolación anual. La gente  
que vive en esta área, dispone de viviendas tales que a pesar -  
del clima tan hostil, tienen muy poca necesidad de calentamiento  
durante el invierno y no necesitan enfriamiento activo o aire -  
acondicionado convencional en verano.

La figura 1 muestra una construcción en la ciudad Irani de  
Yazd la cual integra tres sistemas pasivos de enfriamiento: la  
torre de viento que actúa enfriando el aire ambiente y circulán-  
dolo a través de la construcción. (Las partes salientes de las vi-  
gas de madera que refuerzan la torre sirven también como anda-  
mios para su mantenimiento exterior). El techo curvo (domo) a la  
izquierda de la torre mantiene fresco el techo de la construcción.  
Un domo posee una superficie de transferencia de calor mayor que  
un techo plano lo que favorece la convección del aire. Por lo -  
tanto un techo curvo enfría más fácilmente. La pequeña estructu-  
ra sobre el tope del techo curvo es una ventana de aire, y tam-  
bién actúa enfriando la construcción ventilando el aire caliente  
bajo el techo por efecto de la baja presión del viento incidente  
sobre el domo respecto a la presión del aire en el interior. Los  
tres sistemas mantienen confortable la construcción durante los  
meses de verano.

La figura 2 muestra la parte de arriba de una torre de vien-  
to en Yazd que tiene 13 metros de altura y sus aberturas son de  
3 metros de longitud. La torre de la figura 1 tiene 34 metros de  
altura con aberturas de 11 metros de longitud.

La figura 3 muestra otro uso especial de las torres de vien-  
to: enfriamiento de agua en cisternas. Las torres tienen alrede-  
dor de 12 metros de altura. La cisterna es de 12 metros de pro-  
fundidad y con una capacidad de 1000 metros cúbicos de agua. El  
agua en las cisternas se mantiene fría en los meses de verano -  
gracias al efecto de enfriamiento evaporativo en su superficie debi

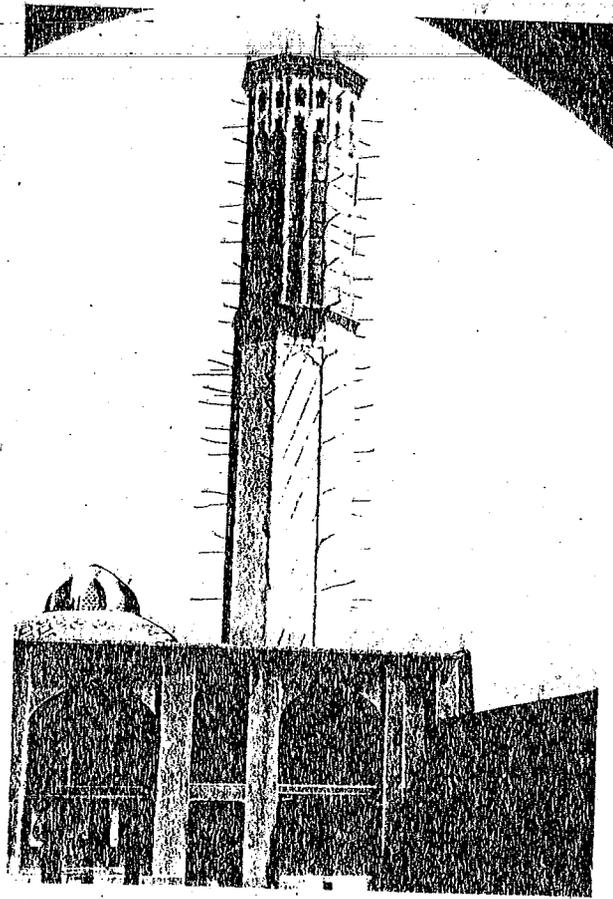


FIG. 1

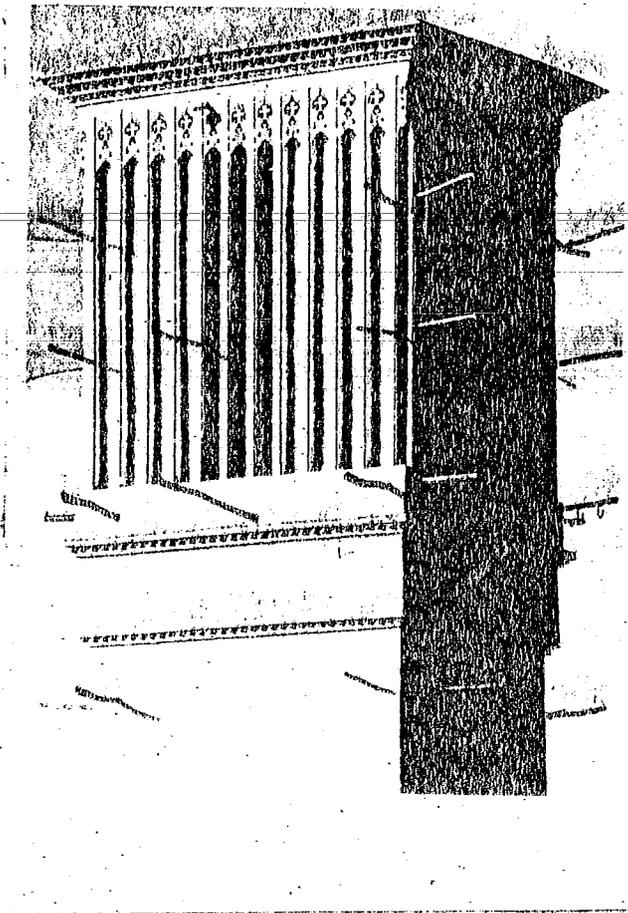


FIG. 2

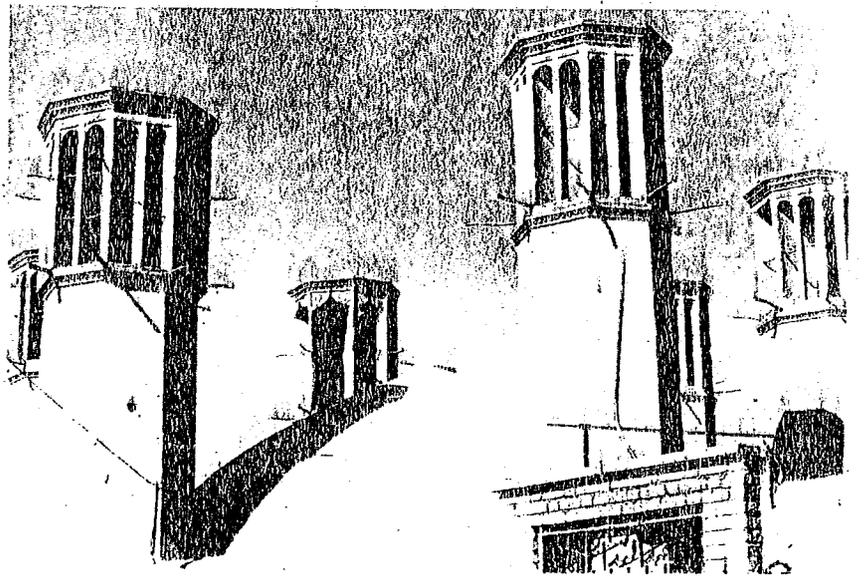


FIG. 3

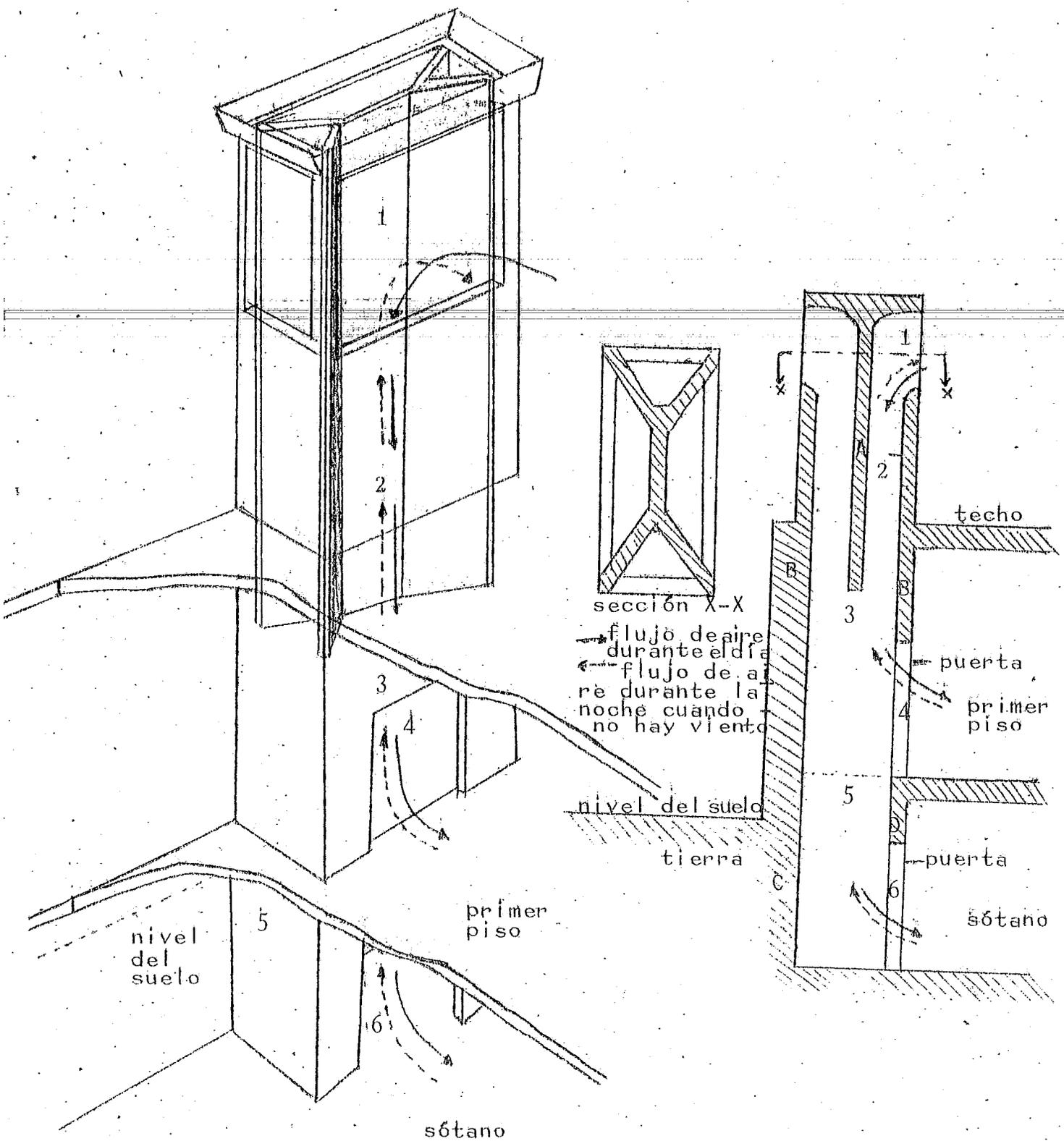


FIGURA 4. SECCION TRANSVERSAL Y OPERACION DE UNA TORRE DE VIENTO EN VERANO

Pueden proveer aire fresco a construcciones de uno o varios pisos, de aquí que tengan una o más puertas, ó una sola para varios pisos dependiendo del tipo de control que se le pretenda dar al flujo de aire dentro de la construcción.

La operación de la torre dependen de las condiciones climatológicas prevalecientes, principalmente de las características del viento (intensidad, dirección y frecuencia) y de la temperatura. Cuando no hay viento nocturno, la torre opera semejante a una chimenea, succionando el aire de la construcción hacia arriba a través de la torre (tiro térmico) ascendente) y el aire ambiente frío es aspirado dentro de la construcción a través de puertas y ventanas. Esto ocurre porque las paredes A, B, C y D, (figura 4), de la torre que fueron calentadas durante el día transfieren calor hacia el aire frío de la noche dentro y alrededor de la torre; de esta manera el aire dentro de la torre se va calentando y como el aire caliente es menos denso, su presión en lo alto de la torre es menor generándose así un flujo ascendente. El aire caliente sale por las aberturas (1). Este efecto chimenea de la torre mantiene una circulación del aire ambiente frío a través de la construcción y enfría las paredes tanto de la construcción como de la estructura de la torre de viento; la circulación continúa durante toda la noche. Cuando el cielo está extremadamente claro (como ocurre con frecuencia en las regiones desérticas) el enfriamiento del techo y paredes externas de la construcción, así como el de la torre, se acelera mediante la radiación térmica emitida hacia el cielo.

Cuando hay viento soplando durante la noche la circulación del aire es en el sentido contrario a la que se describió, las paredes de la torre de viento son enfriadas y también puede resultar un enfriamiento de la construcción: éste enfriamiento se consigue por el descenso del aire nocturno en la torre antes que circule a través de puertas y ventanas. En este caso, aunque el aire nocturno es levemente calentado por las paredes de la torre (calentadas durante el día) antes de entrar a la construcción, el enfriamiento puede ser lo suficientemente efectivo para que la temperatura del aire en la construcción sea cercana a la del aire ambiente. Lo mismo, si el cielo está muy claro el enfriamiento radiativo de la construcción resulta bastante efectiva, lográndose un enfriamiento adicional del aire.

Durante el día, y cuando no hay viento, la operación de la torre es alrevés que el de una chimenea. El aire caliente exterior en contacto con las paredes frías A y B (enfriadas durante la noche previa) es enfriado; siendo más denso que el aire caliente

el aire frío desciende a través de la torre (tiro térmico descendente) pasando por los pasajes (2) y (3). Este aire frío pasa a través de la construcción por las puertas (4) y/o (6) y sale eventualmente (según las renovaciones de aire requeridas) por puertas y ventanas.

Quando hay viento durante el día, la velocidad de circulación del aire y el efecto de enfriamiento se incrementan. Mediante un arreglo apropiado de puertas en la torre y en los cuartos de la construcción, el aire puede circular a través de algún cuarto que esté muy lejos de la torre. Por ejemplo y para el caso de la figura 4, el aire que circula a través de las puertas (4) y/o (6) entra al cuarto adyacente a la torre (7). Luego abriendo otras puertas de este cuarto, el aire recorre distancias más largas. Abriendo o cerrando algunas de las puertas (4) y (6), el flujo de aire a través de cada piso puede ser controlado.

Si no hay viento durante el día, cuando la temperatura de la torre tiende a la del aire ambiente, la circulación del aire hacia abajo a través de la torre cesa y la torre empieza a operar semejante a una chimenea. De hecho, la operación de la torre no es constante a lo largo del día y la noche; el enfriamiento efectivo y la duración de cada fase de operación de la torre cambia de acuerdo a las fluctuaciones en la temperatura del aire, la intensidad de la radiación solar, la velocidad del viento, etc.

Las aberturas de la parte posterior de la torre son colocadas por pares, tal que para cada abertura a barlovento hay una a sotavento. Cuando las puertas en la parte baja están cerradas, el viento que circula hacia abajo de la torre es forzado a subir por el pasaje opuesto y sale a través de las aberturas a sotavento; el tiro creado hacia arriba en el pasaje opuesto mete un poco de aire a la construcción y lo aspira hacia arriba de la torre. En otras palabras, en la operación normal de una torre de viento hay siempre alguna entrada de aire a la construcción a través de las aberturas en sotavento, originando una circulación continua de aire a través de la construcción. Para prevenir algún escape de aire en invierno, las puertas (4) y (6) se bloquean parcial o totalmente por una pared de concreto delgada. Si no se cierran apropiadamente, se puede aumentar la infiltración produciéndose pérdidas de calor apreciables.

En lugares donde los vientos con polvo soplan en una sola dirección y el viento más agradable sopla en dirección opuesta, las aberturas de la torre son diseñadas para interceptar solamente el viento agradable. Similarmente en áreas donde hay vientos

predominantes las aberturas se orientan tratando de aprovecharlo. Aún con estas precauciones puede entrar polvo a la torre, - así como insectos y pájaros. Esto representa una desventaja. Sin embargo, las nuevas torres están siendo equipadas con biombo para prevenir la entrada de insectos y pájaros. Para vencer el problema del polvo, es conveniente aumentar la sección transversal de la torre en su parte inferior, de este modo el viento disminuye su velocidad (efecto Bernoulli) en esta sección y se asienta sobre unas repisas llamadas "bolsas de polvo". Otra solución consiste en hacer pasar el aire a través de un volumen filtrante de carbón o paja (húmedos).

El enfriamiento del aire que se alcanza en la torre puede ser incrementado si conjuntamente con este enfriamiento sensible se favorece el enfriamiento evaporativo. El enfriamiento evaporativo ocurre cuando hay un cambio en la temperatura y, a diferencia del enfriamiento sensible, un cambio en la humedad del aire. La humedad del aire puede jugar un papel importante en la operación de la torre. Las torres de viento que incorporan procesos evaporativos enfrían el aire en una forma completamente efectiva; este proceso es necesario en medios ambientales calientes y secos, ya que la humidificación del aire que acompaña al proceso evaporativo es una contribución importante al confort a temperaturas relativamente bajas.

En las figuras 5 y 6 se muestran construcciones de torres de viento que operan con enfriamiento sensible y enfriamiento evaporativo. La primera muestra la sección transversal de una torre en la ciudad de Bam, donde la base de la torre está conectada al sótano de la construcción por un túnel de suelo húmedo de 50 m de longitud. En el túnel se plantan árboles, arbustos y hierbas que se riegan a menudo, el agua de riego se filtra a través del suelo de tal manera que conserva húmedas las paredes del túnel; así, el aire proveniente de la torre se enfría sensiblemente en su interior. Al pasar por el túnel se somete a un enfriamiento adicional (el agua sobre la pared absorbe bastante calor para ser vaporizada) y al pasar por el estanque y la fuente (0) se humidifica en mayor proporción haciendo más efectivo el enfriamiento. Desde luego la vaporización requiere relativamente gran cantidad de calor, y las torres de viento que incorporan procesos evaporativos enfrían el aire muy eficientemente.

La figura 6 muestra la sección transversal de otra torre de viento distinta: la casa tiene un acceso hacia un río subterráneo por el ducto vertical (b) y la torre se coloca en posición favorable respecto a éste, tal que el viento que baja por la torre y que sale por la puerta (6) pase por el extremo supe-

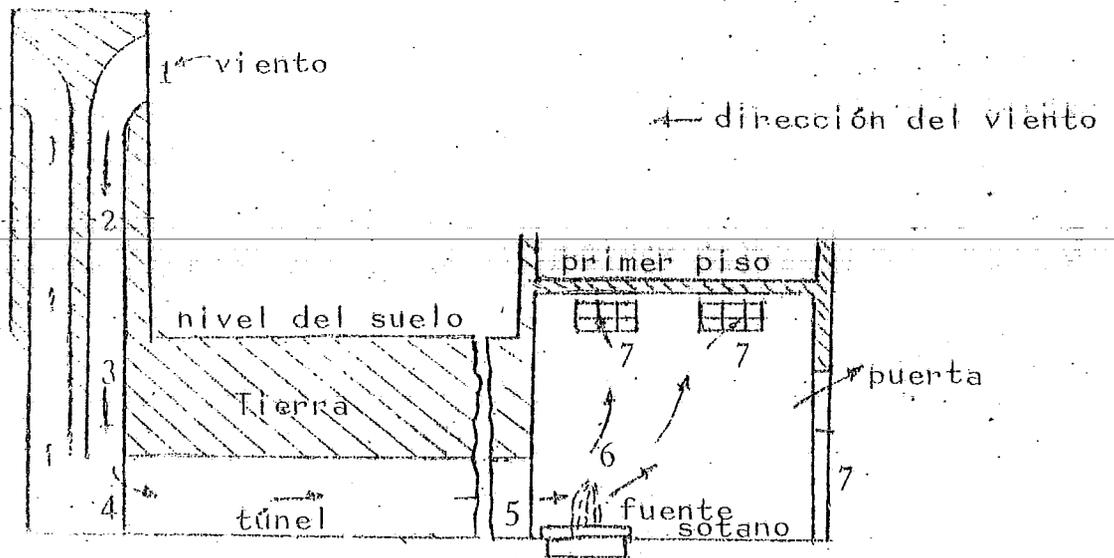


FIGURA 5. SECCION TRANSVERSAL DE UNA TORRE DE VIENTO CONECTADA AL SOTANO POR UN TUNEL SUBTERRANEO HUMEDO DE 50 m DE LONGITUD

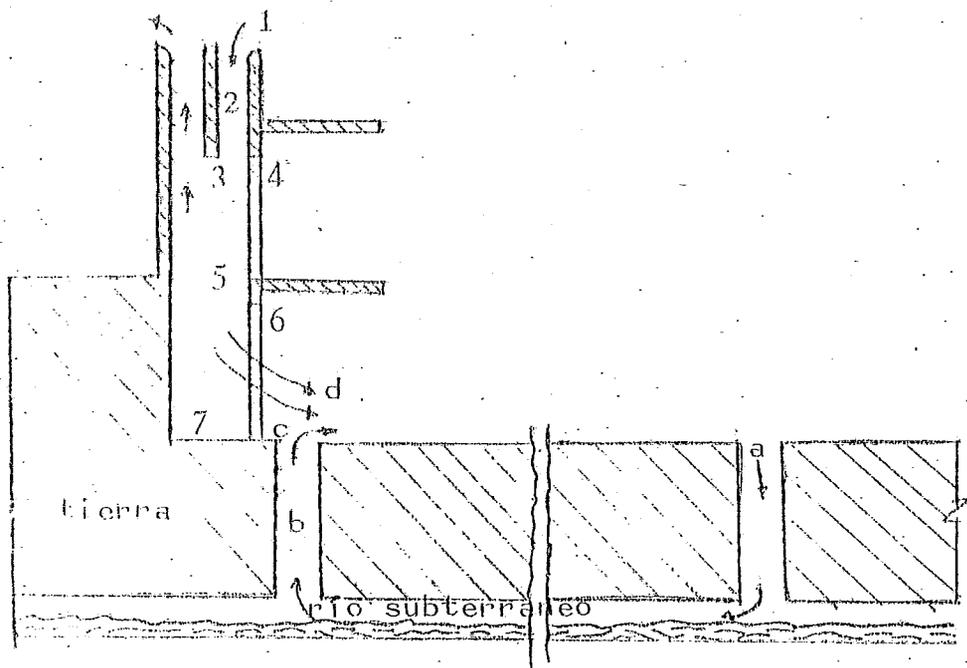


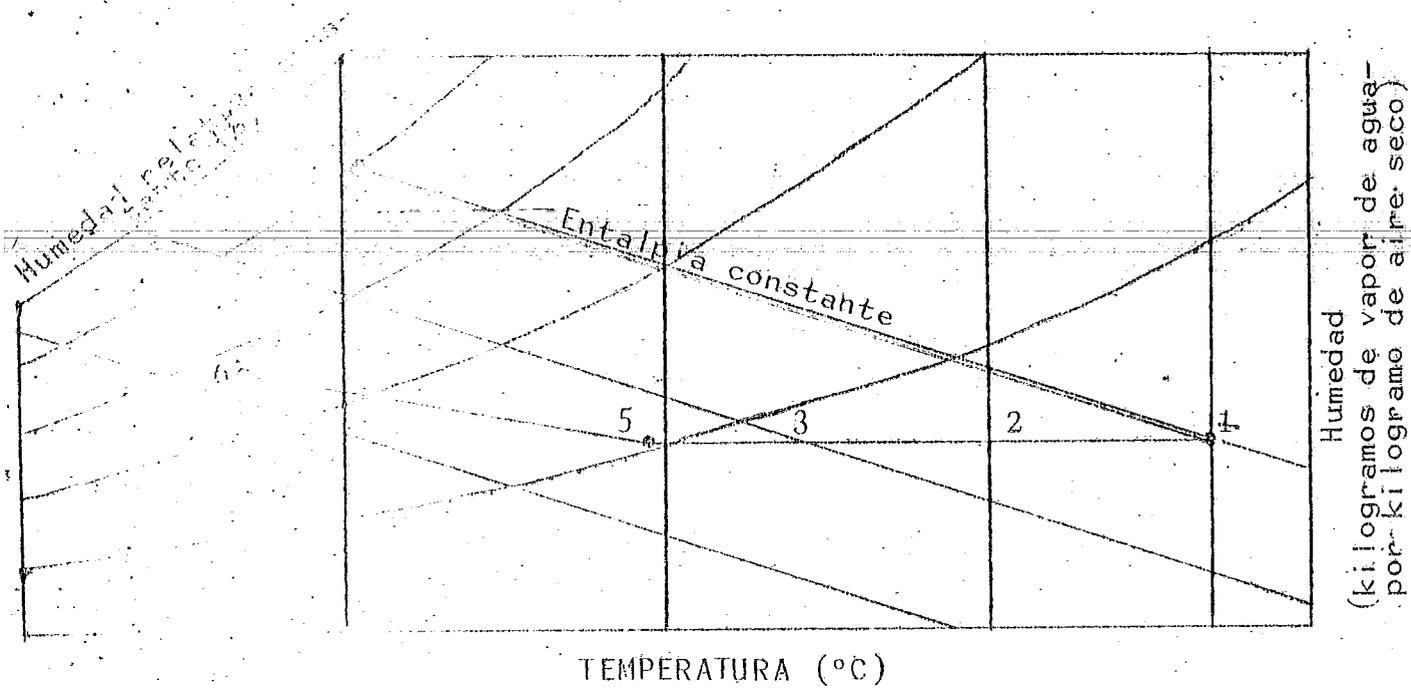
FIGURA 6. SECCION TRANSVERSAL DE UNA TORRE DE VIENTO DE LA CIUDAD DE BAM USADA EN CONJUNTO CON UN RIO SUBTERRANEO

ción del ducto vertical y aspire el aire que proviene del túnel (río subterráneo) en el punto (c). El aire que entra al túnel lo hace a través de otro ducto vertical (a) que comunica hacia el medio ambiente exterior. Como el agua del río subterráneo está usualmente fría, esta combinación de torre y río enfría bastante el aire. La figura 7 representa aproximadamente las condiciones termodinámicas del aire sometido al proceso de enfriamiento en la torre de viento mostrada en la figura 6. El aire en el punto (c) sótano) es muy frío y húmedo. Tradicionalmente este espacio se ha utilizado como un frigorífico natural para la preservación de alimentos perecederos. Del punto (c) el aire puede pasarse o no al primer piso de la construcción, dependiendo de si el aire que sale por la puerta (4) ha sido en frío lo suficiente. La operación nocturna de esta torre en ausencia de viento es similar a la explicada anteriormente (efecto chimenea): el aire exterior en calma entra por el ducto vertical (a) y al pasar por el río subterráneo sufre un enfriamiento cooperativo sensible, luego asciende a través del ducto (b), se mezcla con el aire del sótano y finalmente sale por las aberturas de la parte superior de la torre.

