

01178
2
20j
ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
SECRETARIA DE EDUCACION

**EL COLECTOR SOLAR PLANO
UNA APLICACION EN PISCICULTURA**

FERNANDO LAZCANO SERRANO

TESIS

**Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la**

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**como requisito para obtener
el grado de**

MAESTRO EN INGENIERIA

ENERGETICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, _____ DE _____ DE 1987.

TESIS CON
FALTA DE GRADO



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.

RESUMEN

En la presente tesis se propone el uso de la radiación solar en la incubación de peces, principalmente en instalaciones acuícolas ubicadas en latitudes con clima templado y que intenten cultivar especies de aguas cálidas.

Con la idea de que el presente trabajo permita diseñar sistemas de colectores solares planos, se incluyen los conceptos necesarios y suficientes para la comprensión y manejo de las disciplinas que intervienen en la captación y conversión fototérmica de la energía solar.

Se estudian tres distintos colectores solares planos con elemento absorbedor de plástico. En base a los prototipos construidos, se ejemplifica el uso de la información contenida en la tesis mediante el diseño y evaluación económica de un sistema solar a utilizarse en una incubadora existente en el Cinvestav Unidad Mérida.

De los resultados obtenidos se concluye que la alternativa solar es perfectamente aplicable a la acuicultura y, que además, tiene notables ventajas económicas respecto a las formas de energía comerciales.

Por otra parte se confirmó la necesidad de investigación básica y desarrollo tecnológico en el área solar, tanto en instrumentación como en materiales e información estadística.

INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
Capítulo	
I EL AGUA Y SU TEMPERATURA EN PISCICULTURA	7
1.1 La temperatura y la especie cultivada.	7
1.2 Las temperaturas letales	9
1.3 La temperatura y el crecimiento de los peces . 12	
1.4 La temperatura y el oxígeno en el agua 15	
1.5 Los metales en el agua para piscicultura . . . 19	
II LA ENERGIA SOLAR	20
2.1 Origen y características.	20
2.2 La relación Tierra-Sol.	21
2.3 Angulos Solares	24
2.4 Su intensidad y distribución en la República Mexicana	36
III EL COLECTOR SOLAR PLANO	39
3.1 Componentes y características del colector solar plano	40
3.2 Los colectores propuestos	42
3.3 Comportamiento fototérmico	49
IV LA INCUBADORA	58
4.1 Diseño propuesto	59

4.2 Energía requerida al sistema solar.	62
4.3 Dimensionamiento del sistema solar.	66
V ASPECTOS DE INGENIERIA ECONOMICA	87
5.1 Conceptos y fórmulas de interes	87
5.2 Métodos de análisis económico de alternativas	91
5.3 Evaluación de las alternativas propuestas	93
VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS.	109
ANEXO A LA TEMPERATURA AMBIENTE	114
ANEXO B LA TRANSFERENCIA DE CALOR	116
ANEXO C LA EVAPORACION DE AGUA EN ESTANQUES	122
ANEXO D TABLAS ACUICULTURALES.	125
ANEXO E PROGRAMA DE COMPUTO.	131
ANEXO F MAPAS DE RADIACION SOLAR INSTANTANEA.	138

INTRODUCCION

La radiación solar, de la cual el petróleo, la biomasa, el viento, etc., son algunas de sus manifestaciones, ha sido por siempre nuestra principal fuente de energía. Las otras dos fuentes de energía, la propiciada por las altas temperaturas del núcleo terrestre, denominada energía geotérmica y, la generada por la fisión y fusión de núcleos de elementos, llamada energía nuclear, no han influido de manera apreciable en el clima ni en la evolución de los seres vivos como lo sigue haciendo el Sol. Por ejemplo, los peces han evolucionado de forma tal, que se han adaptado a las variaciones diarias y anuales de la intensidad de la radiación solar y la utilizan eficientemente en su ciclo de vida. Las temperaturas que requieren los peces en la etapa de incubación, en la generalidad de las especies no son superiores a los 35 C. Estas temperaturas son perfectamente viables de obtener mediante los dispositivos de captación de energía solar disponibles actualmente.