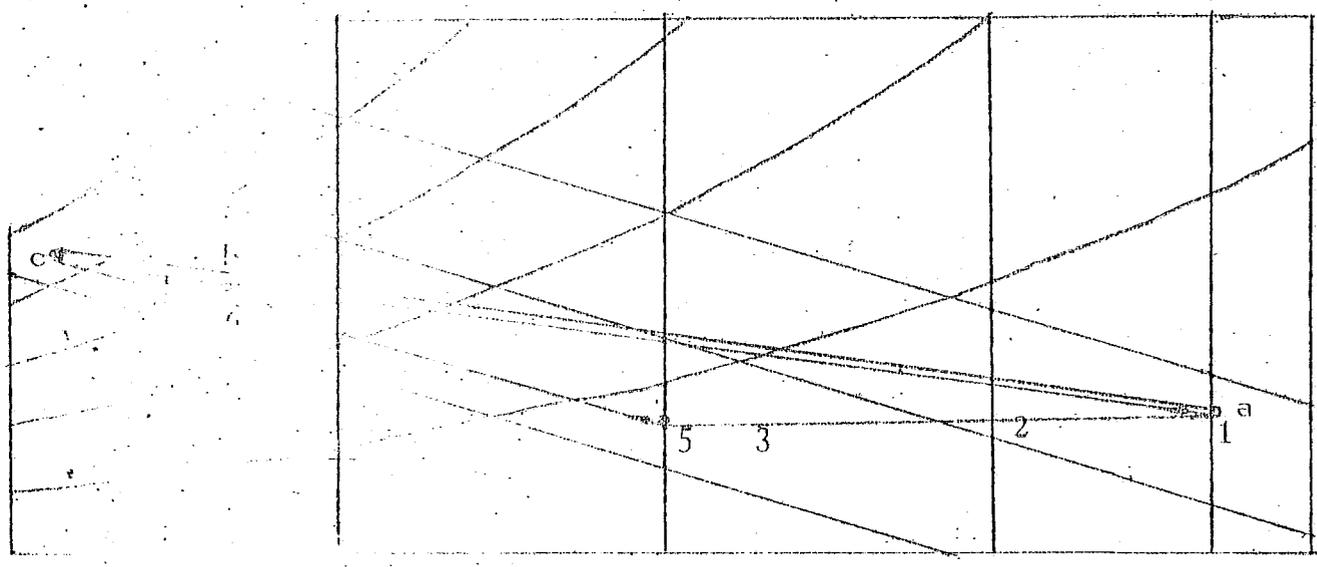
Hemos descrito someramente algunos de los sistemas pasivos de enfriamiento de la arquitectura tradicional Persa. Las torres de viento, domos, y vanos de ventilación pueden existir conjuntamente en una construcción aunque frecuentemente existen casas con tan sólo uno o dos de estos elementos. La mayor eficiencia de la termocirculación natural del aire se logra por supuesto con la integración de los tres elementos. También hemos visto casos en donde a las torres de viento se les incorporan superficies de enfriamiento evaporativo lográndose así un mayor enfriamiento.

Las torres de viento son un ejemplo claro y contundente de cómo pueden satisfacer los requerimientos de confort térmico en la construcción mediante el manejo apropiado y racional de los fenómenos de conducción, convección y radiación aprovechando los elementos naturales tales como la del viento, radiación solar, radiación terrestre (nocturna), y oscilación diaria de temperatura.

El uso de las torres de viento en las zonas áridas y semi-áridas de México (zonas donde hay mayor consumo de energía con el uso del aire acondicionado de edificios) sería por demás aconsejable, ya que equivale en sus resultados a un equipo mecánico de aire acondicionado con la ventaja de que el confort térmico



(a)



(b)

CONDICIONES TERMODINAMICAS APROXIMADAS DEL AIRE SOMETIDO AL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DENTRO DE LAS TORRES DE VIENTO MOSTRADAS EN LAS FIGURAS 6: (a) y 7: (b)

alcanzado por medios naturales permite al cuerpo humano sentirse bien dentro y fuera de la construcción (la transición interior-exterior no es tan drástica) porque se alcanza un equilibrio entre ambos medios ambientales. Además de las otras ventajas ya mencionadas como son el ahorro del consumo de energético convencional y la no contaminación ambiental.

Para ver la factibilidad de implantación de estas torres en nuestro país, es necesario hacer un estudio climatológico comparativo entre los lugares de Irán donde se vienen usando, y los lugares de México en los que en primera instancia podrían funcionar. Estos lugares se encuentran en los estados de Sonora, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Durango y Sinaloa por ser precisamente al igual que Yazd, Bam y Teherán; zonas áridas calientes.

Mediante un análisis preliminar las localidades escogidas para estudiarlas detalladamente son: Mexicali y La Paz en Baja California; Hermosillo, Bavispe y Fronteras en Sonora; Piedras Negras, Monclova y Torreón en Coahuila; Ciudad Juárez, Chihuahua, Delicias, Ojo Caliente y Nuevo Casas Grandes en Chihuahua; por último Durango, Dgo. Algunos de ellos tienen condiciones climatológicas más parecidas a las de Yazd, Bam y Teherán en Irán durante el verano, otros durante el invierno, y otros durante ambas estaciones. Es decir, a pesar de que todos son muy calientes en verano o muy fríos en invierno no todos llegan a ser tan extremos como en Irán en una u otra estación por lo que se separan en dos grupos: los que más se asemejan climatológicamente a Irán en verano y los que lo son en invierno. Para muestra objetivo principal de obtener enfriamiento durante los meses de calor basta con hacer el estudio climatológico comparativo para la temporada de calor que es cuando operan las torres, sin embargo analizaremos también la temporada de frío para obtener alguna conclusión adicional que pueda ser de importancia.

Recordemos que para el diseño óptimo de cualquier SPCS, es necesario seguir la metodología general descrita en el capítulo anterior y que es la siguiente:

- 1) análisis climatológico
- 2) evaluación bioclimática y determinación de necesidades de confort: radiación, sombra, efectos del viento, temperatura, humedad, etc.
- 3) Selección del SPCS (solución técnica) que satisfaga las necesidades de confort.
- 4) Estudio térmico del sistema escogido como solución técnica
- 5) Experimentación

Si por medio del análisis apropiado de los elementos que modelan el clima y de sus efectos bioclimáticos llegamos a la conclusión de que ambos grupos de lugares de Irán y México tienen el mismo tipo de necesidades para alcanzar confort térmico-

en la construcción, una de las soluciones técnicas a esas necesidades será el uso de las torres de viento cuya eficiencia para producir confort térmico ha sido ampliamente comprobada en Irán.

Procederemos por lo tanto a seguir la metodología anterior empezando con el análisis del primer punto:

### 1) ANALISIS CLIMATOLOGICO.

Las tablas 1 y 2 muestran los valores medios de los elementos climatológicos más importantes para los meses de enero y julio que son los más representativos en cuanto a su rigurosidad, extremosidad de frío y calor respectivamente.

Resumiremos los valores en rangos para hacer una primera comparación global:

Parámetros climatológicos	Rangos de los valores medios (enero)	
	Lugares de Irán	Lugares de México
Temperatura media ambiente (bulbo seco)	3.4 - 10.6	6.1 - 11.8
Temperatura promedio de mínimas	-1.4 - 4.3	-3.4 - 5.2
Oscilación de temperaturas	9.7 - 13.3	13.1 - 21.8
Temperatura promedio de máximas	8.3 - 17.0	13.8 - 19.0
Humedad Relativa (%)	45 - 64	25 - 56
Insolación (horas)	153 - 210	162 - 282
Radiación global media diaria (cal/cm <sup>2</sup> )	244 - 300	250 - 400
Grados día-mes	229 - 453	192 - 369

VALORES MEDIOS (1941-1970) DE LOS PARAMETROS CLIMATOLOGICOS DE TEMPERATURA, HUMEDAD, E INSOLACION PARA EL MES DE ENERO

ALBO SE (AM - ENTE)	TEMPERATURAS (°C)		HUMEDAD	INSOLACION		
	PROMEDIO DE MINIMAS	OSCILA CION	% DE HU- MEDAD RE LATIVA	DURACION DE LA IN SOLACION EN HORAS	RADIACION- GLOBAL (ME DIA DIARIA) EN CAL/CM <sup>2</sup> DIA	GRADOS - DIA-MES (°C) BASE 18°C
10.6	4.3	12.7	64	210	300-350	247
6.1	-0.5	13.3	45	153	264	401
3.4	-1.4	9.7	53	179	244	493
6.1	-1.6	15.4	55	263	250-300	369
9.8	2.1	15.8	33	282	373	254
10.3	0.7	17.4	35	262	360	267
10.0	-1.1	19.7	30	261	350-400	288
8.8	0.5	15.6	25	261	300-350	301
8.4	-3.4	21.8	30	258	250-300	326
10.7	2.5	16.5	30	258	300-350	226
11.1	4.9	13.1	56	162	250-300	214
11.7	5.2	13.3	43	228	343	195
11.8	4.7	14.2	30	282	399	192

MEDIOS (1941-1970) DE LOS PARAMETROS CLIMATOLOGICOS DE TEMPERATURAS (°C) HUMEDAD INSOLACION Y VIENTO PARA EL MES DE JULIO

TEMPERATURAS (°C)		HUMEDAD	INSOLACION		VIENTO		
PROMEDIO DE MAXIMAS	OSCILACION	% DE HUMEDAD RELATIVA	DURACION DE LA INSOLACION EN HORAS	RADIACION GLOBAL (MEDIA DIARIA) EN CAL/CM <sup>2</sup> DIA	INTENSIDAD m/Seg.	DIRECCION	% DE CALMAS
38.5	12.5	33-42	333	650			
39.5	15.6	25-34	368	701			
36.4	13.7	38	351	633			
41.8	17.3	45	269	633			
37.7	13.1	54	204	650-700	5.9		5
38.9	13.9	36	353	652	3.0		50
35.5	12.2	57	307	637	3.0		15
37.3	14.9	35	357	600-650			
36.1	18.1	35	357	600-650			
36.4	13.5	37	204	650-700			
37.8	20.8	46	316	600-650			
27.5	15.9	35	279	583	5.9		17

Parámetros climatológicos	Rangos de los valores medios (julio)	
	Lugares de Irán	Lugares de México
Temperatura media ambiente	29.5 - 32.2	27.5 - 33.1
Temperatura promedio de máximas	36.4 - 39.5	35.5 - 41.8
Oscilación de Temperatura	12.5 - 15.6	12.2 - 20.8
Temperatura promedio de mínimas	22.7 - 26.0	15.8 - 25.0
Humedad relativa	25 - 38	35 - 57
Insolación	333 - 368	204 - 357
Radiación Global	633 - 701	583 - 700
Intensidad del viento dominante		

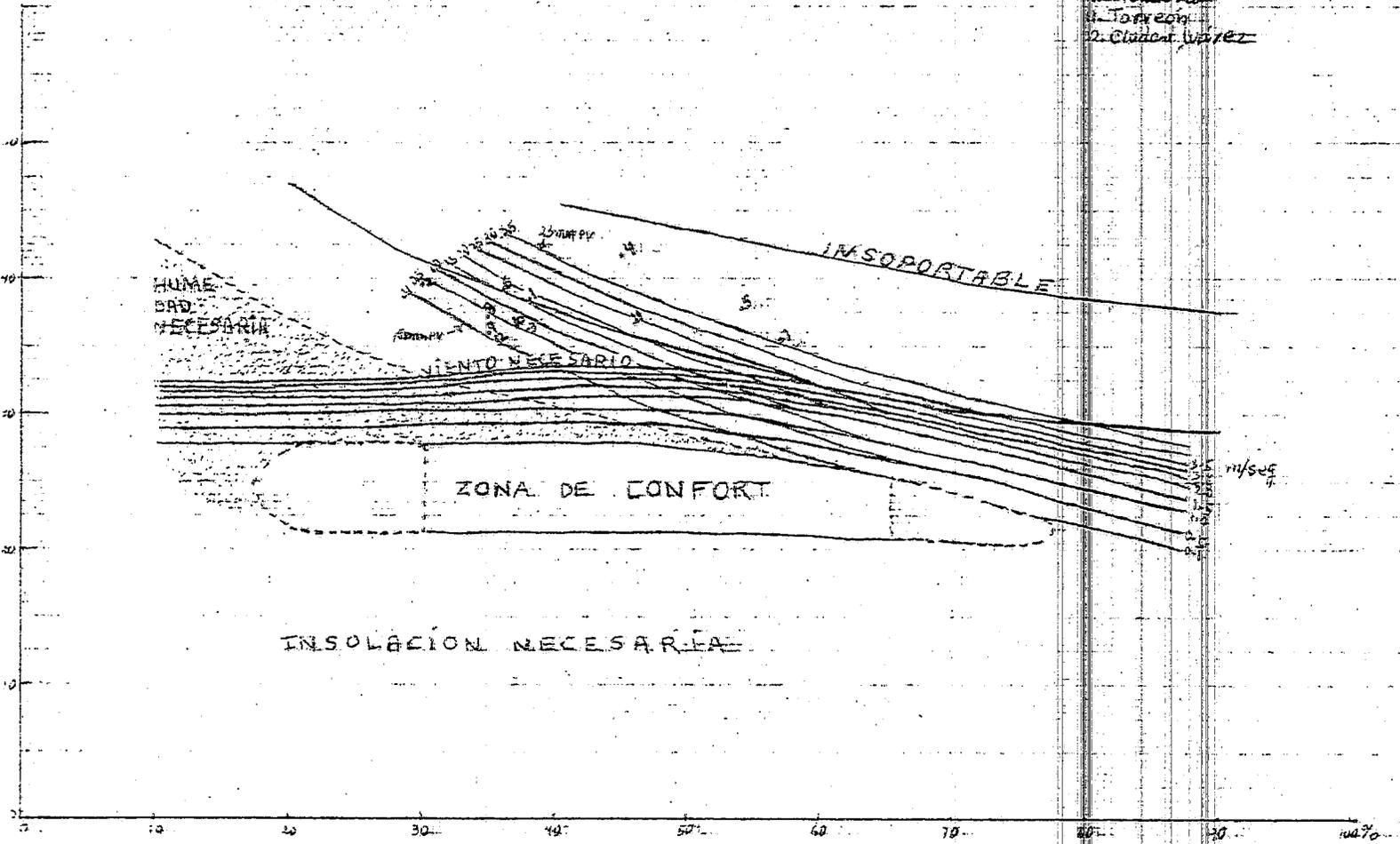
Para enero los lugares de Irán necesitan un poco más de calefacción que los de México según los niveles de requerimientos de calefacción se vé con los valores de tabulados en días, grados, mes). Con esto podemos afirmar que con el tipo de construcción Iraní (paredes gruesas de alta capacidad calorífica) podríamos solucionar el problema de calefacción durante el invierno, aún más, puesto que tenemos mejores condiciones durante el invierno, aún más, puesto que tenemos mejores condiciones de insolación tanto en duración como en intensidad.

Por lo que respecta al verano nuestras zonas áridas aunque son igual de calientes que las de Irán presentan una mayor oscilación de temperaturas refrescándose un poco en la noche. Esto resulta muy favorable para mejorar la eficiencia de enfriamiento de la torre.

## 2) EVALUACION BIOCLIMATICA

En la figura 8 se muestra el trazo de datos de temperatura y humedad relativa sobre la carta bioclimática obteniéndose así las características generales de las regiones estudiadas durante la temporada de calor (representada por el mes de julio). Los datos de temperatura graficados son las condiciones medias-máximas (tabla 2) ya que son las más representativas para nues-

TEMPERATURA AMBIENTE °C



HUMEDAD RELATIVA

### DIAERAMA BIOCLIMATICO

Figura 8

- 1. Bam
- 2. Yata
- 3. Tehuacan
- 4. Mexico D.F.
- 5. Piedra S. Neza S.
- 6. Hermosillo
- 7. La Paz
- 8. Bavispe
- 9. Fronteras
- 10. Mandoval
- 11. Torreon
- 12. Ciudad Juarez

m/seg

tro propósito de conseguir enfriamiento por medio de ventilación.

Todos los lugares presentan condiciones higrotérmicas muy por encima de las mostradas en la zona de confort debido a que las temperaturas máximas y aún las medias son muy altas como es de esperarse en un tipo de clima desértico. Además contienen un nivel higroscópico por encima de los 15 mm de presión de vapor de agua lo que provoca una sensación de depresión y bochorno al sobrepasar la presión de vapor el valor de 20 milibarios la sensación de incomodidad ya es asentuada. Sin embargo, sería posible alcanzar el nivel de confort requerido mediante los efectos del viento para la mayoría de los lugares. Cada mm de aumento de presión de vapor contenido en el aire es neutralizable aumentando la velocidad del viento en 0.41 m/seg. como se aprecia en el diagrama bioclimático.

Yazd, Teherán, Bauspe, Fronteras, Monclova y Cd. Juárez se encuentran por abajo de la línea límite de actividades simples y pueden alcanzar el nivel de confort con velocidades del viento del orden de 0.1 a 0.5 m/seg. que provoca generalmente un aumento de la evaporación del cuerpo y una sensación de enfriamiento. Bam, Hermosillo y Torreón se encuentran por arriba de dicha línea (Hermosillo está justo en el límite) y pueden alcanzar el nivel de confort con viento a velocidades del orden de 1.0 a 2.5 m/seg. pero el efecto probable de estas velocidades vá desde soportable a molesta o a no soportable. Mexicali, Piedras Negras y La Paz están en una situación menos ventajosa, sobre todo Mexicali ya que las velocidades de viento requeridas para alcanzar el nivel de confort son demasiado altas (arriba de 3.5 m/seg). A temperaturas y humedades muy altas el efecto del viento es contraproducente pues se aumenta la sensación de malestar especialmente cuando se alcanzan temperaturas máximas extremas arriba de 40°C lo que es muy común en las zonas áridas y semiáridas durante la temporada de calor.

### 3) SELECCION DEL SPCS (SOLUCION TECNICA) QUE SATISFAGA LAS NECESIDADES DE CONFORT FISIOLOGICO EN LA CONSTRUCCION.

Al ver los valores de la velocidad del viento (tabla 2) para los lugares estudiados vemos que los predominantes andan por el rango de 3-6 m/seg. No obstante, no se tiene la certeza de que estos vientos se presenten durante las horas de calor más intenso que por lo regular son los de más calma.

Por este motivo habrá que buscar la forma de mover aire por otro medio, como por ejemplo a través de las torres de viento, que además de captar los vientos cuando los hay opera aún en ausencia de ellos de la forma que ya habíamos explicado.

Dado que ambos grupos de lugares (de Irán y México) tienen el mismo tipo de necesidades climatológicas para alcanzar confort térmico en la construcción, llegamos a la conclusión de que en las zonas áridas y semiáridas de México estudiadas, si es factible la implantación de las torres de viento, usadas con bastante éxito en Irán desde hace muchos años. Estas circularán el aire que se acondiciona en su interior a través de la construcción a una temperatura más baja que la del medio ambiente exterior (flujo descendente). La temperatura menor del aire y la cantidad de este en circulación (que dependerá del número de renovaciones requeridas) producirán la sensación de confort fisiológico deseado. Es lógico que para los lugares estudiados más calientes se requerirán más renovaciones de aire y a la vez una reducción de la temperatura ambiente mayor. Para tal fin, en primera instancia podemos decir que en estos lugares las torres deberán ser más voluminosas, y/o deberán agregarse superficies de enfriamiento evaporativo, tal es el caso de Hermosillo y Torreón.

En Piedras Negras y La Paz lo recomendable serán las torres con gran capacidad de almacenamiento sensible teniéndose mucho cuidado de no usar superficies de enfriamiento evaporativo ya que son zonas un poco más húmedas. En Mexicali por sus condiciones más extremas (promedio de máximas:  $41.8^{\circ}\text{C}$  y 45% de HR) es el único lugar en el que el aire requiere un enfriamiento adicional de tipo evaporativo.

En el próximo capítulo nos daremos una idea de la cantidad de aire que pueden mover las torres de distintas dimensiones, en función de las ganancias y pérdidas de calor de las paredes de la torre y subjetivamente de la intensidad del viento captado.

ESTUDIO TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DEL AIRE  
DENTRO DE LA TORRE DE VIENTO  
(RÉGIMEN TÉRMICO IMPUESTO)

INTRODUCCIÓN

Para obtener resultados dentro de un captador de viento y los parámetros de flujo que actuarán dentro de éste, tales como la velocidad, flujo térmico solar recibido y temperatura ambiente usaremos las ecuaciones de Navier-Stokes (forma diferencial de la segunda ley de Newton del movimiento) que describen el comportamiento del flujo con las siguientes consideraciones: flujo incompresible, laminar y viscosidad constante; después de la zona de "longitud de entrada" (zona de desarrollo de capas límite dinámicas y térmicas), es decir dentro de la zona de régimen estable. El problema del establecimiento de este régimen no será abordado dentro del contexto de este estudio.

La geometría dada a la torre, para facilitar el análisis, será la de un conducto vertical, paralelepípedo y plano. Las ecuaciones estarán dadas en coordenadas cartesianas.

La resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes estará sujeta a hipótesis. Por lo tanto los resultados obtenidos representarán una muestra de casos posibles.

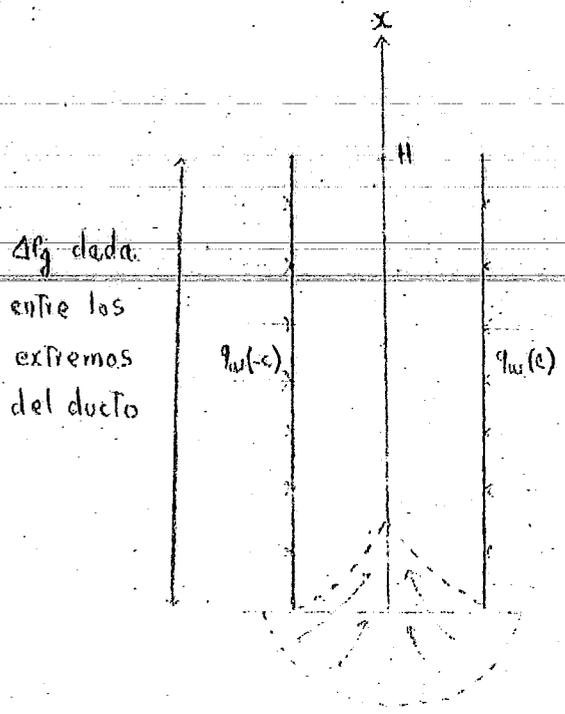
I. ESTRUCTURA GENERAL DEL FLUJO

Como ya lo hemos mencionado, el flujo de aire dentro de la torre de viento puede ser descendente o ascendente, dependiendo de las condiciones meteorológicas predominantes, y puede variar en el transcurso del día y de la noche. No obstante consideraremos para el análisis, régimen estacionario, carga térmica solar distribuida uniformemente a lo largo de la torre (eje x) y otras restricciones que veremos más adelante. La estructura general del flujo es la siguiente:

I.a) FLUJO DESCENDENTE (figura I.a)

-Antes de entrar al conducto, el fluido es perfecto dentro de un medio semiinfinito, a la temperatura  $T_H$ , a presión constante  $P_g(H)$ .

-Es inducido dentro del conducto a causa de una diferencial de presión motriz  $+\Delta P_g$ . Dentro de una primera etapa se desarro-



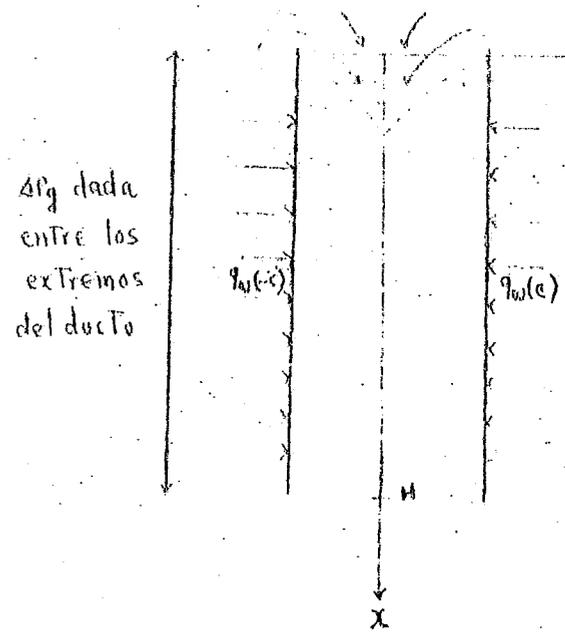
Flujo turbulento dentro de un medio semi-infinito a  $P_g = cte.$

Régimen estable

longitud de entrada y establecimiento de las capas límites.

flujo perfecto dentro de un medio semi-infinito

FIGURA 1.b; FLUJO ASCENDENTE



flujo perfecto dentro de un medio semi-infinito

longitud de entrada y establecimiento de las capas límites.

Régimen estable

Flujo turbulento dentro de un medio semi-infinito a  $P_g = cte.$

FIGURA 1.a; FLUJO DESCENDENTE

llan las capas límites dinámicas y térmicas (longitud de entrada) que al reencontrarse después, las distribuciones de velocidad y de temperatura se estabilizan pasando entonces a la segunda etapa del flujo, la etapa del régimen estable.

-En esta segunda etapa, los perfiles de velocidad y de temperatura pueden ser calculados si el flujo es laminar.

-A la salida del conducto el aire se mueve de manera laminar en otro medio semi-infinito (casa) a  $P_g(0)$  constante y a  $T_0$ .

### 1.b) Flujo ascendente o Acción Chimenea de la Torre (figura 1.b)

-Antes de entrar al conducto, el fluido es perfecto dentro de un medio semi-infinito, a la temperatura,  $T_0$ , a presión constante  $P_g(0)$ .

-Es aspirado dentro del conducto a causa de la diferencial de presión motriz  $-\Delta P_g$ . Pasa entonces por las etapas antes descritas: "longitud de entrada" y, después, régimen estable.

-A la salida del conducto, el aire se mueve de manera turbulenta en un otro medio semi-infinito a  $P_g(H)$  constante y  $T_e$ . La temperatura del medio exterior es ligeramente superior a la temperatura del aire en la sección de salida del conducto ( $T_e \approx T_H$ ), por lo que se puede establecer la hipótesis de que la presión de salida es constante ( $P_g(H) = cte$ ).

## II HIPOTESIS Y ECUACIONES GENERALES.

Dentro de un modelo simplificado, la torre se considera como un conducto vertical paralelepípedo y "plano" (figura II). "Plano" por que el eje  $O_z$  es infinitamente más largo que el eje  $O_y$ ; el problema es independiente de  $Z$  y las ecuaciones pueden ser escritas en función de  $x$  y  $y$  solamente. La resolución de las ecuaciones se hará con las siguientes hipótesis de trabajo.

### II.a) Hipótesis de trabajo

-La densidad del aire,  $\rho$ , es función únicamente de la temperatura, y varía linealmente con ella:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta (T - T_0))$$

-Las otras propiedades físicas son constantes, y las aproximaciones de Boussinesq se utilizan ( $\rho$  no varía más que con el término en  $\hat{p}_g$  y  $P = cte$ , sobre  $Oy$ )

-El flujo es estacionario, y sólo la longitud del conducto

correspondiente a régimen estable es estudiado.

-El conducto está limitado por los planos  $x = 0$  y  $x = H$  como lo indica la figura II.

~~Las~~ Las paredes son calentadas (o enfriadas) con una densidad de flujo  $q_w$  independiente de  $x$ ,  $q_w = q_w(y)$ , o sea que la densidad de flujo  $q_w$  está repartida uniformemente sobre las dos paredes paralelas a  $Ozx$  dentro del caso teórico que es tratado aquí.

$q_w(-c) = q_1$  representa las pérdidas térmicas y  $q_w(+c) = q_2$  representa el flujo solar captado.

-Una diferencial de presión motriz dada,  $\Delta P_g$ , se establece entre la entrada y la salida de este conducto, que se supone destapado dentro de un medio semi-infinito en reposo (condiciones exteriores a la torre: velocidad del viento, y diferencia de temperatura  $T_o - T_H$  entre los dos medios; que fijan los valores de  $P_g$ ). Cuando esta diferencia de presión es nula el flujo provocado es por el calentamiento de las paredes (fenómeno de convección natural) y únicamente por su calor.

-Las ecuaciones se escriben con la aproximación de capa límite, justificado por el hecho de que el número de Grashof es superior a 1.

-El flujo se supone laminar.

## II.b) Ecuaciones Generales

Las ecuaciones de Navier-Stokes; dentro de la capa límite, del caso plano, y admitiendo que la dirección principal del flujo es el eje  $Ox$ ; incluyen:

la ecuación de continuidad para flujo incompresible

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

la ecuación de movimiento en la dirección  $x$ :

$$\rho_o \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho_o \beta g (T - T_o) + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

y la ecuación de energía

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

en la cual:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

por lo que la ecuación de energía se reduce a

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

Tenemos así las tres ecuaciones que resolveremos para obtener los perfiles de velocidad y de temperatura del aire dentro de la placa plana.

Dentro del cuadro de la aproximación de la capa límite anterior, y antes de resolver las ecuaciones de flujo, es interesante utilizar la noción de temperatura de mezclado.

### 11.b.1) Temperatura de mezclado $T_m(x)$

Antes de resolver las ecuaciones de flujo vamos a introducir el término de temperatura de mezclado  $T_m$ . Esta definición permite descomponer la temperatura  $T$  en dos funciones. Una dependiente de  $x$ ,  $T_m(x)$ , y la otra dependiente solo de  $y$ ,  $\theta(y)$ .

Esta descomposición permite:

- resolver las ecuaciones de flujo
- separar el término de temperatura dependiente de la abscisa  $x$  en la placa, de aquél que dá el "perfil" de temperatura a una abscisa dada, la ordenada  $y$ , en este caso.

Por definición y en el cuadro de aproximación de la capa límite:

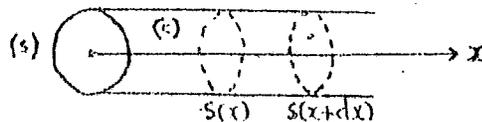
$$1. \dots \dots T_m(x) \cdot q_m = \int_{s(x)} \rho \cdot U \cdot T ds ;$$

$U$  = velocidad de flujo sobre  $0x$

$q_m$  = consumo másico del aire

$$1' \dots \dots q_m = \int_s \rho U ds ;$$

El segundo término de la ecuación (1) es un consumo térmico integrado sobre la sección  $s(x)$  de la placa. La temperatura media es la que toma el fluido comprendido entre  $s(x)$  y  $s(x+dx)$  como si fuera homogénea dentro de un recipiente. El consumo térmico correspondiente es  $q_m \cdot T_m$  de la ecuación (1).



Sea  $\phi_w$ , el flujo térmico por unidad de longitud del espesor, hacia el fluido, por la pared

$$\phi_w = \int_{(c)} q_w dc ;$$

$q_w$  = densidad del flujo térmico

La conservación del consumo térmico dentro del conducto es

$$\phi_w = \left( \int_{(c)} q dc - \frac{d}{dx} \right)_{(s)} \rho C_p U T ds = C_p \left[ \begin{array}{l} \text{consumo térmico} \\ \text{en } x + dx \\ - \text{consumo térmico} \\ \text{en } x \end{array} \right]$$

$$2. \dots \phi_w = \frac{d}{dx} \int_{(s)} \rho C_p U T ds ;$$

sustituyendo 1 en 2 se obtiene

$$\phi_w = \frac{d}{dx} \int_{(s)} \rho C_p U T ds = \frac{d}{dx} \int_{(s)} C_p \rho U T ds = \frac{d}{dx} \left[ C_p q_m T_m(x) \right] = C_p q_m \frac{dT_m}{dx}$$

como el flujo recibido por la pared es constante:

$$3. \dots \boxed{\frac{dT_m}{dx} = A = \frac{\phi_w}{C_p q_m} = \text{cte.}}$$

la temperatura media es una función lineal de la abscisa  $x$  dentro del conducto:  $\boxed{T_m(x) = A x + T_0}$  .. 4

### 11.b.2) Ecuaciones del flujo estable, dentro del caso plano.

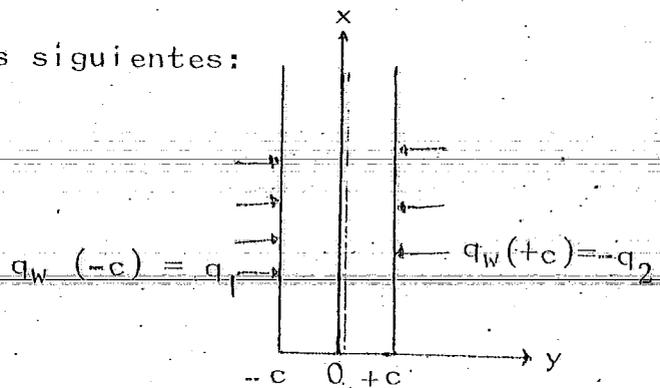
Las ecuaciones de movimiento, de energía, y de continuidad, son:

$$(11.1) \left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{d P_g}{dx} + \rho_0 \beta g (T - T_0) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots (a) \\ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \dots (b) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots (c) \end{array} \right.$$

$$\text{con } P_g = P + \rho_0 g x, \quad y, \quad (\rho - \rho_0) g = \beta g \rho_0 (T - T_0)$$

Las condiciones frontera son las siguientes:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{en } y = \pm c, \quad u = v = 0 \\ q_w(-c) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{-c} = q_1 \\ q_w(+c) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{+c} = -q_2 \\ P_g(0) - P_g(H) = \Delta P_g \end{array} \right]$$



Las variables que intervienen son:  $H, \rho, u, C_p, \lambda, \beta, g, \Delta T, h$ .

- $H$  = altura de la placa
- $\rho$  = densidad del aire
- $u$  = viscosidad dinámica del aire
- $C_p$  = capacidad calorífica del aire a presión constante
- $\lambda$  = conductividad térmica del aire
- $\beta$  = coeficiente de expansión térmica del aire
- $g$  = aceleración de la gravedad
- $\Delta T$  = diferencia de temperatura
- $h$  = coeficiente de transparencia de calor por convección

El teorema de Buckingham Pi indica que el número de parámetros dimensionales independientes aplicables a este problema es  $9-5 = 4$ . Escogiendo  $c, u, \lambda, g$ , y  $\beta$  como el grupo fundamental, veremos que los grupos se forman como:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= c^a u^b \lambda^c \beta^d g^e C_p \\ \pi_2 &= c^f u^g \lambda^h \beta^i g^j \rho \\ \pi_3 &= c^k u^l \lambda^m \beta^n g^o \Delta T \\ \pi_4 &= c^p u^q \lambda^r \beta^s g^t h \end{aligned}$$

resolviendo para los exponentes se obtiene:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{u C_p}{\lambda} = P_R & \pi_3 &= \beta \Delta T \\ \pi_2 &= \frac{c^3 g \rho^2}{u^2} & \pi_4 &= \frac{hc}{\lambda} = N_u \end{aligned}$$

El producto de  $\pi_2$  y  $\pi_3$  es  $(\beta g \rho^2 c^3 \Delta T) / u^2$

Este parámetro, usado en correlaciones de convección natural,

es el número de Grashof

$$G_R = \frac{\beta g \rho^2 c^3 \Delta T}{u^2}$$

así tenemos, que para convección natural

$$Nu = f(G_R, P_R)$$

a diferencia de la convección forzada, en la cual

$$Nu = f_1(Re, P_R)$$

Recordando que el número de Nusselt es la relación entre la resistencia térmica conductiva y la resistencia térmica convectiva:

$$\text{No. de Nusselt} = \frac{\text{resistencia térmica conductiva } hc}{\text{resistencia térmica convectiva } \lambda}$$

Entonces, los parámetros que intervienen en convección natural son:  $G_R$ ,  $P_R$  y  $N_u$

El número de Nusselt podemos definirlo también en función del flujo térmico que se recibe en las paredes de la torre como:

$$N_u(c) = \frac{q_c}{\lambda \Delta T}$$

Así, tenemos que son tres los parámetros adimensionales de flujo que intervienen en el comportamiento del aire de la torre:  $N_u$ ,  $P_R$  y  $G_R$ .

Para comprender de qué manera van a intervenir estos parámetros, vamos a adimensionalizar el grupo de ecuaciones en 11.1

Las variables adimensionales se indican con un índice + y se escriben:

$$x_+ = \frac{x}{c}, \quad y_+ = \frac{y}{c}, \quad U_+ = \frac{U}{u}, \quad V_+ = \frac{V}{u}$$
$$P_g = \frac{\beta g_+}{\rho \left(\frac{u}{c}\right)^2}, \quad T_+ = \frac{(T-T_0) \lambda}{c (q_1 + q_2)}$$

$c$  = unidad de longitud de espesor del conducto (radio de la torre)

$q$  = densidad de flujo térmico

$\frac{u}{c}$  = velocidad de referencia

$\rho \left(\frac{\nu}{c}\right)^2 =$  presión de referencia

H = altura del conducto

Sustituyendo las variables adimensionales de las ecuaciones (II.1) y considerando nula la variación de la velocidad y de la temperatura con respecto al eje y, tal que,  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$  y  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ;

la adimensionalización de las ecuaciones se efectúa como sigue:

$$II.1.a) \quad \rho_0 \left( u \frac{du}{dx} \right) = - \frac{dPg}{dx} + \rho_0 \beta g (T - T_0) + u \frac{d^2u}{dy^2}$$

$$\rho_0 \left( \frac{\nu}{c} u_+ + \frac{\nu}{c} \frac{du_+}{c dx_+} \right) = - \rho \left( \frac{\nu^2}{c^2} \right) \frac{dPg_+}{c dx_+} + \rho_0 \beta g c \left( \frac{q_1 + q_2}{\lambda} \right) T_+ + \rho \nu \frac{\nu}{c} \frac{d^2 u_+}{c^2 dy_+^2}$$

$$u_+ \frac{du_+}{dx_+} = - \frac{dPg_+}{dx_+} + \frac{d^2u_+}{dy_+^2} + \frac{\beta g c^4 (q_1 + q_2)}{\lambda \nu^2} T_+$$

$$G_R = \frac{\beta g c^4 (q_1 + q_2)}{\lambda \nu^2}; \text{ número de Grashof}$$

$$u_+ \frac{du_+}{dx_+} = - \frac{dPg_+}{dx_+} + G_R T_+ + \frac{d^2u_+}{dy_+^2}$$

II.1.b)

$$u \frac{dT}{dx} = a \frac{d^2T}{dy^2}$$

$$\frac{\nu}{c} u_+ (q_1 + q_2) \frac{c}{\lambda} \frac{dT_+}{c dx_+} = \frac{\lambda}{\rho C_p} (q_1 + q_2) \frac{c}{\lambda} \frac{d^2T_+}{c^2 dy_+^2}$$

$$u_+ \frac{dT_+}{dx_+} = \frac{c \lambda}{c u C_p} \frac{d^2T_+}{dy_+^2}$$

$$P_R = u \frac{C_p}{\lambda} \text{ Número de Prandtl;}$$

$$u_+ \frac{dT_+}{dx_+} = \frac{1}{P_R} \frac{d^2T_+}{dy_+^2}$$

Las ecuaciones de flujo adimensionales correspondientes, son:

$$(11.2) \quad \begin{cases} u_+ \frac{d u_+}{d x_+} = - \frac{d P_{g_+}}{d x_+} + G_R T_+ + \frac{d^2 u_+}{d y_+^2} \\ u_+ \frac{d T_+}{d x_+} = \frac{1}{P_R} \frac{d^2 T_+}{d y_+^2} \end{cases} \text{ con } \begin{cases} G_R = \frac{\beta g c^4 (q_1 q_2)}{\lambda \nu^2}; \text{ No. de Grashof} \\ P_R = \frac{u c \rho}{\lambda}; \text{ No. de Prandtl} \end{cases}$$

y las condiciones frontera asociadas son:

$$\begin{cases} \left( \frac{d T_+}{d y_+} \right)_{-1} = \frac{q_2}{q_1 + q_2}, & \left( \frac{d T_+}{d y_+} \right)_{-1} = \frac{-q_1}{q_1 + q_2} \\ u_+ (\pm 1) = 0 \\ P_{g_+} (0) - P_{g_+} (H) = \frac{\Delta P g}{\rho} \left( \frac{c}{\nu} \right)^2 \end{cases}$$

Las condiciones frontera se obtienen de la siguiente manera:

$$q_1 = -\lambda \left( \frac{dT_+}{dy} \right)_{-c} = -\lambda \frac{(q_1 + q_2)c}{\lambda} \cdot \frac{1}{c} \left( \frac{dT_+}{dy} \right)_{-c} \Rightarrow -\frac{q_1}{q_1 + q_2} = \left( \frac{dT_+}{dy} \right)_{-c}$$

$$-q_2 = -\lambda \left( \frac{dT_+}{dy} \right)_{+c} = -\lambda \frac{(q_1 + q_2)c}{\lambda} \cdot \frac{1}{c} \left( \frac{dT_+}{dy} \right)_{+c} \Rightarrow \frac{q_2}{q_1 + q_2} = \left( \frac{dT_+}{dy} \right)_{+c}$$

$$u = 0 \Rightarrow u_+ = \frac{u c}{\nu} = (0) \frac{c}{\nu} = 0$$

Cuatro parámetros de flujo adimensionales se han obtenido como consecuencia de la adimensionalización:

$P_R$  = el número de Prandtl

$G_R$  = el número de Grashof

$\frac{q_2}{q_1}$  = la repartición de la densidad de flujo térmico

y  $\frac{\Delta P g}{\rho} \left( \frac{c}{\nu} \right)^2$  = la diferencia de presión motriz reducida

Los dos primeros fueron obtenidos también previamente por medio de un análisis dimensional aplicando el teorema de Buckingham, lo que corrobora que ambos (números de Grashof y de Prandtl) pueden ser usados en datos de correlación de convección natural.

### II.c) Estudio del flujo estable

Para determinar los perfiles de velocidad y de temperatura a una altura  $x$  cualquiera del conducto, régimen estable, hemos considerado que la velocidad de flujo es una componente,

$U$  paralela a  $Ox$ , y  $U$  es independiente de  $x$ :

$$U = U(y)$$

Por otra parte, la temperatura en un punto del fluido es de la forma

$$T = T_m(x) + \theta(y) \quad \text{con} \quad \begin{cases} T_m(x) = Ax + T_0 \\ A = \frac{dT_m}{dx} \end{cases}$$

Esto proviene de hacer que en régimen estable, el término  $\frac{dT}{dy}$  (que corresponde a la conducción lateral de  $q_w$ ) sea independiente de  $x$ .

La definición 1 implica una relación entre  $U(y)$  y  $\theta(y)$ :

$$1 \dots \dots T_m(x) \cdot q_m = \int_{s(x)} \rho \cdot U \cdot T ds$$

Con estos tres conceptos obtenemos una condición frontera suplementaria que permite determinar los perfiles de velocidad y de temperatura:

$$T_m(x) \int_{-c}^{+c} \rho U dy = \int_{-c}^{+c} \rho U(y) T(x,y) dy = \int_{-c}^{+c} \rho U(y) (T_m(x) + \theta(y)) dy$$

$$\int_{-c}^{+c} U(y) \theta(y) dy = 0$$

$$5 \dots \dots \int_{-c}^{+c} U(y) \theta(y) dy = 0$$

Esta es una condición frontera suplementaria debida a la introducción de  $\theta$ .