En el presente trabajo se propone el uso de la energía solar en la acuicultura, entendiéndose ésta como el cultivo de animales acuáticos bajo condiciones controladas. Se estima que el uso de esta forma de energía permitirá abatir costos de producción. Se sugiere

utilizarla en la etapa de incubación de los peces y se plantea la posibilidad de aplicarse a todo el ciclo de esta actividad denominada Piscicultura, rama de la Acuicultura que trata del cultivo de peces comestibles.

Se propone utilizar esta forma de la energía en las instalaciones piscícolas ubicadas en zonas geográficamente templadas y/o frías que se dedican o desean dedicarse al cultivo de especies de aguas dulces estancadas (lénticas), semicálidas y cálidas. Pueden tomarse como prototipos al Bagre y Carpa.

Se expondrán los aspectos básicos necesarios y suficientes para entender y dimensionar sistemas de conversión y uso fototérmico de la energía solar. Los dispositivos que se propondrán para la captación y conversión fototérmica de la energía solar serán:

- 1) Colector Solar plano de manguera de polietileno negro en espiral,
- 2) Colector Solar plano autocontenido de manguera de polietileno en arreglo reticular,
- 3) Colector solar plano autocontenido de estanque somero.

En estos tres tipos de colector solar plano se basarán las consideraciones termodinámicas, de transferencia de calor y económicas. Los tres colectores prototipo se construyeron y caracterizaron en las instalaciones del CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN,

UNIDAD MERIDA.

Se propone el uso del calor del Sol como una manera de ahorrar y diversificar nuestras fuentes de energía. Como alternativa a considerar en lugares en que las formas tradicionales de energía sean caras, escasas o inaccesibles. Se propone su uso porque en México se cuenta tanto con el recurso energético como con la base técnica y científica suficientemente desarrollada en esta actividad (5,6). Desde 1945 en México se han fabricado dispositivos solares (3,8), y en la actualidad diversas instituciones y centros de investigación dedican parte de sus recursos al desarrollo tecnológico de las fuentes alternas de energía (10).

Por otra parte, al usarse a la energía solar como fuente calefactora, la Piscicultura, que se practica en México desde antes de la conquista, se vería beneficiada, principalmente en el aspecto económico. La acuicultura ha recibido impulso en repetidas ocasiones, desde finales del siglo XVIII a través de Antonio Alzate y de Esteban Chazarí, hasta que recientemente, en 1982, se convirtió en Secretaría de Pesca el hasta entonces Departamento de Pesca. El interés estatal (39), ha sido motivado en gran parte por los trabajos de divulgación de Fernando Obregón (1,7). El potencial de la acuicultura como productora de alimentos es importante, en 1984, la piscicultura produjo 144,039 toneladas, representando el 12.7% de la

producción pesquera a nivel nacional (4).

La disponibilidad de agua superficial y de cuerpos de agua propicios para la piscicultura en el territorio nacional es sobresaliente (2.6 millones de hectareas) (13). Asimismo, la insolación es particularmente intensa en casi todo el territorio nacional (2,16,18,19,21,22), llegando a ser de hasta 1000 W/m² en algunas regiones del país.

La piscicultura de especies de aguas cálidas representa una alternativa viable para el mejor aprovechamiento de estos recursos naturales en si mismos, así como para colaborar en la mejoría de la producción interna de alimentos y en la elevación del nivel socioeconómico de los habitantes de las zonas rurales de nuestro país.

Se intenta que la presente tesis sea un manual completo en si mismo. Que motive y facilite el uso de la energía solar en las actividades piscícolas desarrolladas en latitudes en que aún teniendo alta insolación, la temperatura media del los estanques no rebasan los 20 C. Tal es el caso de la zona montañosa del Estado de México, El Bajío y Chiapas, en donde se cultiva la Carpa y, algunas veces, la baja temperatura representa un problema para la incubación. Con esta premisa, en el capítulo I se revisan las propiedades físicas del agua de interés y su vinculación con la temperatura. En el

capítulo II se dan los elementos teóricos y prácticos necesarios para cuantificar la energía solar disponible en la localidad elegida. Posteriormente, en el capítulo III, se detallan los principios esenciales para el diseño y construcción de los sistemas propuestos de captación y conversión termodinámica de la energía solar. Lo anterior permitirá conocer y predecir el comportamiento térmico tanto de los colectores solares como del sistema de incubación en su conjunto. En los anexos se incluye un programa de cómputo que permitirá realizar esta actividad mas fácilmente. Complementando la triada fuente-tecnología-uso final, como ejemplo de aplicación de la teoría contenida en esta tesis, en el capítulo IV se diseña el sistema de calefacción para una de las incubadoras existentes en el Departamento de Recursos del Mar del propio CINVESTAV MERIDA. El capítulo V es un breve ensayo económico que nos permitirá analizar, bajo el frío signo del dinero, la conveniencia de instalar, o no, el sistema solar de incubación propuesto. En los anexos se incluyen algunos temas complementarios tales como: Un modelo para estimar la temperatura ambiente instantánea, en el anexo A; conceptos indispensables de transferencia de calor, en el anexo B; en el anexo C, se muestra el balance de calor y masa en la interfase agua-aire, y la expresión deducida para estimar las pérdidas de energía a consecuencia de la evaporación del agua; el

anexo D incluye las tablas de acuacultura que complementan al capítulo I; el programa de cómputo utilizado en el diseño y simulación del comportamiento térmico del sistema de incubación se incluye en el anexo E; en el anexo F aparecen los útiles mapas de radiación solar instantánea de la República Mexicana, elaborados por el Dr. Jose Luis Fernández Zayas.

Se agradece al Dr. Alonso Fernández González, director del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, la oportunidad y apoyo brindado en el desarrollo y logro de la presente tesis; así como al personal de las Secciones de Cómputo y servicios de apoyo por su gentil colaboración. También, al Dr. Salvador Cruz Jiménez se le agradecen sus importantes sugerencias, al Dr. José Luis Fernández sus enseñanzas, al Dr. Alejandro Flores la revisión de los conceptos acuaculturales y al Dr. Manuel Martínez la acertada dirección de este trabajo.

CAPITULO I

EL AGUA Y SU TEMPERATURA EN PISCICULTURA

1.1 LA TEMPERATURA Y LA ESPECIE CULTIVADA

El agua es el medio de vida de una gran variedad de organismos de importancia comercial, y en él realizan sus funciones metabólicas esenciales, tales como el intercambio gaseoso, balance iónico y la eliminación de excretas, factores que se ven influenciados determinadamente por la temperatura; por lo que la cantidad, calidad y temperatura del agua disponible, determinará la capacidad productiva del sistema piscícola. Mantener la calidad del agua, conforme a los requerimientos de la especie cultivada, deberá ser una preocupación constante si se desea rentabilidad de la inversión. En lo sucesivo se entenderá como agua de buena calidad, a la que es capaz de mantener en óptimas condiciones fisiológicas al organismo deseado y que permite cubrir las normas sanitarias vigentes para lograr los máximos beneficios económicos.

En acuicultura es básico el conocimiento y control de los factores que afectan al sistema pez-agua. Estos pueden ser de tipo ecológico tales como: el clima, el tipo de suelo, escurrimientos, etc.; fisicoquímicos: como el oxígeno disuelto, la acidez, la temperatura, la

transparencia, etc.) así como biológicos: como los hábitos alimenticios, el comportamiento reproductivo, las enfermedades, etc.. Una especie puede prosperar fuera de la región de la que es nativa, con la condición de que los factores anteriores sean similares a los de su habitat original, o que su adaptabilidad a otros medios sea elevada. Es en el anterior principio sobre el que se basa la producción controlada de peces. La Acuicultura tiene como finalidad adecuar el medio de cultivo a las necesidades de la especie que se intenta cultivar. En las tablas I y II del anexo D, se enlistan las especies que se cultivan en México así como su distribución de acuerdo a las características del habitat.