Introduciremos entonces  $\theta$  en el sistema (11.1)

$$a) \quad 0 = - \frac{dP_g}{dx} + \rho_o \beta g (T - T_o) + u \frac{d^2 U}{dy^2}; \quad T = T_m(x) + \theta(y)$$

$$0 = - \frac{dP_g}{dx} + \rho_o \beta g (T_m(x) - T_o) + \rho_o \beta g \theta(y) + u \frac{d^2 U}{dy^2}$$

$$b) \quad U \frac{dT}{dx} = a \frac{d^2 T}{dy^2}$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dT_m(x)}{dx}$$

$$\frac{dT}{dy} = \frac{d\theta(y)}{dy}; \quad \frac{d^2 T}{dy^2} = \frac{d^2 \theta(y)}{dy^2}$$

$$U(y) \cdot \frac{dT_m(x)}{dx} = a \frac{d^2 \theta(y)}{dy^2}$$

El sistema (11.1) queda entonces

$$11.3 \quad \begin{cases} 0 = - \frac{dP_g}{dx} + \rho_o \beta g (T_m(x) - T_o) + \rho_o \beta g \theta(y) + u \frac{d^2 U}{dy^2} \\ U(y) \cdot \frac{dT_m(x)}{dx} = a \frac{d^2 \theta}{dy^2} \end{cases}$$

La primera ecuación es de variables separables, y se puede escribir como:

$$\frac{dP_g}{dx} = \rho_o \beta g (T_m(x) - T_o) - B; \quad -B = \rho_o \beta g \theta(y) + u \frac{d^2 U}{dy^2}$$

$$T_m(x) = Ax + T_o$$

$$dP_g = \rho_o \beta g Ax dx - B dx$$

$$\int_{P_g(0)}^{P_g(x)} dP_g = \rho_o \beta g \int_0^x Ax dx - Bx + c$$

$ax = H$ , queda:

$$P_g(H) - P_g(0) = \rho_o \beta g \frac{AH^2}{2} - BH + c$$

$ax = 0$

$$P_g(0) - P_g(0) = 0 - 0 + c \Rightarrow c = 0$$

finalmente

$$P_g(H) - P_g(0) = \rho_o \beta g A \frac{H^2}{2} - BH$$

$$0 = B + \rho_o \beta g \theta(y) + u \frac{d^2 u}{dy^2} = B + \rho_o \beta g \theta(y) + u U''(y)$$

la segunda ecuación puede escribirse como:

$$U(y) = \frac{dT_m(x)}{dx} = a \frac{d^2 \theta}{dy^2}$$

de lo sabemos que

$$A = \frac{dT_m(x)}{dx}$$

$$U(y) = \frac{a}{A} \frac{d^2 \theta}{dy^2}$$

$$U(y) = \frac{a}{A} \theta''(y)$$

El sistema (11.3) puede ser escrito finalmente:

$$0 = B + \rho_o \beta g \theta(y) + u U''(y)$$

$$U(y) = \frac{a}{A} \theta''(y)$$

$$11.4 \quad \begin{cases} u \frac{a}{A} \theta''(y) + \rho_o \beta g \theta(y) + B = 0 \dots d) \\ U(y) = \frac{a}{A} \theta''(y) \dots f) \end{cases}$$

Para obtener los perfiles de velocidad y de temperatura, es suficiente resolver el sistema (11.4), que puede ser escrito con las variables adimensionales como:

$$d) \quad \frac{u}{A} \frac{d^4 \theta}{dy^4} + \rho_o \beta g \theta(y) + B = 0$$

$$\frac{u}{A} \frac{c}{\lambda} \frac{(q_1 + q_2)}{\lambda} \frac{d^4 \theta}{c^4 dy^4} + \rho_o \beta g \frac{(q_1 + q_2)}{\lambda} \theta_+(y_+) + B = 0$$

$$\theta_+^4 (y_+) + \frac{\rho_0 \beta g c^4}{u a} A \theta_+ (y_+) + \frac{B \lambda A c^3}{u a (q_1 + q_2)} = 0$$

f)  $u (y) = \frac{a}{A} \theta'' (y) = \frac{a}{A} \frac{d^2 \theta}{dy^2}$

$$\frac{a}{c} u_+ (y_+) = \frac{a}{A} \frac{c (q_1 + q_2)}{c^2} \frac{d^2 \theta_+}{dy_+^2}$$

$$u_+ (y_+) = \frac{a}{u} \frac{(q_1 + q_2)}{A} \theta_+'' (y_+)$$

11.5	$\theta_+^{(4)} (y_+) + \frac{\rho_0 \beta g c^4}{u a} A \theta_+ (y_+) + \frac{B \lambda A c^3}{u a (q_1 + q_2)} = 0 \dots g)$ $u_+ (y_+) = \frac{a}{u} \frac{(q_1 + q_2)}{\lambda A} \theta_+'' (y_+) \dots h)$	LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y DE TEMPERATURA SE OBTIENEN RESOLVIENDO LA ECUACION 11.5.g)
------	---	--

y las condiciones frontera asociadas son:

$$\theta_+' (c) = q_2 / (q_1 + q_2)$$

$$\theta_+' (-c) = -q_1 / (q_1 + q_2)$$

$$\theta_+'' (\pm c) = 0$$

$$P_g (H) - P_g (0) = A \rho_0 \beta g \frac{H^2}{2} - BH$$

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+ (y_+) \theta_+'' (y_+) dy_+ = 0$$

La última condición frontera se obtiene:

$$\int_{-c}^{+c} u (y) \theta (y) dy = 0$$

$$\int_{-c}^{+c} \frac{a}{A} \theta'' (y) \theta (y) dy = 0$$

$$\frac{ca}{A} \left[ \frac{c(q_1+q_2)}{\lambda} \right]^2 \int_{-1}^{+1} \theta_+''(y_+) \theta_+(y_+) dy_+ = 0 \Rightarrow \int_{-1}^{+1} \theta_+''(y_+) \theta_+''(y_+) dy_+ = 0$$

y de 11.3:

$$U(y) = \frac{a}{A} \frac{d^2 \theta}{dy^2} = \frac{a}{A} \theta''(y)$$

sustituyendo  $U(y)$  de (11.3) en (1'), obtenemos

$$q_m = \rho_0 \frac{a}{A} \int_{-c}^{+c} \theta''(y) dy ;$$

resolviendo la integral obtenemos la ecuación para  $q_m$

$$q_m = \rho_0 \frac{a}{A} \left[ \theta'(c) - \theta'(-c) \right] = \rho_0 \frac{a}{A} \left[ \frac{q_2}{q_1+q_2} - \frac{-q_1}{q_1+q_2} \right]$$

$$q_m = \rho_0 \frac{a}{A} \frac{q_1+q_2}{\lambda}$$

En efecto, el consumo másico no puede ser calculado directamente a partir del flujo térmico, y ésto es el meollo del problema, pues el gradiente de temperatura  $A$  ( $A \equiv \frac{dT_m(x)}{dx}$ ) que interviene dentro de la expresión de  $q_m$  es un conocimiento a-priori.

El conocimiento de las ecuaciones que dan los perfiles de velocidad y de temperatura que satisfagan las condiciones frontera correspondientes, nos permite calcular el consumo teórico del conducto, en función del flujo térmico recibido por las paredes y los parámetros de presión.

El siguiente paso de este estudio será entonces, la resolución analítica de la ecuación 11.5.g); que nos permitirá conocer el perfil de temperatura así como el perfil de velocidad, e implícitamente el consumo másico del aire a través de la torre.

### III. RESOLUCION ANALITICA PARA EL "EFECTO CHIMENEA"

El efecto chimenea o flujo ascendente del aire, se produce cuando

$$\frac{dT_m}{dx} = A > 0; \text{ y } \Delta P_g < 0$$

El aire se calienta al recibir la carga térmica ( $q$ ) suministrada por la pared de la torre (previamente calentada por la radiación solar). Este aire caliente es menos denso, por lo tanto, la presión disminuye; del tal manera que  $P_g(0) > P_g(H)$  ( $\Delta P_g < 0$ ) creando un efecto tiro (hacia arriba). El aire en la construcción es succionado por la torre, y el aire exterior es introducido dentro de la construcción a través de puertas y ventanas.

El perfil de temperaturas a lo largo del eje y se obtiene resolviendo la ecuación (11.5g).

#### III.a) Solución del perfil de temperatura

La "temperatura" adimensional  $\theta_+$  es solución de la ecuación diferencial

$$11.5.g \quad \theta_+^4(y_+) + \frac{\rho_0 \beta g c^4}{u_a} A \theta_+(y_+) + \frac{B \lambda A c^3}{u_a(q_1+q_2)} = 0$$

$r$ , es la raíz de la ecuación característica, y verifica:

$$r^4 + \frac{\rho_0 \beta g A c^4}{u_a} = 0$$

la solución general de esta ecuación diferencial es una suma de la solución constante

$$\frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1+q_2)}$$

y las soluciones

$$A_1 e^{r_1 y}, B_1 e^{r_2 y}, C_1 e^{r_3 y} \text{ y } D_1 e^{r_4 y}$$

donde

$$r_i = (\pm 1 \pm i) \frac{r}{\sqrt{2}} = (\pm 1 \pm i) t$$

siendo

$$r = \left( \frac{\rho_0 \beta g A c^4}{u_a} \right)^{1/4}$$

$$y \quad t = \frac{r}{\sqrt{2}}$$

La solución general es de la forma:

$$\theta_+(y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho_0 \rho_g c (q_1 + q_2)} + A_1 \operatorname{ch}(ty_+) \cos(ty_+) + B_1 \operatorname{ch}(ty_+) \operatorname{sen}(ty_+) + C_1 \operatorname{sh}(ty_+) \cos(ty_+) + D_1 \operatorname{sh}(ty_+) \operatorname{sen}(ty_+)$$

donde  $A_1, B_1, C_1, D_1$  son constantes incógnitas

Para facilitar el manejo de las ecuaciones eliminaremos el índice + que indica una variable adimensional, tenemos entonces la ecuación

$$f(y) = \theta_+(y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho_0 \rho_g c (q_1 + q_2)} + A_1 \operatorname{ch}ty \cdot \operatorname{costy} + B_1 \operatorname{ch}ty \cdot \operatorname{senty} + C_1 \operatorname{sh}ty \cdot \operatorname{costy} + D_1 \operatorname{sh}ty \cdot \operatorname{senty}$$

y las condiciones a la frontera

$$\theta'_+(1) = \frac{+q_2}{q_1 + q_2}$$

$$\theta'_+(-1) = \frac{-q_1}{q_1 + q_2}$$

$$y \quad \theta''_+(\pm 1) = 0$$

procedamos ahora a evaluar las constantes  $A_1, B_1, C_1$  y  $D_1$

$$\theta'_+(y_+) = t \left[ A_1 (\operatorname{sh}ty \operatorname{costy} - \operatorname{ch}ty \operatorname{senty}) + B_1 (\operatorname{sh}ty \operatorname{senty} + \operatorname{ch}ty \operatorname{costy}) + C_1 (\operatorname{ch}ty \operatorname{costy} - \operatorname{sh}ty \operatorname{senty}) + D_1 (\operatorname{ch}ty \operatorname{senty} + \operatorname{sh}ty \operatorname{costy}) \right] \dots 1$$

$$\theta''_+(y_+) = 2t^2 \left[ -A_1 \operatorname{sh}ty \operatorname{senty} + B_1 \operatorname{sh}ty \operatorname{costy} - C_1 \operatorname{ch}ty \operatorname{senty} + D_1 \operatorname{ch}ty \operatorname{costy} \right] \dots 2$$

aplicando la condición frontera  $\theta''_+(\pm 1) = 0$ , tenemos:

$$\theta''_+(+1) = -A_1 \operatorname{sh}t \operatorname{senty} + B_1 \operatorname{sh}t \operatorname{costy} - C_1 \operatorname{ch}t \operatorname{senty} + D_1 \operatorname{ch}t \operatorname{costy} = 0$$

$$\theta''_+(-1) = -A_1 \operatorname{sh}t \operatorname{senty} - B_1 \operatorname{sh}t \operatorname{costy} + C_1 \operatorname{ch}t \operatorname{senty} + D_1 \operatorname{ch}t \operatorname{costy} = 0$$

$$\theta'_+ (+1) = t \left[ A_1 (\text{sht cost} - \text{cht sent}) + B_1 (\text{sht sent} + \text{cht cost}) + C_1 (\text{cht cost} - \text{sht sent}) + D_1 (\text{cht sent} + \text{sht cost}) \right] = \frac{q_2}{q_1 + q_2}$$

$$\theta'_+ (-1) = t \left[ A_1 (-\text{sht cost} + \text{cht sent}) + B_1 (\text{sht sent} + \text{cht cost}) + C_1 (\text{cht cost} - \text{sht sent}) + D_1 (-\text{cht sent} - \text{sht cost}) \right] = \frac{-q_1}{q_1 + q_2}$$

teniendo cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas:

$$(1) A_1 \text{sht sent} - D_1 \text{cht cost} = 0$$

$$(2) B_1 \text{sht cost} - C_1 \text{cht sent} = 0$$

$$(3) B_1 (\text{sht sent} + \text{cht cost}) + C_1 (\text{cht cost} - \text{sht sent}) = \left( \frac{1}{2t} \right) \left( \frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \right)$$

$$(4) A_1 (\text{sht cost} - \text{cht sent}) + D_1 (\text{cht sent} + \text{sht cost}) = \left( \frac{1}{2t} \right)$$

resolviendo este sistema obtenemos:

$$A_1 = \left( \frac{1}{2t} \right) \frac{\text{cht cost}}{\text{cht sht} - \text{cost sent}} ; B_1 = \left( \frac{1}{2t} \right) \left( \frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \right) \frac{\text{cht sent}}{\text{cost sent} + \text{cht sht}}$$

$$C_1 = \left( \frac{1}{2t} \right) \left( \frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \right) \frac{\text{sht cost}}{\text{cost sent} + \text{cht sht}} ; D_1 = \left( \frac{1}{2t} \right) \left( \frac{\text{sht sent}}{\text{chtsht} - \text{cost sent}} \right)$$

Sustituyendo estas constantes en las ecuaciones finales de  $\theta_+$  ( $y_+$ ) obtenemos finalmente:

$$\theta_+ (y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho \beta g c (q_1 + q_2)} + \left( \frac{1}{2t} \right) \left( \frac{\text{cht cost chty costy} + \text{sht sent shty senty}}{\text{cht sht} - \text{cost sent}} \right)$$

$$+ \left( \frac{1}{2t} \right) \left( \frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \right) \left( \frac{\text{cht sent chty senty} + \text{sht cost shty costy}}{\text{cost sent} + \text{cht sht}} \right)$$

$$\theta''_+ (y_+) = (t) \frac{\text{sht sent chty costy} - \text{cht cost shty senty}}{\text{cht sht} - \text{cost sent}}$$

$$+ (t) \left( \frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \right) \frac{\text{cht sent shty costy} + \text{sht cost chty senty}}{\text{cost sent} + \text{cht sht}}$$

resta evaluar

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+ \theta_+'' dy_+ = 0$$

Esta función no puede ser calculada tan fácilmente. Es necesario recurrir a la aproximación por polinomios. El polinomio, en lugar de la función original, puede usarse para cálculos cuando la diferencia entre los valores de la función y la aproximación polinomial es mínima. Esto se cumple para valores de  $(t)$  pequeños.

Examinaremos los casos extremos,  $t$  pequeño y  $t$  grande, dentro de los cuales uno puede hacer aproximaciones.

III.a.1) Solución exacta cuanto  $t$  es pequeña

La ecuación

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+ \theta_+'' dy_+ = 0$$

Podría resolverse aplicando la serie de Maclaurin (apéndice A). Primero haciendo la aproximación de la función  $\theta_+$ , y luego de la función  $\theta_+''$ , para después efectuar el producto e integrar entre los valores de  $y_+ = -1$  y  $y_+ = +1$ .

$$\theta_+(y_+) = \frac{-\lambda B}{\gamma \sigma \beta g c (q_1 + q_2)} + \left(\frac{1}{2t}\right) \left(\frac{\text{cht cost chty costy} + \text{sht sent shtysenty}}{\text{cht sht} - \text{cost sent}}\right) + \left(\frac{1}{2t}\right) \left(\frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2}\right) \left(\frac{\text{cht sent chty senty} + \text{sht cost shty costy}}{\text{cost sent} + \text{cht sht}}\right)$$

$$\text{cht cost chty costy} \approx \left(1 + \frac{t^2}{2!} + \frac{t^4}{4!} + \frac{t^6}{6!}\right) \left(1 - \frac{t^2}{2!} + \frac{t^4}{4!} - \frac{t^6}{6!}\right)$$

$$\left(1 + \frac{t^2 y^2}{2!} + \frac{t^4 y^4}{4!} - \frac{t^6 y^6}{6!}\right) \left(1 - \frac{t^2 y^2}{2!} + \frac{t^4 y^4}{4!} + \frac{t^6 y^6}{6!}\right)$$

$$1 - \frac{t^4(1+y^4)}{6}; \text{ ya que } \frac{t^6}{6!} \ll \ll 0$$

$$\text{sht sent shty senty} \approx \left(t + \frac{t^3}{3!}\right) \left(t - \frac{t^3}{6!}\right) \left(ty + \frac{t^3 y^3}{3!}\right) \left(ty - \frac{t^3 y^3}{6!}\right) = t^4 y^2;$$

$$\text{cht sht} \approx \left(1 + \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{4!} + \frac{t^6}{6!} + \frac{t^8}{8!}\right) \left(t + \frac{t^3}{3!} + \frac{t^5}{5!} + \frac{t^7}{7!}\right) = t + \frac{2}{3} t^3 + t^5$$

$$\left(\frac{1}{5 \cdot 24} + \frac{1}{12} + \frac{1}{24}\right) + t^7 \left(\frac{1}{7!} + \frac{1}{2 \cdot 5!} + \frac{1}{3!4!} + \frac{1}{6!}\right);$$

$$\text{cost sent} \approx \left(1 - \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{4!} - \frac{t^6}{6!} + \frac{t^8}{8!}\right) \left(t - \frac{t^3}{3!} + \frac{t^5}{5!} - \frac{t^7}{7!}\right) = t - \frac{2}{3} t^3 + t^5$$

$$\left(\frac{1}{5 \cdot 24} + \frac{1}{12} + \frac{1}{24}\right) - t^7 \left(\frac{1}{7!} + \frac{1}{2 \cdot 5!} + \frac{1}{3!4!} + \frac{1}{6!}\right);$$

$$(\text{cht cost chty costy} + \text{sht sent shty senty}) \approx 1 - \frac{t^4(1+y^4)}{6} + t^4 y^2$$

$$(\text{cht sht} - \text{cost sent}) \quad \frac{4}{3} t^3 + \frac{2t^7}{5 \cdot 6 \cdot 4!} \left(9 + \frac{1}{7}\right)$$

el segundo término de  $\theta_+(y_+)$  queda entonces

$$\left(\frac{1}{2t}\right) \left[ \frac{1 - \frac{t^4(1+y^4)}{6} + t^4 y^2}{\frac{4}{3} t^3 + \frac{2t^7}{5 \cdot 6 \cdot 4!} \left(9 + \frac{1}{7}\right)} \right] = \frac{3}{8t^4} - \frac{3y^2}{8} - \frac{y^4}{16} - \frac{1}{16} - \frac{(9+1/7)}{8 \cdot 8 \cdot 20};$$

calcularemos ahora el tercer término de  $\theta_+(y_+)$

$$\text{cht sent chty senty} \approx t^2 y + \frac{t^4 y^3}{3} + \frac{t^4 y}{3} + \frac{t^6 y^3}{9};$$

$$\text{sht cost shty costy} \approx t^2 y - \frac{t^4 y^3}{3} - \frac{t^4 y}{3} + \frac{t^6 y^3}{9};$$

$$(\text{cost sent} + \text{cht sht}) \approx 2t;$$

$$(\text{cht sent chty senty} + \text{sht cost shty costy}) \approx 2 t^2 y$$

el tercer término se reduce a

$$\left(\frac{1}{2t}\right) \left(\frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2}\right) \left(\frac{2 t^2 y}{2t}\right) = \left(\frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2}\right) \left(\frac{1}{2} y\right)$$

por lo tanto, la expresión equivalente de  $\theta_+(y_+)$  es:

$$\theta_+(y_+) \approx \frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} + \frac{3}{8t^4} - \frac{9+1/7}{2 \cdot 8^2 \cdot 10} + \frac{3}{8} y^2 - \frac{1}{16} (1+y^4)_+$$

$$\frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \left( \frac{y}{2} \right)$$

ahora, haremos el mismo desarrollo para  $\theta''_+(y_+)$

$$\theta''_+(y_+) = (t) \frac{\text{sht sent chty costy} - \text{cht cost shty senty}}{\text{cht sht} - \text{cost sent}}$$

$$+ (t) \left( \frac{q_2 - q_1}{q_1 + q_2} \right) \frac{\text{cht sent shty costy} - \text{sht cost chty senty}}{\text{cht sht} + \text{cost sent}}$$

$$\text{sht sent chty costy} \approx t^2 - \frac{t^6}{6 \cdot 15} - \frac{t^6 y^4}{6}$$

$$\text{cht cost shty senty} \approx t^2 y^2 - \frac{t^6 y^6}{6 \cdot 15} - \frac{t^6 y^2}{6}$$

$$\text{cht sht} - \text{cost sent} \approx \frac{4}{3} t^3 + \frac{2 t^7}{5 \cdot 6 \cdot 4!} (9+1/7)$$

el primer término de  $\theta''_+$  da

$$(t) \frac{\left[ t^2 - \frac{t^6}{6 \cdot 15} - \frac{t^6 y^4}{6} \right] - \left[ t^2 y^2 - \frac{t^6 y^6}{6 \cdot 15} - \frac{t^6 y^2}{6} \right]}{\frac{4}{3} t^3 + \frac{2 t^7}{5 \cdot 6 \cdot 4!} (9+1/7)} = \frac{3}{4} (1-y^2)$$

$$\left[ 1 - t^4 \left( \frac{19}{7 \cdot 6 \cdot 15} - \frac{14}{90} y^2 + \frac{y^4}{90} \right) \right];$$

calculemos ahora el segundo término

$$\text{cht sent shty costy} \approx t^2 y - \frac{t^4 y^3}{3} + \frac{t^4 y}{3};$$

$$\text{sht cost chty senty} \approx t^2 y + \frac{t^4 y^3}{3} - \frac{t^4 y}{3};$$

$$\cos t \operatorname{sen} t + \operatorname{cht} \operatorname{sh} t = 2t + 2t^5 \left( \frac{1}{5 \cdot 24} + \frac{1}{12} + \frac{1}{4!} \right) = 2t$$

y el tercer término queda

$$(t) \frac{(q_2 - q_1)}{q_1 + q_2} \frac{(t^2 y - t^4 y^3 / 3 + t^4 y / 3) - (t^2 y + t^4 y^3 / 3 - t^4 y / 3)}{2t} =$$

$$\frac{(q_2 - q_1)}{q_1 + q_2} \frac{t^4 y}{3} (1 - y^2)$$

así,  $\theta''_+(y_+)$  cuando  $t$  es pequeña da

$$\theta''_+(y_+) \approx \frac{3}{4} (1 - y^2) \left[ 1 - t^4 \left( \frac{19}{7 \cdot 6 \cdot 15} - \frac{14}{90} y^2 + \frac{y^4}{90} \right) \right] + \frac{(q_2 - q_1)}{q_1 + q_2} \frac{t^4 y}{3} (1 - y^2);$$

De este último desarrollo límite se deduce que cuando el parámetro de presión predomina sobre los otros parámetros de flujo se induce a una convección forzada teniendo un perfil para flujo tipo Poiseuille. En efecto,  $\theta''(y)$  es proporcional a  $U(y)$ , (ecuación 11.4.f), tal que la velocidad de flujo incluida dentro de la ecuación de Poiseuille da un perfil parabólico.