En el presente trabajo nos ocuparemos de la temperatura del agua para peces de agua dulce estancada (léntica). También revisaremos el efecto de la temperatura en los demás parámetros fisicoquímicos y biológicos de interés; con énfasis en las etapas de incubación y alevinaje.

A diferencia de un sistema abierto (sin control del flujo de agua), en el que el principal factor limitante será la cantidad de alimento disponible; en sistemas de agua estancada, su calidad y temperatura determinará la cantidad de organismos que podrán concentrarse por unidad de superficie y/o volumen, lo que a su vez determinará la intensidad del cultivo. En los sistemas fertilizados,

esto es, en donde se propicia el crecimiento de fitoplancton y zooplancton mediante la adición de compuestos orgánicos e inorgánicos llamados fertilizantes o, en los que se suministra alimento artificial, el principal factor limitante tiende a ser la concentración de oxígeno disuelto y, eventualmente, la contaminación causada por los productos de excreción, principalmente amonio.

Como puede verse, cada sistema de cultivo tiene problemas inherentes, pero independientemente del método elegido, en todos ellos la temperatura será un factor de importancia vital, del cual dependen todos los demás.

1.2 LAS TEMPERATURAS LETALES

Como se mencionó, la temperatura es uno de los factores más importantes del medio acuícola, debido a sus efectos directos sobre los procesos metabólicos tales como: apetito, reproducción, incubación, crecimiento, desarrollo gonádico etc.; así como sobre la concentración del oxígeno disuelto y turbidez del agua.

Todas las especies presentan límites letales de temperatura máxima y mínima, los cuales obviamente deberán evitarse. Es igualmente importante dotar a los organismos de la temperatura óptima para su crecimiento, conversión alimenticia y reproducción.

Para cada especie existe una temperatura mínima, debajo de la cual sobreviene la muerte del pez. Conforme

se calienta el agua, su metabolismo se ve beneficiado. Sin embargo, la relación es raramente lineal. En cierta temperatura, conforme ésta se incrementa, se obtiene un punto máximo llamado rango óptimo; seguido por un período de disminución en la conversión alimento-peso y de la producción si la temperatura continúa incrementándose. Este período de decaimiento usualmente continúa hasta que sobreviene la muerte.

Como ejemplo tenemos a la Carpa de Israel, cuyo rango de desarrollo ^{óptimo} va, de los 23 a los 30 C. A los 15 C ya no mantiene su ritmo de crecimiento, a los 13 C deja de comer con voracidad y, por debajo de 5 C no come; en cambio, con el agua a 25 C consume el alimento satisfactoriamente. Como se hizo notar en el párrafo anterior, arriba de su temperatura óptima, en este caso 30 C, la conversión de alimento en pesos disminuirá.

Los efectos de la temperatura en los peces pueden ser resumidos gráficamente de manera general y cualitativa como se muestra en la figura 1.1. La línea exterior muestra la máxima temperatura que el pez tolerará, la del interior (punteada), es la temperatura límite que el pez tolerará indefinidamente. Esta define la frontera de las zonas de tolerancia y resistencia. Dentro de la zona de tolerancia existen varios niveles de tensión que el pez puede soportar; sin embargo estos limitan su actividad y reducen su tasa de

crecimiento y su eficiencia de conversión alimenticia. El romboide interior que define los limites de temperatura para la reproducción, indica que las temperaturas causan poca tensión o no la producen del todo.

En la tabla III del anexo D se dan algunas temperaturas letales para los peces, en función de la temperatura de aclimatación.