Resolveremos ahora la última condición frontera de las ecuaciones características de flujo. Esta condición es

$$\text{INT} = \int_{-1}^{+1} \theta(y) \theta''(y) dy = 0$$

tenemos por un lado

$$\theta_+(y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} + \frac{3}{8t^4} - \frac{(9+1/7)}{2 \cdot 8^2 \cdot 10} + \frac{3}{8} y^2 - \frac{1}{16} (1+y^4) - Q \left( \frac{y}{2} \right)$$

y por el otro

$$\theta''_+(y_+) = \frac{3}{4} (y^2 - 1) \left[ 1 - t^4 \left( \frac{19}{3 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7} - \frac{14}{90} y^2 + \frac{y^4}{90} \right) \right] + Q \frac{t^4 y}{3} (1 - y^2)$$

para facilitar el manejo de las operaciones, usaremos los siguientes términos

$$A = \frac{\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)}$$

$$F = Q/2$$

$$G = 3/4$$

$$B = \frac{3}{8t^4}$$

$$H = \frac{19}{3 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7} t^4$$

$$C = \frac{(9+1/7)}{2 \cdot 8^2 \cdot 10}$$

$$I = (14/90) t^4$$

$$D = \frac{3}{8}$$

$$J = (1/90) t^4$$

$$E = \frac{1}{16}$$

$$K = Q t^4 / 3$$

sustituyéndolos en  $\theta_+$  y  $\theta''_+$ , éstas quedan

$$\theta_+(y_+) = -A + B - C - E - Fy + Dy^2 - Ey^4$$

$$\theta''_+(y_+) = -G + GH + Ky + Gy^2 - GHy^2 - GLy^2 - Ky^3 + GLy^4 - GJ y^6$$

El producto  $\theta_+(y_+) \theta''_+(y_+)$  está constituido por una serie de términos:

a Un término producido de grupos constantes de  $\theta$  multiplicados por  $\theta''$ :

$$-A \theta''(y) + B \theta''(y) - C \theta''(y) - E \theta''(y)$$

b Dos términos de productos cruzados de  $\theta$  y  $\theta''$ :

$$[-Fy] [Gy^2 - GHy^2 - GLy^2 + GLy^4 + GJy^4 + GJy^6 - G + GH]$$

y

$$[Dy^2 - Ey^4] [Ky - Ky^3]$$

que son dos funciones impares en y, tal que la integral será nula, puesto que será una función par de y integrada entre -1 y +1.

c Un término producto de términos de  $\theta$  y de  $\theta''$  en Q:

$$\int_{-1}^{+1} (FKy^2 - FKy^4) dy = \frac{2t^4 Q^2}{9 \cdot 5}$$

d y un término producto de la multiplicación de las otras partes restantes:

$$[Dy^2 - Ey^4] [Gy^2 - GHy^2 - GLy^2 + GLy^4 + GJy^4 - GJy^6 - G + GH] = (EG - EGH + DG - DGH - DGC) y^4 + (DGI + DGJ - EG + EGH + EGI) y^6$$

$$-(DGJ+EGI+EGJ) y^8 + (EGJ) y^{10} + y^2 \cdot (DGH-DG)$$

integrando entre  $y = -1$  y  $y = +1$ , obtenemos

$$G \left[ \frac{2}{3} (DH-D) + \frac{2}{5} (E-EH+D-DH-DI) + \frac{2}{7} (DI+DJ-E+EH+EI) - \frac{2}{9} (DJ-EI-EJ) + \frac{2}{11} (EJ) \right] ;$$

$$\frac{2}{3} G (DH-D) = 0.00565476 t^4 - 3/16$$

$$\frac{2}{5} G (E-EH+D-DH-DI) = -0.02145832 t^4 + 7.3/10.16$$

$$\frac{2}{7} G (DI+DJ-E+EH+EI) = 0.01588009 t^4 - 3/14.16$$

$$- \frac{2}{9} G (DJ-EI-EJ) = 0.00243055 t^4$$

$$\frac{2}{11} G (EJ) = 0.00009469 t^4$$

sumando los 5 términos obtenemos:

$$- 0.02388888 t^4 + 0.02162955 t^4 - 0.0625$$

Entonces la última ecuación es equivalente a la suma de los términos a, b, c y d resultantes:

$$\left( \frac{-\lambda B}{\rho_0 \rho^2 g c (q_1+q_2)} + \frac{3}{8t^4} - \frac{9+1/7}{2 \cdot 8^2 \cdot 10} - \frac{1}{16} \right) + (0) + \left( \frac{2t^4 q^2}{9 \cdot 5} \right) +$$

$$(0.02162955 t^4 - 0.02388888 t^4 - 0.0625)$$

el primer término se obtuvo de integrar los valores constantes de  $\theta$  por  $\theta''$ , como sigue:

$$\int_{-1}^{+1} [-A+B-C-E] \theta'' (y) dy = [-A+B-C-E] [\theta' (1) - \theta' (-1)]$$

$$\text{donde } \left\{ \theta' (1) - \theta' (-1) \right\} = \theta' (+c) - \theta' (-c) = \frac{q_1+q_2}{q_1+q_2} = 1$$

Si  $r = \sqrt{2} t \Rightarrow r^4 = 4t^4$ , y sustituyendo tenemos

$$\frac{-\lambda B}{\rho \beta g c (q_1 + q_2)} = \frac{(9+1/7)}{2.8^2 \cdot 10} = \frac{1}{16} = 0.0625 + \frac{12}{8r^4}$$

$$\frac{0.00225933}{4} r^4 = \frac{2r^4 Q^2}{9.5.4}$$

$$\frac{-\lambda B}{\rho \beta g c (q_1 + q_2)} = 0.00714285 - 0.0625 + 0.06964 + \frac{3}{2r^4}$$

$$\frac{137}{(35)^2 \cdot 9.22} r^4 = \frac{Q^2 r^4}{90};$$

finalmente:

$$\int_{-1}^{+1} \theta(y) \theta''(y) dy = \frac{-\lambda B}{\rho \beta g c (q_1 + q_2)} + \frac{3}{2r^4} - \frac{137 r^4}{(35)^2 \cdot 9.22} - \frac{Q^2 r^4}{90} = 0$$

La ecuación anterior es la forma definitiva para valores pequeños de  $r$ .

III.a.2) Caso de la convección natural predominante. En este caso,  $t$  o  $r$ , es grande.

En la vecindad de  $y_+ = 1$ :

$$\theta_+''(y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho \beta g c (q_1 + q_2)} - \frac{1}{2t} e^{t(y-1)} \cos t(y-1) \frac{2 q_2}{q_1 + q_2}$$

$$\theta_+''(y_+) = -t e^{t(y-1)} \sin t(1-y) \frac{2 q_2}{q_1 + q_2}$$

En la vecindad de  $y_+ = -1$ :

$e^{y+1}$  es preponderante:

$$\theta_+(y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho \beta g c (q_1 + q_2)} - \frac{1}{2t} e^{-t(y+1)} \cos t(y+1) \frac{2 q_1}{q_1 + q_2}$$

$$\theta''_+(y_+) = -t e^{-t(y+1)} \operatorname{sent}(y+1) \frac{2^{q_1}}{q_1+q_2}$$

Calcularemos ahora la integral

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+(y) \theta''_+(y) dy :$$

en la vecindad de  $y = 1$ :

$$\theta(y) \theta''(y) = \frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1+q_2)} \theta''(y) + \frac{1}{2} e^{t(y-1)} \operatorname{cost}(y-1) \operatorname{sent}(1-y) \left(\frac{2^{q_2}}{q_1+q_2}\right)^2$$

en la vecindad de  $y = -1$ :

$$\theta(y) \theta''(y) = \frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1+q_2)} \theta''(y) + \frac{1}{2} e^{-2t(y+1)} \operatorname{cost}(y+1) \operatorname{sent}(y+1) \left(\frac{2^{q_1}}{q_1+q_2}\right)^2$$

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+(y_+) \theta''_+(y_+) dy_+ = \frac{-\lambda B [\theta'(1) - \theta'(-1)]}{\rho_0 \beta g c (q_1+q_2)} + \int_{1-\xi}^1 \frac{1}{2} e^{2t(y-1)} \operatorname{cost}(y-1) \operatorname{sent}(1-y) dy \left(\frac{2^{q_2}}{q_1+q_2}\right)^2 +$$

$$\int_{-1}^{-1+\xi} \frac{1}{2} e^{-2t(y_+)} \operatorname{cost}(y_+1) \operatorname{sent}(y_+1) \left(\frac{2^{q_1}}{q_1+q_2}\right)^2 dy_+$$

$$\frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} + \frac{1}{2t} \left[ \left( \frac{2q_1}{q_1 + q_2} \right)^2 + \left( \frac{2q_2}{q_1 + q_2} \right)^2 \right] \int_0^{\infty} \frac{1}{2} e^{-n} \operatorname{sen} n \, dn$$

Entonces, la ecuación en  $t$  proveniente de la condición auxiliar frontera

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+(y_+) \theta_+''(y_+) \, dy_+ = 0; \text{ es equivalente, para valores -}$$

grandes de  $r$ , a:

$$\frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} + \frac{1}{2t} \left[ \left( \frac{q_1}{q_1 + q_2} \right)^2 + \left( \frac{q_2}{q_1 + q_2} \right)^2 \right] = 0$$

ó

$$\frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} + \frac{1}{2 \sqrt{2} r} (Q^2 + 1) = 0$$

ya que  $t = \frac{r}{\sqrt{2}}$

#### IV. RESOLUCION ANALITICA PARA EL FLUJO DESCENDENTE DE AIRE EN LA TORRE DE VIENTO

El flujo descendente del aire se produce cuando

$$\frac{dT_m}{dx} = A < 0 \quad \text{y} \quad \Delta P_g > 0$$

El aire se enfría al ceder su calor a las paredes de la torre cuando éstas están frías. Así, el aire frío es más denso y la presión aumenta conforme el flujo desciende, de tal manera que  $P_g(0) > P_g(H)$  ( $\Delta P_g > 0$ ) creando un tiro hacia abajo (efecto succión). A mayor  $\Delta P_g$ , el flujo se aproxima a un flujo de Poiseville, es decir, de un flujo provocado por un gradiente de presión (como se deduce de la expresión limitante en t de  $\theta_+''$  (y<sub>+</sub>) ecuación No. 11.4.1); cuando la influencia del viento llega a ser preponderante, los valores de A disminuyen y la velocidad del aire es muy elevada. Este efecto es más pronunciado cuando  $q_2$  es pequeño. Una afirmación de la existencia de un flujo Poiseville la tendremos más adelante cuando resolvamos la ecuación diferencial (11.5g) y podamos así obtener resultados.

##### IV.a) Solución del perfil de temperatura

La ecuación a resolver es:

$$11.5.g. \dots \theta_+^4(y_+) + \frac{\rho_0 \beta g c^4}{ua} A \theta_+(y_+) + \frac{B \lambda Ac}{ua (q_1 + q_2)} = 0$$

con las condiciones límite:

$$P_g(H) - P_g(0) = A \rho_0 \beta g \frac{H^2}{2} - BH$$

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+ \theta_+'' dy_+ = 0$$

$$\theta_+''(\pm 1) = 0$$

$$\theta_+'(+1) = q_2 / (q_2 + q_1)$$

$$\theta_+'(-1) = -q_1 / (q_2 + q_1)$$

La solución exacta del sistema será entonces una solución a la ecuación diferencial verificando todas las condiciones a los límites del sistema.

La ecuación característica de la ecuación diferencial es

$$r^4 + \frac{\rho_0 \beta g A c^4}{u a} = 0$$

Dentro del caso de flujo descendente, A es negativa y entonces  $r^4$  es un número positivo.

$$r^4 = - \frac{\rho_0 \beta g A c^4}{u a}$$

siendo cuatro las soluciones particulares y una solución constante:

$$\frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)}, \operatorname{chry}, \operatorname{shry}, \operatorname{cosry}, \operatorname{senry}$$

Entonces la solución general es de la forma

$$\theta_+ (y_+) = \frac{-\lambda B}{\rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} + A_1 \operatorname{chry} + B_1 \operatorname{shry} + C_1 \operatorname{cosry} + D_1 \operatorname{senry}$$

procederemos ahora a encontrar las escaleras A, B, C, D correspondientes de  $\theta_+$  con el mismo procedimiento que para el "efecto chimenea".

$$\theta_+' (y_+) = r (A_1 \operatorname{shry} + B_1 \operatorname{chry} - C_1 \operatorname{senry} + D_1 \operatorname{cosry})$$

$$\theta_+'' (y_+) = r^2 (A_1 \operatorname{chry} + B_1 \operatorname{shry} - C_1 \operatorname{cosry} - D_1 \operatorname{senry})$$

aplicando las condiciones límites para  $\theta_+'' (y_+)$

$$\theta_+'' (+1) = 0$$

$$\theta_+'' (+1) = A_1 \operatorname{chr} + B_1 \operatorname{shr} - C_1 \operatorname{cosr} - D_1 \operatorname{senr} = 0$$

$$\theta_+'' (-1) = A_1 \operatorname{chr} - B_1 \operatorname{shr} - C_1 \operatorname{cosr} + D_1 \operatorname{senr} = 0$$

de las cuales obtenemos que

$$\theta_+'' (+1) + \theta_+'' (-1) = A_1 \operatorname{chr} - C_1 \operatorname{cosr} = 0$$

$$y \quad B_1 \operatorname{shr} - D_1 \operatorname{senr} = 0$$

aplicando las condiciones límites para  $\theta_+(y_+)$

$$\theta'_+(+1) = q_2/q_{1+q_2}$$

$$\theta'_+(-1) = -q_1/q_{1+q_2}$$

$$\theta'_+(+1) = r(A_1 \operatorname{shr} + B_1 \operatorname{chr} + C_1 \operatorname{senr} + D_1 \operatorname{cosr}) = q_2/q_{1+q_2}$$

$$\theta'_+(-1) = r(-A_1 \operatorname{shr} + B_1 \operatorname{chr} + C_1 \operatorname{senr} + D_1 \operatorname{cosr}) = -q_1/q_{1+q_2}$$

tenemos entonces 4 ecuaciones con 4 incógnitas:

$$(1) A_1 \operatorname{chr} - C_1 \operatorname{cosr} = 0$$

$$(2) B_1 \operatorname{shr} - D_1 \operatorname{senr} = 0$$

$$(3) B_1 \operatorname{chr} + D_1 \operatorname{cosr} = \frac{1}{2r} \left( \frac{q_2 - q_1}{q_{1+q_2}} \right)$$

$$(4) A_1 \operatorname{shr} - C_1 \operatorname{senr} = \frac{1}{2r}$$

resolviendo este sistema obtenemos los valores de las incógnitas que son:

$$A_1 = \frac{1}{2r} \frac{\operatorname{cosr}}{\operatorname{shr} \operatorname{cosr} - \operatorname{chr} \operatorname{senr}} ; B_1 = \frac{1}{2r} \left( \frac{q_2 - q_1}{q_{1+q_2}} \right) \frac{\operatorname{senr}}{\operatorname{chr} \operatorname{senr} + \operatorname{shr} \operatorname{cosr}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2r} \frac{\operatorname{chr}}{\operatorname{shr} \operatorname{cosr} - \operatorname{chr} \operatorname{senr}} ; D_1 = \frac{1}{2r} \left( \frac{q_2 - q_1}{q_{1+q_2}} \right) \frac{\operatorname{shr}}{\operatorname{chr} \operatorname{senr} + \operatorname{shr} \operatorname{cosr}}$$

y sustituyendo estas constantes en las ecuaciones correspondientes para

$\theta_+(y_+)$  y  $\theta''(y_+)$  obtenemos finalmente:

$$\theta_+(y_+) = \frac{\lambda B}{\rho \beta g c (q_{1+q_2})} + \frac{\operatorname{chr} \operatorname{cosr} y + \operatorname{cosr} \operatorname{chr} y}{2r (\operatorname{shr} \operatorname{cosr} - \operatorname{chr} \operatorname{senr})} + \frac{1}{2r} \left( \frac{q_2 - q_1}{q_{1+q_2}} \right) \frac{\operatorname{shr} \operatorname{senr} y + \operatorname{senr} \operatorname{shr} y}{(\operatorname{shr} \operatorname{cosr} + \operatorname{chr} \operatorname{senr})}$$

$$\theta''_+(y_+) = \frac{r}{2} \frac{\operatorname{cosr} \operatorname{chr} y - \operatorname{chr} \operatorname{cosr} y}{\operatorname{shr} \operatorname{cosr} - \operatorname{chr} \operatorname{senr}} + \left( \frac{q_2 - q_1}{q_{1+q_2}} \right) \frac{r}{2} \frac{\operatorname{senr} \operatorname{shr} y - \operatorname{shr} \operatorname{senr} y}{\operatorname{shr} \operatorname{cosr} + \operatorname{chr} \operatorname{senr}}$$

falta evaluar  $\int_{-1}^{+1} \theta_+ \theta_+'' dy_+ = 0$

$$\text{si } Q = \frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2} \text{ y } M = \frac{\lambda B}{r_0 \beta g c (q_1 + q_2)}$$

$\theta_+(y_+)$  y  $\theta_+''(y_+)$  en función de Q y de M quedan:

$$\theta_+(y_+) = M + \frac{\text{chrcosry} + \text{cosrchry}}{2r(\text{shr cosr} - \text{chr senr})} - \frac{Q}{2r} \frac{\text{shr senry} + \text{senr shry}}{(\text{shr cosr} + \text{chr senr})}$$

$$\theta_+''(y_+) = \frac{r}{2} \frac{\text{cosr chry} - \text{chr cosy}}{\text{shr cosr} - \text{chr senr}} - \frac{Qn}{2} \frac{\text{senr shry} - \text{shr senry}}{\text{shr cosr} + \text{chr senr}}$$

$$\begin{aligned} \theta\theta'' = M\theta'' + \frac{1}{4} \frac{\text{cos}^2 r \text{ch}^2 ry - \text{ch}^2 r \text{cos}^2 ry}{(\text{shr cosr} - \text{chr senr})^2} - \frac{Q}{4} \frac{(\text{chrcosry} + \text{cosrchry})}{\text{sh}^2 r \text{cos}^2 r -} \\ \frac{(\text{senr shry} - \text{shr senry})}{\text{ch}^2 r \text{sen}^2 r} \\ - \frac{Q}{4} \frac{(\text{shr senry} + \text{senr shry})(\text{cosrchry} - \text{chr cosy})}{\text{sh}^2 r \text{cos}^2 r - \text{ch}^2 r \text{sen}^2 r} \\ + \frac{Q^2}{4} \frac{\text{sen}^2 r \text{sh}^2 ry - \text{sh}^2 r \text{sen}^2 ry}{(\text{shr cosr} + \text{chr senr})^2} \\ \theta\theta'' = M + \frac{1}{8} \frac{\text{cos}^2 r (\text{ch}^2 ry + 1) - \text{ch}^2 r (\text{cos}^2 ry + 1)}{(\text{cosr shr} - \text{chr senr})^2} + \frac{Q^2}{8} \frac{\text{sen}^2 r (\text{ch}^2 ry - 1) - \text{sh}^2 r}{(\text{senr chr} +} \\ \frac{(1 - \text{cos}^2 ry)}{\text{shr cosr})^2} - \frac{Q}{4} \frac{\text{cosr senr sh}^2 ry - \text{chr shr sen}^2 ry}{\text{sh}^2 r \text{cos}^2 r - \text{ch}^2 r \text{sen}^2 r} \end{aligned}$$

entonces

$$\begin{aligned} \int_{-1}^{+1} \theta\theta'' dy = M \int_{-1}^{+1} \theta' \theta' dy + \frac{1}{4} \frac{\text{cos}^2 r - \text{ch}^2 r}{(\text{shr cosr} - \text{chr senr})^2} - \frac{Q^2}{4} \frac{\text{sen}^2 r + \text{sh}^2 r}{(\text{chr senr} + \text{shr cosr})^2} \\ + \int_{-1}^{+1} \frac{\text{cos}^2 r \text{ch}^2 ry - \text{ch}^2 r \text{cos}^2 ry}{8(\text{cosr shr} - \text{chr senr})^2} dy + \frac{Q^2}{8} \int_{-1}^{+1} \frac{\text{sen}^2 r \text{ch}^2 ry + \text{sh}^2 r \text{cos}^2 ry}{(\text{senr chr} + \text{shr cosr})^2} dy \\ - \frac{Q}{4} \int_{-1}^{+1} \frac{\text{cosr senr sh}^2 ry - \text{chr shr sen}^2 ry}{\text{sh}^2 r \text{cos}^2 r - \text{ch}^2 r \text{sen}^2 r} dy \end{aligned}$$

$$\int_{-1}^{+1} \theta \theta'' dy = M + \frac{1}{8} \frac{\cos^2 r \left( \frac{\text{sh}2r}{r} + 2 \right) - \text{ch}^2 r \left( \frac{\text{sen}2r}{r} + 2 \right)}{(\cos r \text{sh} r - \text{chr} \text{sen} r)^2}$$

$$+ \frac{Q^2}{8} \frac{\text{sen}^2 r \left( \frac{\text{sh}2r}{r} - 2 \right) + \text{sh}^2 r \left( \frac{\text{sen}2r}{r} - 2 \right)}{(\text{sen} r \text{chr} + \text{shr} \cos r)^2} = 0$$

r es entonces la solución de la ecuación:

$$\begin{aligned} M + \frac{1}{8} \frac{\cos^2 r \left( \frac{\text{sh}2r}{r} + 2 \right) - \text{ch}^2 r \left( \frac{\text{sen}2r}{r} + 2 \right)}{(\cos r \text{sh} r - \text{chr} \text{sen} r)^2} \\ + \frac{Q^2}{8} \frac{\text{sen}^2 r \left( \frac{\text{sh}2r}{r} - 2 \right) + \text{sh}^2 r \left( \frac{\text{sen}2r}{r} - 2 \right)}{(\text{sen} r \text{chr} + \text{shr} \cos r)^2} = 0 \end{aligned}$$

NOMENCLATURA

T : Temperatura absoluta dimensional  $T = T_m(x) + \theta(y)$

$\theta$  : Componente de la temperatura absoluta variando solamente con y

$T_m$  : componente de la temperatura absoluta variando solamente con x

U : velocidad de flujo sobre Ox, V : componente sobre Oy

$P_g$  : presión (kg/m seg<sup>2</sup>)  $P_g$  : presión motriz =  $P + \rho_0 g x$

q : densidad de flujo de calor (W/m<sup>2</sup>)

qm : consumo másico del aire (kg/seg)

H : altura de la torre (m)

c : radio de la torre (m)

$\beta$  : coeficiente de dilatación del aire considerado como gas ideal

$\mu$  : viscosidad dinámica del aire (kg/m seg)

$\rho$  : densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

$\nu$  : viscosidad cinemática del aire (m<sup>2</sup>/seg),  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

$\lambda$  : conductividad térmica del aire (W/m°C)

$C_p$  : capacidad calorífica del aire a presión constante ( $\lambda$ /kg°C)

a : difusividad térmica del aire (m<sup>2</sup>/seg),  $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$

$P_R$  : número de Prandtl,  $P_R = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu C_p}{\lambda}$

$E_R(c)$  : número de Grashof,  $GR = \frac{\beta g c^4 (q_1 + q_2)}{\lambda \nu^2}$

$Nu$  : número de Nusselt  $Nu(c) = \frac{q c}{\lambda \Delta T}$

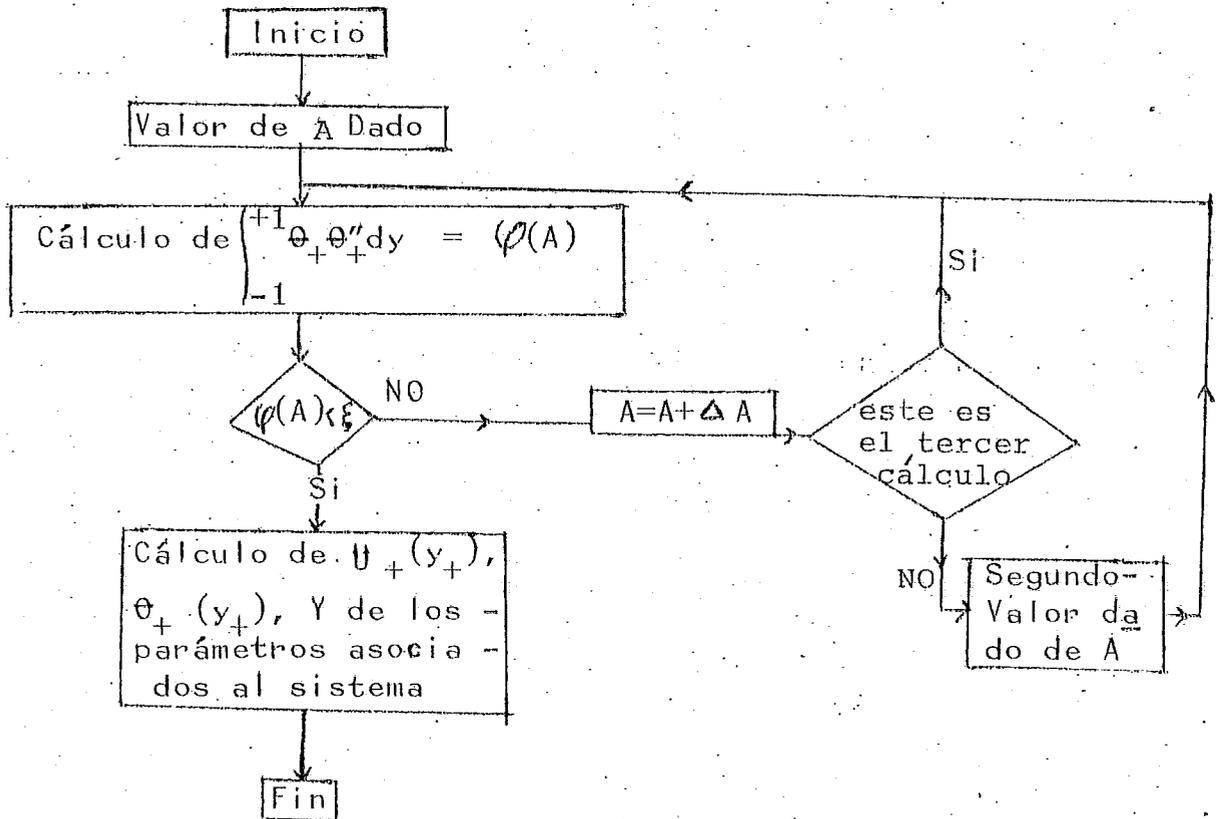
+ : el índice + indica una variable adimensional

IV

Hemos obtenido expresiones analíticas que nos permiten obtener los perfiles de velocidad y de temperatura para cuando la torre opera con flujo de aire descendente o ascendente. Para ambos casos se sigue un procedimiento iterativo ya que el parámetro  $A$  que involucran las ecuaciones de velocidad y de temperatura es una incógnita a priori. Este parámetro debe cumplir la condición

$$\int_{-1}^{+1} \theta_+ \theta_+'' dy_+ = 0$$

Con la ayuda de un programa computacional el procedimiento iterativo es más fácil de realizar. El diagrama de flujo siguiente muestra el procedimiento computacional seguido para resolver las ecuaciones de velocidad y de temperatura (con  $\xi = 10^{-2}$ ):



## PARAMETROS DEL SISTEMA

Dentro de las expresiones de  $\theta_+(y_+)$  aparecen tres parámetros de flujo adimensionales:

$$Q = \frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2} \quad \text{que mide la disimetría entre el calentamiento de dos paredes de la torre.}$$

$$\mathcal{P} = \frac{\lambda [P_g(H) - P_g(0)]}{H \rho_0 \beta g c (q_1 + q_2)} \quad \text{parámetro de presión que mide la influencia de } \Delta P_g \text{ sobre la convección natural.}$$

$$N = \frac{a \nu H \lambda}{2 \beta g c^5 (q_1 + q_2)} \quad \text{parámetro de convección natural}$$

$N$  puede ser escrito como: 
$$N = \frac{1}{2 P_R G_{Rc}} \times \frac{H}{C}$$

$$\text{con } G_{Rc} = \frac{\beta g c^4 (q_1 + q_2)}{\nu^2 \lambda}$$

$P_g$ ,  $q_1$ , y  $q_2$  varían independientemente y son función de las condiciones meteorológicas predominantes. Hemos tomado valores de esos tres parámetros para representar algunos posibles casos del comportamiento del aire dentro de la torre.

Resumiendo diremos que los dos sistemas de ecuaciones:

$$\theta_+(y_+), \theta_+''(y_+), \text{ y } \int_{-1}^{+1} \theta_+ \theta_+'' dy_+, \quad \text{para flujo descendente y ascendente, permiten obtener:}$$

-el gradiente de temperatura  $A = \frac{dT_m}{dx}$

-el consumo másico  $q_m = \frac{a}{A} \rho_0 \frac{q_1 + q_2}{\lambda}$

-los perfiles de velocidad y de temperatura dentro de la torre en función de  $\mathcal{P}$ ,  $N$ ,  $Q$  (es decir de  $\Delta P_g$ ,  $q_1$ , y  $q_2$ ).

## VI. RESULTADOS

Los resultados se presentan en gráficas. Las familias de curvas han sido graficadas a flujos de calor constantes  $q_1$  y  $q_2$ , y otras familias de curvas a la diferencia de presión motriz  $\Delta P_g$  constante. Las observaciones son válidas para los diferentes cambios de velocidad, y aún para los cambios de temperatura. Las escalas son adimensionales. Los valores de  $P$ ,  $N$ ,  $Q$ ,  $A$  y  $q_m$  son indicados para cada curva y también las dimensiones de la torre: altura ( $H$ ) y diámetro ( $D=2c$ ).

VII. INTERPRETACION DE LAS CURVAS EN FUNCION DE  $\Delta P_g$ ,  $q_1$ ,  $q_2$

La interpretación de las curvas en función de los parámetros adimensionales es delicada ya que estos no varían por una razón simple: por ejemplo, cuando  $|\Delta P_g|$  es fija los tres parámetros  $\rho$ ,  $N$ ,  $Q$  varían con el flujo de calor solar  $q_2$ . Dentro de las intenciones de este reporte, la interpretación de los resultados se limitará entonces al estudio de las curvas en función de  $|\Delta P_g|$ ,  $q_1$  y  $q_2$ .

a) A flujo solar constante  $q_2$ ,  $q_1 = 0$  y con  $|\Delta P_g|$  variable.

A mayor  $|\Delta P_g|$  la influencia del viento es preponderante y el flujo se aproxima a un flujo de Poiseville, es decir, de un flujo provocado por un gradiente de presión. El gradiente de temperatura del aire a lo largo de la torre ( $A = dT_m/dx$ ) es en consecuencia pequeño ya que la velocidad que adquiere es tan elevada que no le dá tiempo de calentarse o enfriarse.

El examen de perfiles de velocidad y de temperatura muestra que el aumento de  $|\Delta P_g|$  disminuye el fenómeno de la capa límite. Las velocidades tienden a ser las mismas en el espacio intermedio de la torre.

El flujo de Poiseville es más acentuado cuando se trata de ductos de la torre con distancias pequeñas entre las paredes (pequeña  $2c$ ). La comparación se hace a la misma  $|\Delta P_g|$ .

b) A  $|\Delta P_g|$  constante,  $q_1 = 0$ , y con  $q_2$  variable.

Cuando  $|\Delta P_g|$  es mínima, el flujo producido es por el calentamiento de las paredes (fenómeno de convección natural) y únicamente por la transferencia de calor. En consecuencia el parámetro  $A$  es grande y el consumo máximo ( $q_m$ ) es pequeño.

Como  $q_1 = 0$ , se puede observar un flujo en sentido inverso en el centro de la torre.

c) El efecto de  $q_1 \neq 0$

Es de aumentar el flujo dentro de la región  $[-c, 0]$  de la torre. El efecto es parecido al de  $q_2$  pero menos importante ya que  $q_1 < q_2$ .

### VIII. CONCLUSIONES

Los consumos máxicos obtenidos tanto para flujo ascendente y descendente a caídas de presión elevadas ( $P=100\text{kg/m}.\text{seg}^2$ ) son del orden de  $15\text{Kg/m}.\text{seg}$ , lo cual para un ducto de 20 cm. de separación entre paredes equivale a  $3\text{m}^3/\text{seg}$ .

Sin embargo, bajo las consideraciones supuestas es poco probable que se produzca flujo descendente del aire. Si éste llega a producirse será únicamente a consecuencia de la convección natural descendente, cuando las paredes del ducto estén menos calientes que el aire circundante. El flujo ascendente es el más favorecido debido a que el viento pasa de largo sobre la parte superior del ducto (figura a) ocasionando una depresión en ese lugar. Mientras mayor sea la velocidad del viento las caídas de presión  $|\Delta P|$  aumentan produciéndose el flujo Poiseville ascendente. Cuando la velocidad del viento es pequeña el flujo ascendente se produce por convección natural.

Para que el fluido descienda a través del ducto es necesario captarlo (figura b). Esto es lo que ocurre en realidad en las torres de viento ya que constan de cavidades de captación en la parte superior. Cuando los vientos captados son fuertes se produce el flujo descendente Poiseville y los consumos máxicos obtenidos son grandes ( $15\text{Kg/m}.\text{seg}$ ). Cuando no hay vientos y cuando el aire circundante es más caliente que las paredes de la torre, el flujo producido es descendente debido a convección natural. A diferencia del caso anterior (figura a), el "efecto chimenea" o flujo ascendente del aire, en este caso (figura b), sólo ocurre cuando no hay vientos y las paredes de la torre están más calientes que el aire circundante. Este flujo ascendente se produce por convección natural.

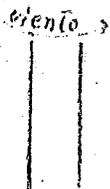


figura a  
CHIMENEA NORMAL

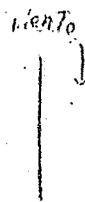


figura b  
TORRE DE VIENTO

El flujo descendente del aire en la torre depende además de las características físicas de la construcción: disposición y dimensión de las ventanas en la construcción con respecto a la localización y tamaño de la torre, etc.

Las ecuaciones usadas para describir ambos comportamientos son válidas para las condiciones de  $|\Delta P|$ ,  $q_1$  y  $q_2$  establecidas en el modelo. Es importante aclarar que, las caídas de presión elevadas (y por consiguiente los consumos máxicos elevados), únicamente ocurren cuando hay vientos fuertes y éstos son captados por la torre (figura b). Es decir, puede producirse un efecto significativo en  $\Delta P_g$  más no un efecto inverso en  $(-\Delta P_g)$ .

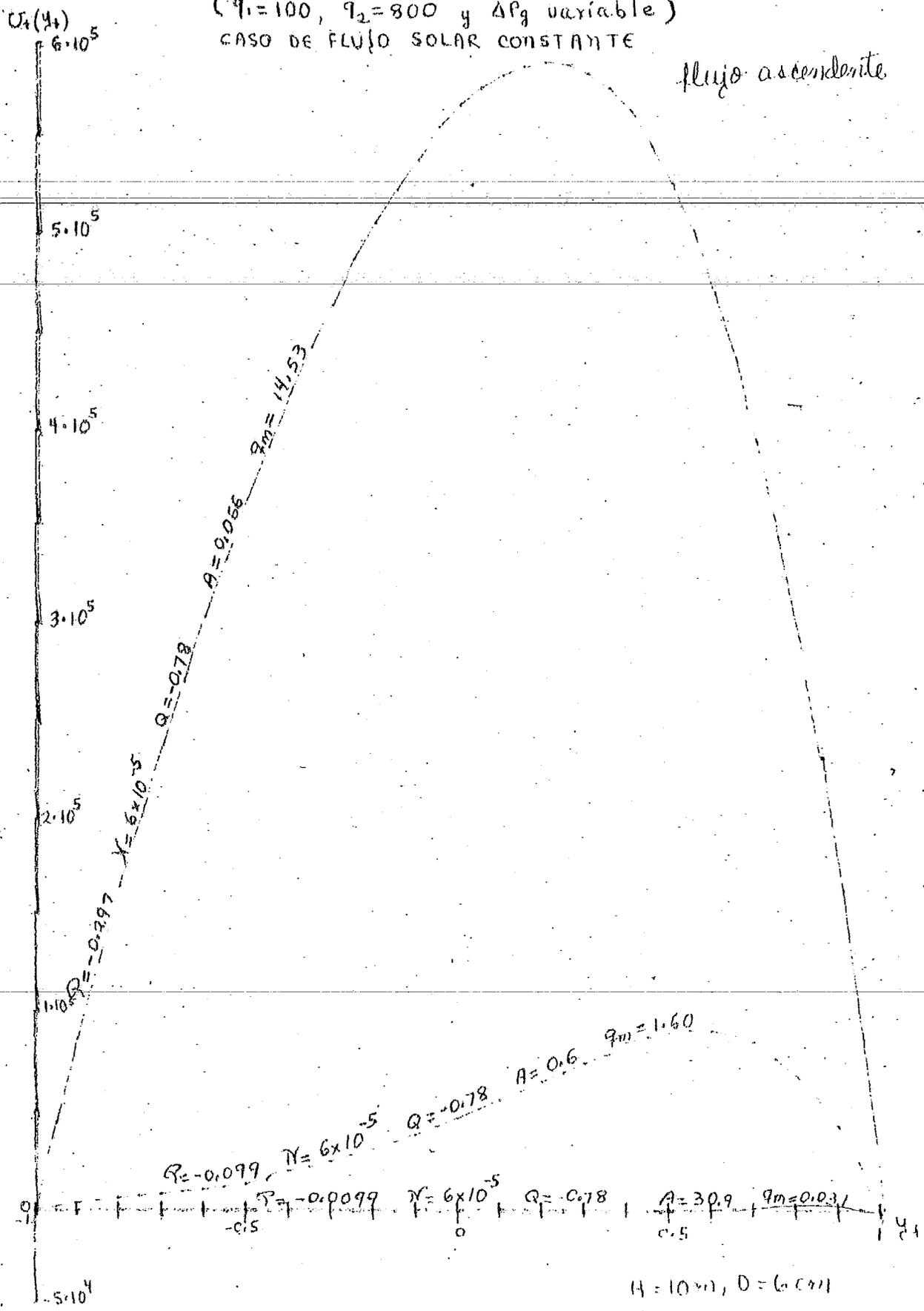
Por otra parte, la interpretación de la naturaleza de  $|\Delta P_g|$  es delicada ya que engloba la acción del viento sobre toda la construcción (término en  $\rho v^2/2$ ). En el modelo desarrollado sólo se ha considerado el caso cuando:  $\Delta P_g = P_g(H) - P_g(0)$ .

Los cálculos efectuados no comprenden la longitud de entrada del ducto, y es difícil saber a priori a que velocidad del viento corresponde un  $|\Delta P_g|$  dado. Por esta razón los resultados dados aquí son parciales y con algunas restricciones pues falta comprobar el modelo mediante experimentación.

Para determinar con precisión a que velocidades de viento se presentan ciertos valores de  $|\Delta P_g|$  es recomendable experimentar con una torre prototipo donde se realicen todas las mediciones de: flujo, temperatura, presiones y velocidades correspondientes.

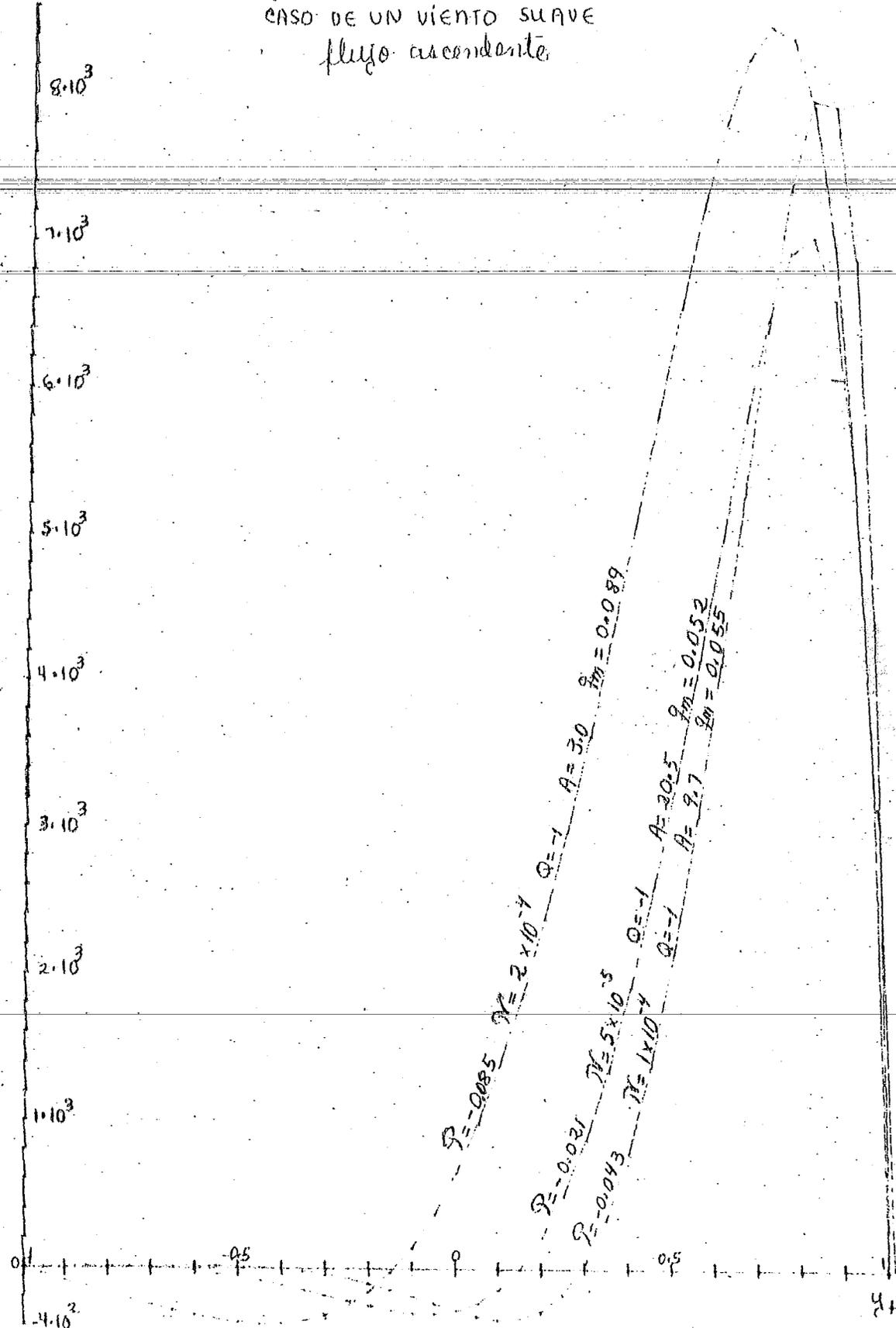
VARIACION DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $\eta_+$   
 ( $\eta_1=100$ ,  $\eta_2=800$  y  $\Delta P_g$  variable)  
 CASO DE FLUJO SOLAR CONSTANTE

flujo ascendente



$U+(y_+)$

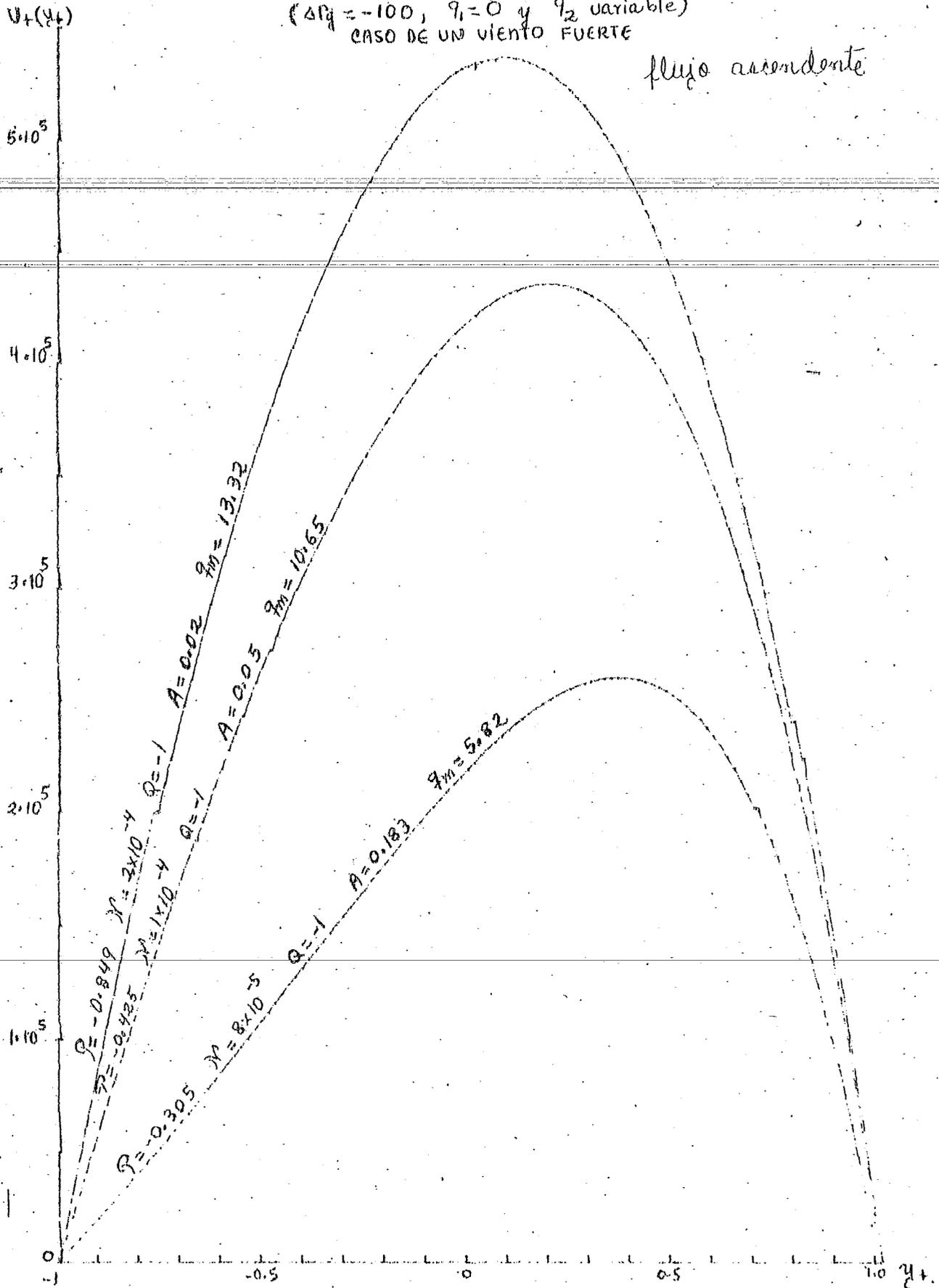
VARIACION DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_+$   
( $\Delta P_g = -10$ ,  $q_1 = 0$  y  $q_2$  variable)  
CASO DE UN VIENTO SUAVE  
flujo ascendente