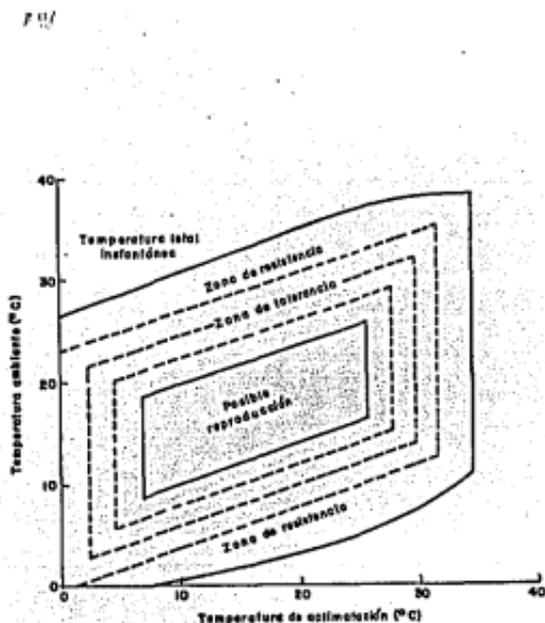


Figura 1.1.-Diagrama esquemático de la relación de temperatura para un pez (40).

En todo diseño de una instalación acuicultural, deben tenerse presente tres características térmicas de los peces : El punto de muerte térmica, la temperatura de aclimatación y la temperatura de choque. Así como la climatología del sitio seleccionado para su ubicación. Como las especies difieren en sus requerimientos térmicos, en la etapa previa a la instalación deberá tenerse en cuenta a la especie a cultivar para determinar el sitio adecuado o, si la planta ya existe, adecuarla o seleccionar la variedad conveniente. Ejemplo de estas especies y sus requerimientos térmicos se encuentran en las tablas IV y V del anexo D.

1.3 LA TEMPERATURA Y EL CRECIMIENTO

La influencia de la temperatura sobre la reproducción de cualquier organismo acuático está unida al efecto de la temperatura sobre reacciones químicas, puesto que la mayoría de los procesos biológicos se llevan a cabo como una serie de reacciones catalizadas por enzimas. Las reacciones químicas generalmente se ven favorecidas conforme aumenta la temperatura. Hasta llegar a un valor tal que los compuestos químicos son inestables en los organismos vivos y se desactivan. Estos hechos ayudan a explicar las curvas características temperatura-producción, presentadas por la mayoría de los organismos. La interpretación gráfica de estos conceptos puede observarse en la figura 1.2.

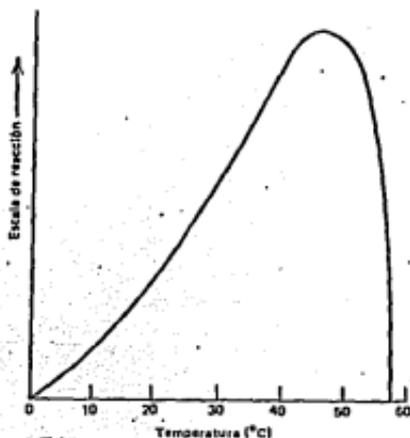


Figura 1.2.-Efectos típicos de la temperatura sobre una reacción catalizada por enzimas (40).

A temperaturas bajas, ciertas reacciones químicas críticas necesarias para la vida no ocurrirán o, si se presentan, lo hacen en tan baja proporción que no son suficientes para mantener la vida. Este punto determina la temperatura mínima a la cual los organismos pueden vivir. Con el ascenso de temperatura, las reacciones químicas se producen más rápidamente, permitiendo crecer a los organismos. A determinada temperatura existe la suficiente energía interna como para comenzar a descomponer ciertos compuestos químicos necesarios para la vida del organismo. Esto reduce la efectividad de las reacciones químicas catalizadas, lo que se traduce en

una disminución de la tasa de crecimiento. También algunos compuestos químicos necesarios se descompondrán completamente causando la muerte del organismo. Muchas enzimas empiezan a perder sus propiedades características aproximadamente a los 35 C, y las pierden completamente antes de que la temperatura llega a los 60 C. Ver figura 1.2. Las reacciones químicas determinan en gran medida el metabolismo en poiquilotermos (organismos de sangre fría, de los cuales el pez es uno de ellos) y, por lo tanto, ^{son} importantes para las consideraciones de tensión y muerte térmica.