$H = 10m$ ,  $D = 6.0m$

VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCIÓN DE  $y/z$   
 ( $\Delta p_0 = -100$ ,  $q_1 = 0$  y  $q_2$  variable)  
 CASO DE UN VIENTO FUERTE

flujo ascendente



$H = 10m$ ,  $D = 6cm$

VARIACION DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $Y_+$   
 ( $q_1 = 100$ ,  $q_2 = 800$  y  $\Delta P_0$  variable)

$v_+(y_+)$   
 $\cdot 2 \cdot 10^5$

flujo ascendente

$1.18 \times 10^6$

$1.16 \times 10^6$

$1.14 \times 10^6$

$1.12 \times 10^6$

$1.10^6$

$8 \cdot 10^5$

$6 \cdot 10^5$

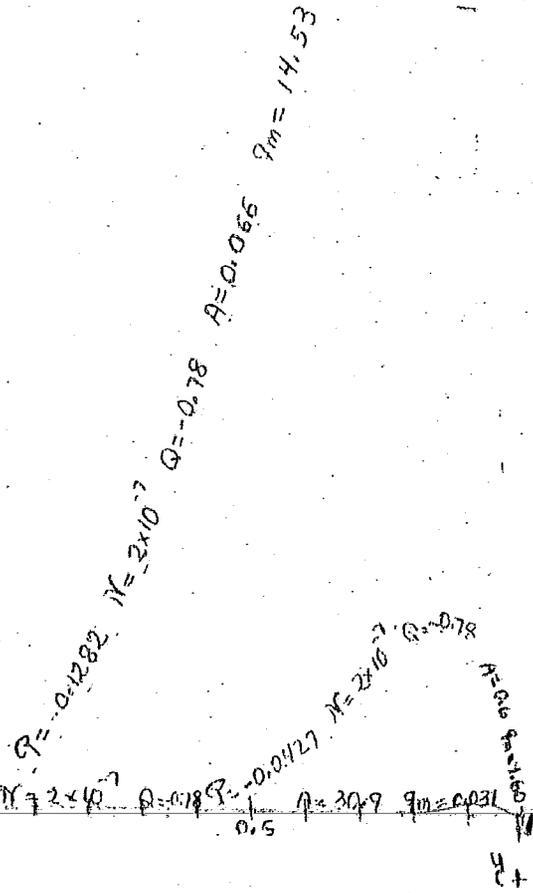
$4 \cdot 10^5$

$2 \cdot 10^5$

$-2 \cdot 10^5$

$-4 \cdot 10^5$

$-6 \cdot 10^5$



$H = 10m$ ,  $D = 20cm$

VARIACION DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_+$

( $\Delta P_g = -10$ ,  $q_1 = 0$  y  $q_2$  variable)

CASO DE UN VIENTO SUAVE

flujo ascendente

$U_+(y_+)$

$4 \cdot 10^4$

$3 \cdot 10^4$

$2 \cdot 10^4$

$1 \cdot 10^4$

0

$-2 \cdot 10^3$

-0.5

0

$H = 10m$ ,  $D = 20cm$

$Q = -0.1255$   
 $N = 5 \times 10^{-7}$   
 $Q = -1$   
 $A = 3.0$   
 $q_m = 0.089$   
 $Q = -0.0092$   
 $N = 2 \times 10^{-7}$   
 $Q = -1$   
 $A = 20.5$   
 $q_m = 0.052$   
 $Q = -0.0183$   
 $N = 4 \times 10^{-7}$   
 $Q = -1$   
 $A = 9.7$   
 $q_m = 0.055$

$y_+$

VARIACION DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $\gamma_+$   
 ( $\Delta P_2 = -100$ ,  $q_1 = 0$  y  $q_2$  variable)  
 CASO DE UN VIENTO FUERTE  
 flujo ascendente

$Q_+(y_+)$   
 $2 \times 10^6$

$1.6 \times 10^6$

$1.2 \times 10^6$

$0.8 \times 10^6$

$0.4 \times 10^6$

$-0.4 \times 10^6$

0

0.5

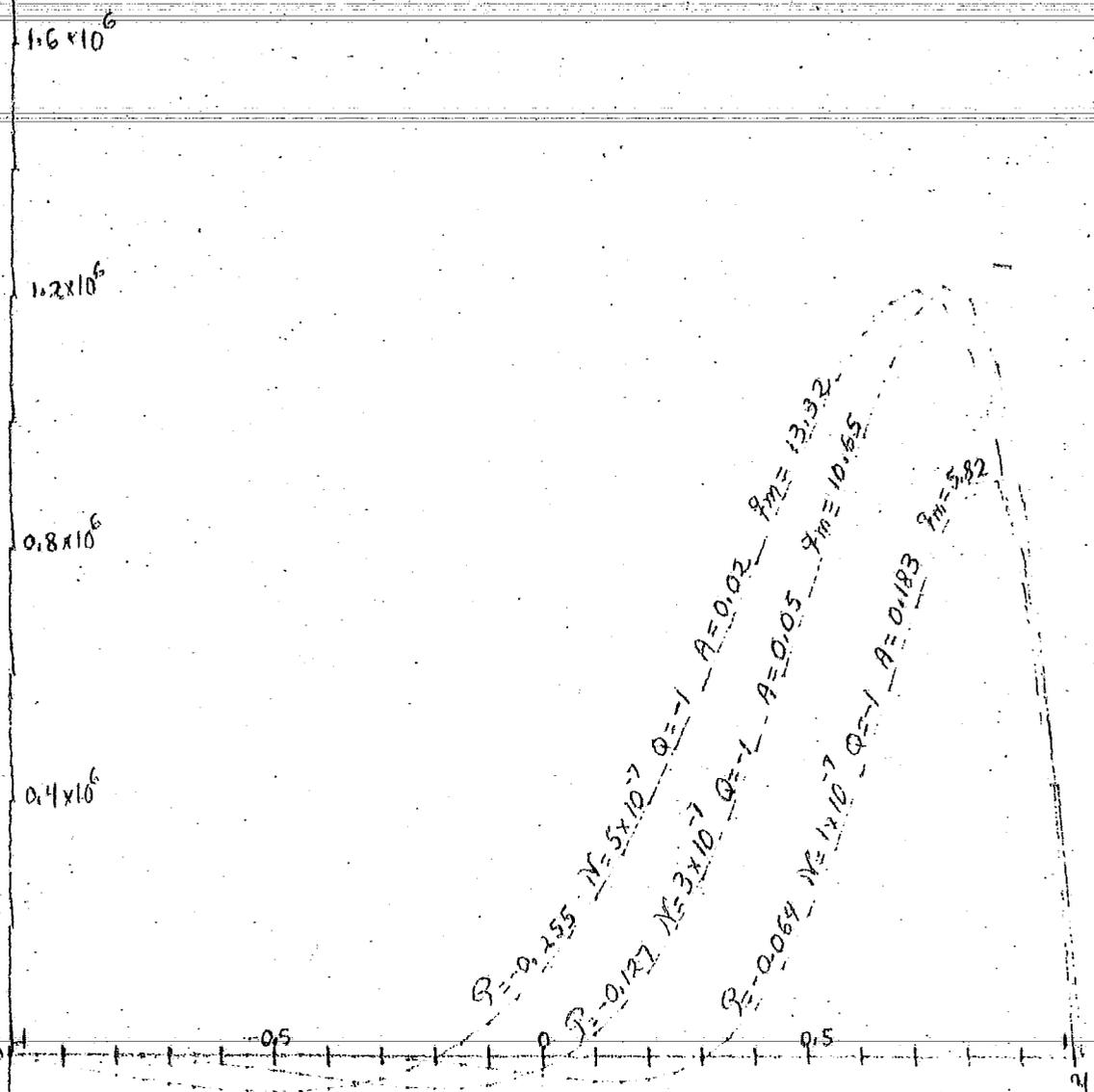
1

1.5

2

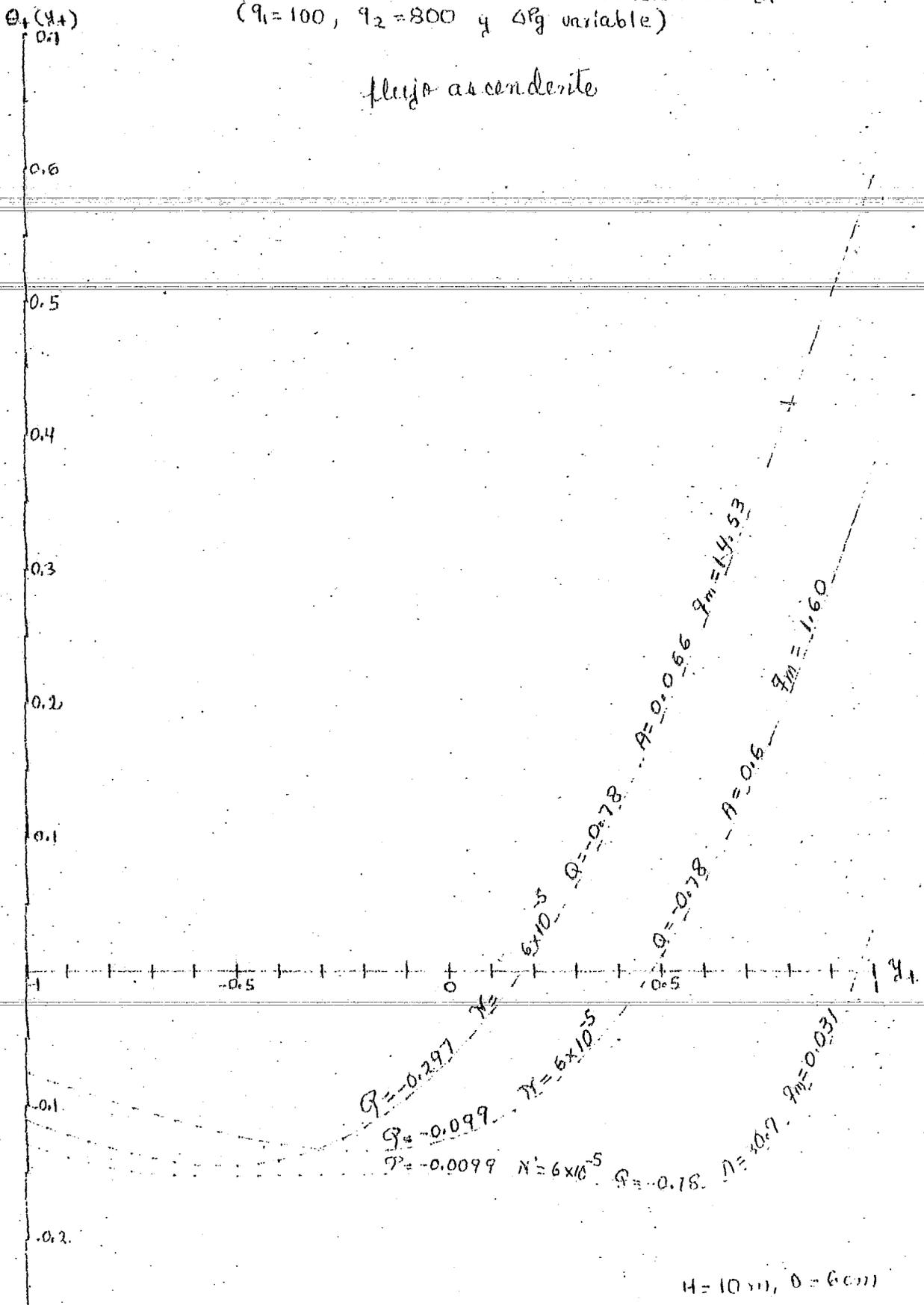
$B_1 = -0.255$   $N = 5 \times 10^{-7}$   $Q = -1$   $A = 0.02$   $P_{m1} = 13.32$   
 $B_2 = -0.127$   $N = 3 \times 10^{-7}$   $Q = -1$   $A = 0.05$   $P_{m2} = 10.65$   
 $B_3 = -0.064$   $N = 1 \times 10^{-7}$   $Q = -1$   $A = 0.183$   $P_{m3} = 5.82$

$H = 10 \text{ m}$ ,  $D = 20 \text{ cm}$



VARIACION DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_1$   
 ( $q_1 = 100$ ,  $q_2 = 800$  y  $\Delta P_g$  variable)

flujo ascendente





VARIACION DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_+$

( $\Delta P_g = -100$ ,  $q_1 = 0$  y  $q_2$  variable)

CASO DE UN VIENTO FUERTE

flujo ascendente

$\theta_+(y_+)$

0.9

0.8

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

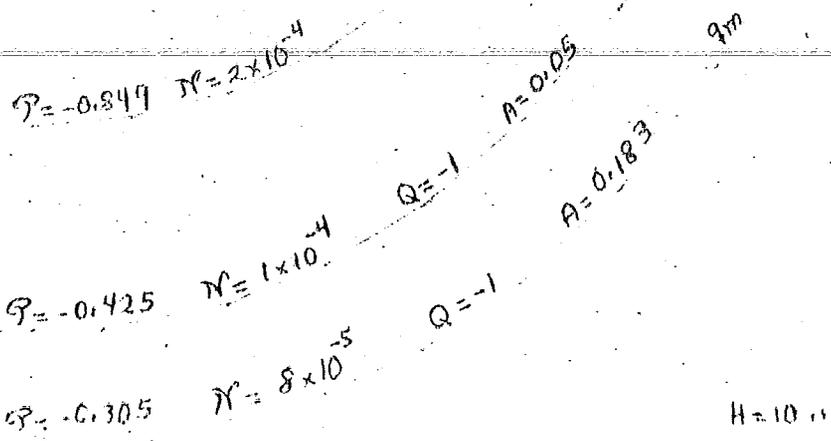
0

-0.1

-0.2

-0.3

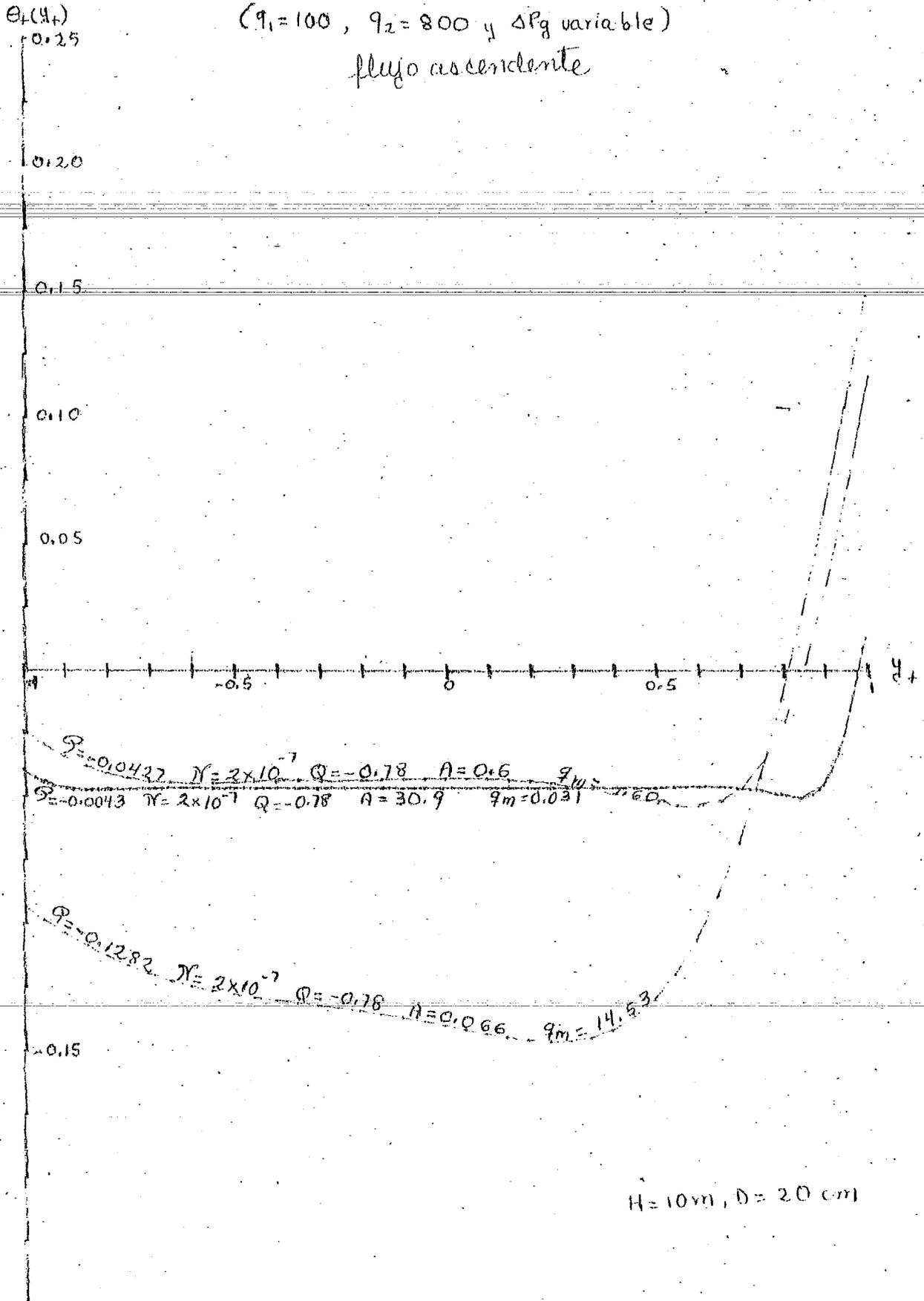
$y_+$



$H = 10 \text{ m}$ ,  $D = 6 \text{ cm}$

VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCIÓN DE  $y_+$   
 ( $\rho_1 = 100$ ,  $\rho_2 = 800$  y  $\Delta P_g$  variable)

flujo ascendente



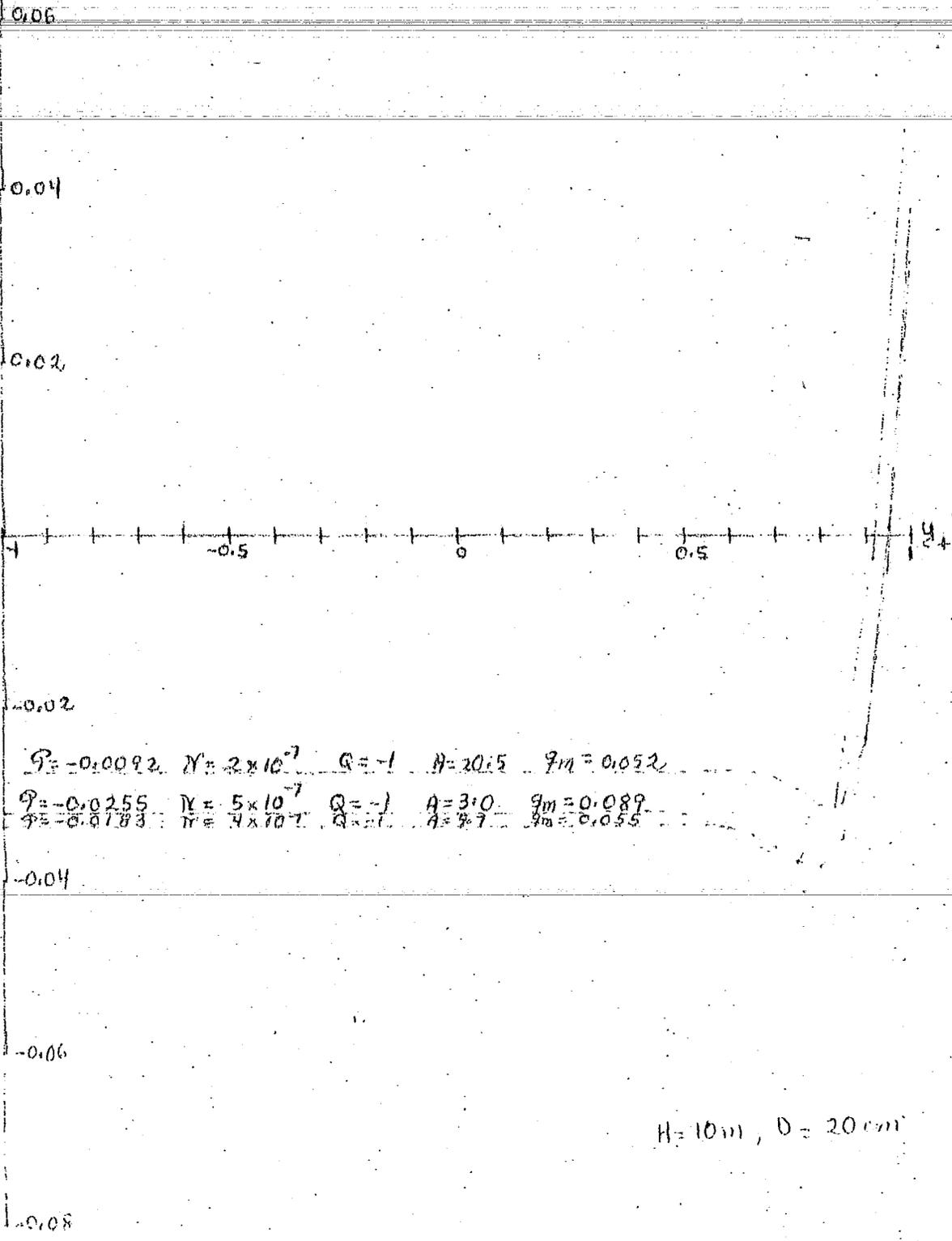
VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCIÓN DE  $y_+$

( $\Delta \rho g = -10$ ,  $\eta_1 = 0$  y  $\eta_2$  variable)

$\Theta_+(y_+)$   
-0.08

CASO DE UN VIENTO SUAVE

flujo ascendente



VARIACION DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_1$

( $\Delta P_g = -100$ ,  $q_1 = 0$  y  $q_2$  variable)

CASO DE UN VIENTO FUERTE

flujo ascendente

$\theta_1(y_1)$   
0.4

0.3

0.2

0.1

-1 -0.5 0 0.5 1  $y_1$

$\theta = -0.064$   $\gamma = 1 \times 10^{-7}$   $Q = -1$   $A = 0.183$   $q_m = 5.82$

-0.1

$\theta = -0.127$   $\gamma = 3 \times 10^{-7}$   $Q = -1$   $A = 0.05$   $q_m = 10.65$

-0.2

$\theta = -0.255$   $\gamma = 5 \times 10^{-7}$   $Q = -1$   $A = 0.02$   $q_m = 13.32$

-0.3

-0.4

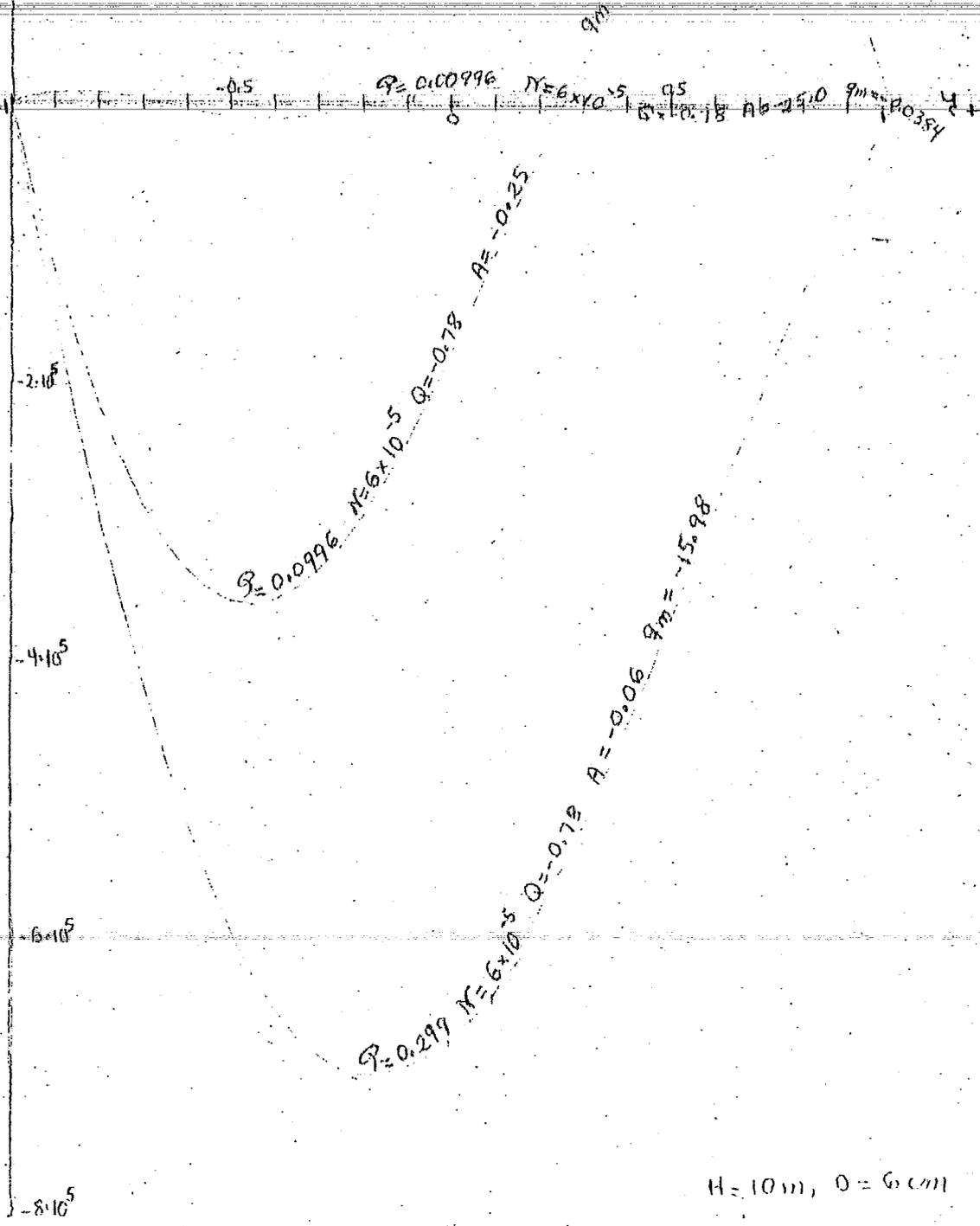
$H = 10 \text{ m}$ ,  $D = 20 \text{ cm}$

VARIACION DE LA VELOCIDAD ANIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_+$

( $\rho_1 = 100$ ,  $\rho_2 = 800$  y  $\Delta \rho$  variable)

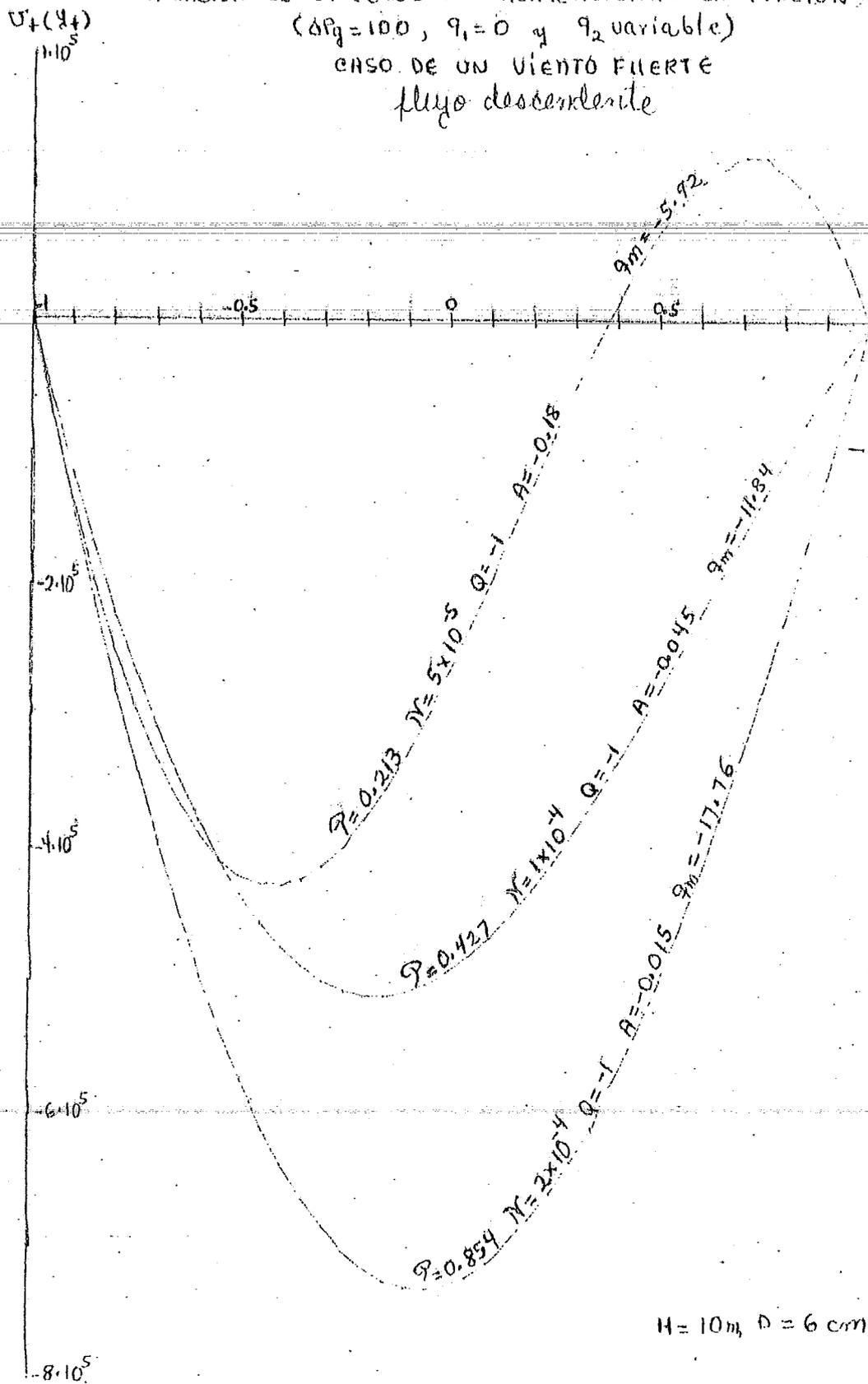
flujo descendente

$U_1(y_+)$   
 $2 \cdot 10^{-5}$

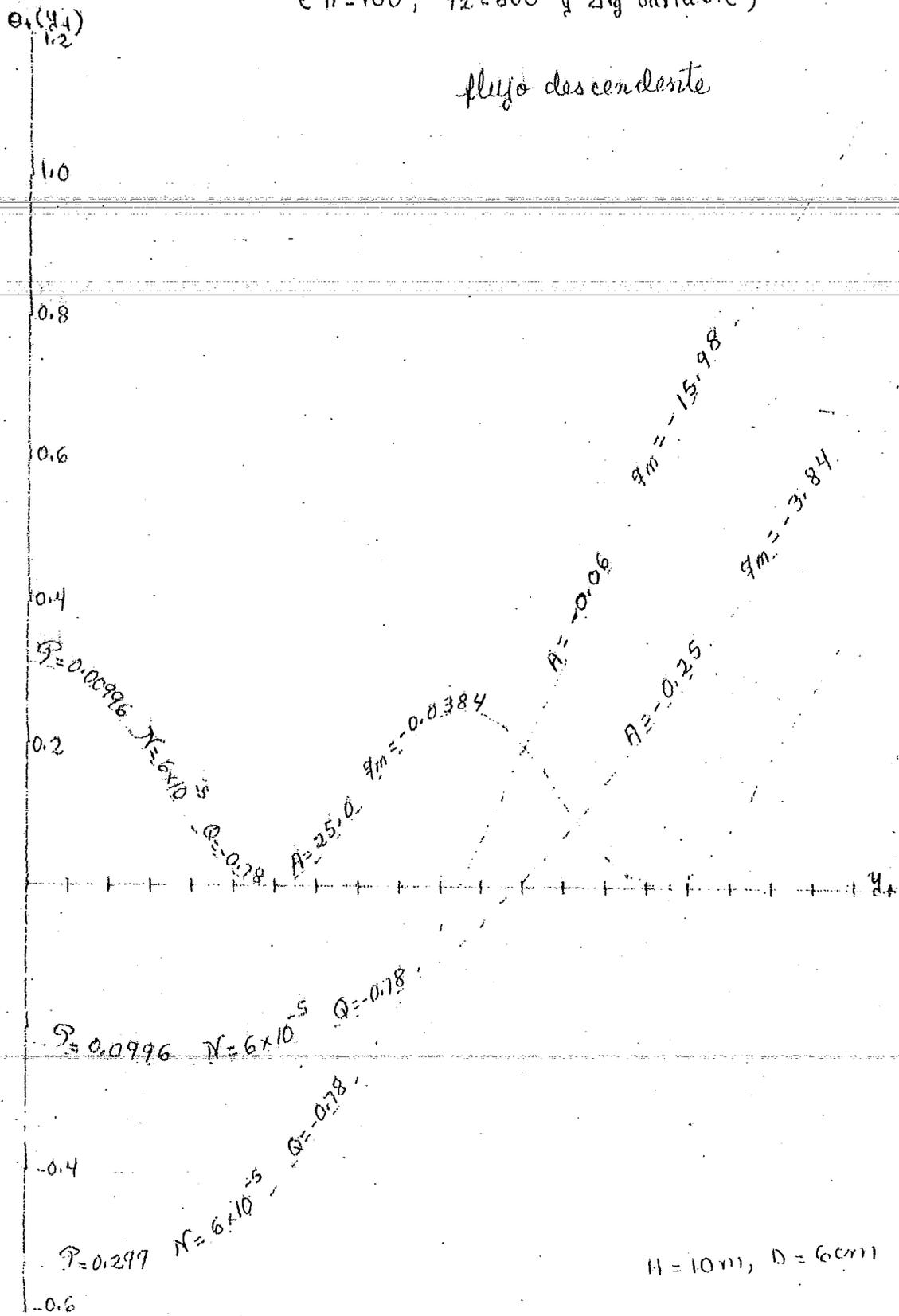


$H = 10 \text{ m}$ ,  $D = 6 \text{ cm}$

VARIACION DE LA VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $\gamma_1$   
 ( $\Delta P_0 = 100$ ,  $\gamma_1 = 0$  y  $\gamma_2$  variable)  
 CASO DE UN VIENTO FUERTE  
 flujo descendente



VARIACION DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $y_+$   
 ( $q_1 = 100$ ,  $q_2 = 800$  y  $\Delta q$  variable)



VARIACION DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL EN FUNCION DE  $\eta$

( $\Delta P_g = 100$ ,  $\eta_1 = 0$  y  $\eta_2$  variable)

CASO DE UN VIENTO FUERTE

flujó descendente

$\Theta_+(y_+)$   
1.2

1.0

0.8

0.6

0.4

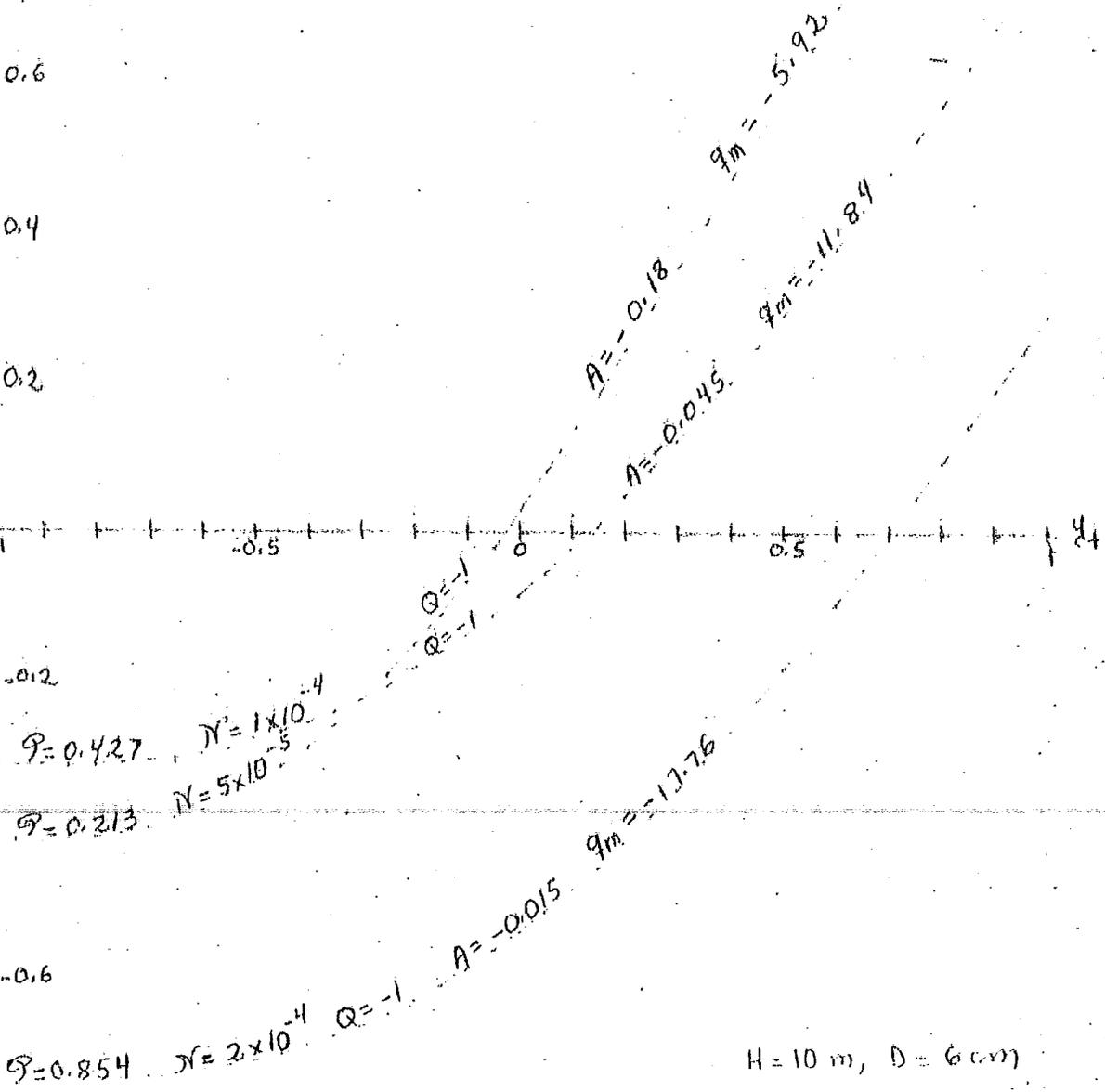
0.2

0.2

-0.6

-0.8

$\eta$  -0.5 0 0.5  $\eta$



$q = 0.427$      $N = 1 \times 10^{-4}$   
 $q = 0.213$      $N = 5 \times 10^{-5}$

$q = 0.854$      $N = 2 \times 10^{-4}$      $Q = -1$

$H = 10 \text{ m}$ ,  $D = 6 \text{ cm}$

## A P E N D I C E

Hay varios métodos para aproximar una función por polinomios. Uno de los más ampliamente usados es el referente a la fórmula de Taylor, y es el que aplicaremos aquí.

fórmula de Taylor:

$$f(x) = f(a) + f'(a) \frac{(x-a)}{1!} + f''(a) \frac{(x-a)^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(a) \frac{(x-a)^n}{n!}$$

$$+ f^{(n+1)}(\xi) \frac{(x-a)^{n+1}}{(n+1)!}$$

donde  $\xi$  está entre  $a$  y  $x$ .

La condición bajo la cual ésta se cumple es que  $f$  y sus  $n$  - primeras derivadas deben ser continuas en un intervalo cerrado que contenga a  $a$  y a  $x$ , y la  $(n+1)$ -ésima derivada de  $f$  exista en todos los puntos del correspondiente intervalo abierto. La fórmula puede ser escrita como

$$f(x) = P_n(x) + R_n(x)$$

$P_n(x)$  es igual a la suma de todos los términos menos el último, éste es  $R_n(x)$ .

$$R_n(x) = f^{(n+1)}(\xi) \frac{(x-a)^{n+1}}{(n+1)!}$$

$R_n(x)$  se llama el residuo, o la forma de Lagrange del residuo.

Ahora bien, si  $f$  es una función tal que  $f$  y todas sus derivadas existen en algún intervalo  $(a-r, a+r)$ . Entonces la función se representa por su serie de Taylor.

$$\sum_{n=0}^{+\infty} f^{(n)}(a) \frac{(x-a)^n}{n!}$$

para toda  $x$  tal que  $|x-a| < r$  si y sólo si

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} R_n(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f^{(n+1)}(\xi_n) \frac{(x-a)^{n+1}}{(n+1)!} = 0$$

donde cada  $\xi_n$  está entre  $x$  y  $a$ .

La serie infinita de Taylor es:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} f \frac{(n)}{n!}(a) (x-a)^n = f(a) + f'(a)(x-a) + f \frac{(2)}{2!}(a) (x-a)^2 +$$

$$+ \dots + f \frac{(n)}{n!}(a) (x-a)^n + \dots$$

cuando el caso especial de  $a=0$ , la serie de Taylor se transforma en la ecuación

$$\sum_{n=0}^{+\infty} f \frac{(n)}{n!}(0) x^n = f(0) + f'(0)x + f \frac{(2)}{2!}(0) x^2 + \dots + f \frac{(n)}{n!}(0) x^n$$

$$+ \dots$$

que es la serie de Maclaurin

La siguiente serie de Maclaurin representa la función para todos los valores de  $x$ :

$$\operatorname{sen} x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)!} = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

$$\operatorname{cos} x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{(2n)!} = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots$$

$$\operatorname{senh} x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \dots$$

$$\operatorname{cosh} x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!} = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + \dots$$

## B I B L I O G R A F I A

### CAPITULO I

- (1). Memoria del primer seminario internacional teórico -- práctico sobre sistemas de construcción en casas y -- edificios para el aprovechamiento de la energía solar. SAHOP-DIGAAS. Querétaro, Qro., Mayo 29 a Junio 2 de 1978.

### CAPITULO II

- (2). Energía, Medio Ambiente y Edificación. Philip Stead-- man. H. Blume Ediciones. Rosario 17. Madrid-5.

### CAPITULO III

- (3). Everardo A. Hernández. La distribución de la radia-- ción global en México evaluada mediante la fotointer-- pretación de la nubosidad observada por satélites me-- teorológicos. 2a. Edición. Instituto de Investigacio-- nes en Materiales. UNAM. (IIM-UNAM).
- (4). Everardo A. Hernández. Las coordenadas horarias de la trayectoria diaria del sol sobre el horizonte y su re-- presentación polar en la República Mexicana. 2a. Edi-- ción. IIM-UNAM. 1977.
- (5). Everardo A. Hernández y Rodolfo Martínez. La varia-- ción anual en México de la radiación solar directa so-- bre planos verticales orientados hacia los cuatro pun-- tos cardinales. 2a. Edición. IIM-UNAM. 1977.

### CAPITULO IV

- (6). A classification scheme for the common passive and -- hybrid heating and cooling systems. Michael I. Holtz, Wayne Place, Ronald C. Hammerud. 3rd. National Passi-- ve Solar Conference. San José California. January -- 11-13, 1979 Volume 3 pags. 282-289.

- (7). E. Hernández, L. del Castillo, R. Martínez, P. Fuentes. Factibilidad del aprovechamiento en México de la energía solar para satisfacer requerimientos habitacionales. IIM-UNAM.

#### CAPITULO V

- (8). Bioclimatic Approach to architecture. Victor Olgyay.
- (9). Everardo Hernández. Climatización eólico-solar de escuelas en climas cálido-húmedos. CONESCAL 48. Octubre-diciembre de 1978.

#### CAPITULO VI

- (10). A design and signing procedure for passive solar heated buildings. Edward Mazria. Passive Solar Buildings. SAND 79-0824 Unlimited Release. Printed July 1979. pags. 229-242.
- (11). Passive solar buildings. Sección I. Introducción. - Passive Solar Buildings. SAND 79-0824 Unlimited Release. Printed July 1979. pags. 11-17.
- (12). Architecture Solaire. Balcomb. Ed. Academis Press.

#### CAPITULO VII

- (13). Architecture solaire et environnement climatique en Iran por Farzaneh Djalili-Teherani. Année Universitaire 1977-1978.
- (14). Passive cooling systems in hot arid regions. Mehdi N. Bahadori. Fifth course on solar energy conversion. 6-9 August 1978. Universidad de Waterloo.
- (15). Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. -- Mehdi N. Bahadori. Scientific American. February -- 1978. pags. 144-154.

#### CAPITULO VIII

- (16). Climatization par evaporation d'eau et energie solaire. Diplome d'etudes approfondies physique de L'energie. Rapport de Stage. Anne-Marie Conseil: - Universite Paris VII. Septembre 1977.

(17). Mécanique des fluides et transferts de chaleur et de masse par convection. A. Fortier. Masson et cie. -- 1975.

(18). Climatización de L habitat para L energie solaire. - Etude plus particuliere de L humidification et du tiraje naturel. Isabelle Hurpy. These de 3eme cycle. Universite Paris VII.

(19). El cálculo con geometría analítica de Leithod. 2a. - Edición. Harla, S.A. de C.V.