Como los sistemas piscícolas tienen como objetivo la recuperación económica máxima, los peces deberán ser sometidos a la mínima o nula tensión térmica; esto es, intentar proporcionarles siempre la temperatura óptima para su desarrollo.

Es difícil medir directamente este efecto o tensión térmica causado por la temperatura en los peces. Por lo mismo, se han usado métodos indirectos tales como reflejos, apetito o comportamiento reproductivo. Uno de éstos mide la velocidad máxima sostenible de nado en un pez a varias temperaturas del agua. A la temperatura que le permita al pez la máxima velocidad, se le considera como la temperatura inmediata inferior al inicio de la tensión térmica. Otro método consiste en la medición del consumo de oxígeno. Ver figura 1.3.

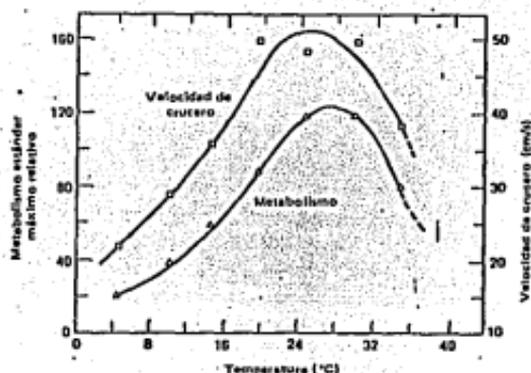


Figura 1.3.-Comparación de la tasa de metabolismo estándar máximo y la velocidad de crucero de la Carpa Dorada (40).

Recordando el aspecto de máximo beneficio económico y, dado que la comida para los peces es un artículo costoso, otra base de comparación para estimar la tensión térmica es la tasa de conversión y/o la proporción de crecimiento a diferentes temperaturas y porcentajes de dieta alimenticia. La figura 1.4 muestra un comportamiento típico.

1.4 LA TEMPERATURA Y EL OXIGENO EN EL AGUA

El contenido de oxígeno en el agua saturada de aire depende de la temperatura y la salinidad (o clorinidad). A una temperatura constante la saturación de la concentración de oxígeno está relacionado linealmente

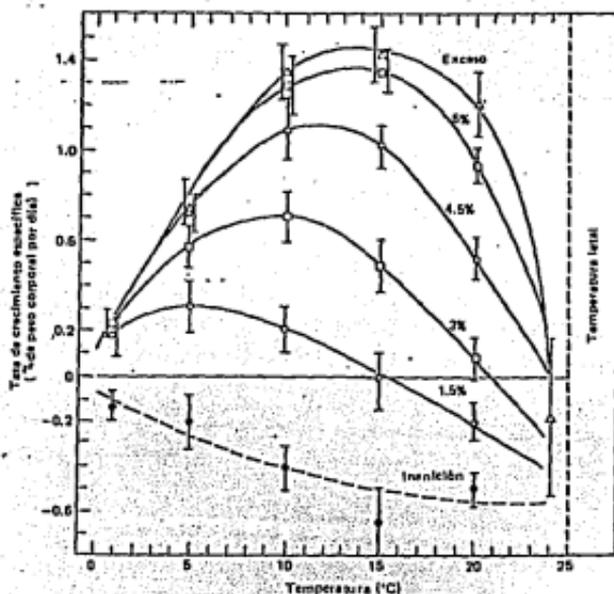


Figura 1.4.-Efecto de la cantidad de comida (en % de peso corporal por día) sobre la relación entre tasa de crecimiento y temperatura para el salmón entre 7 y 12 meses de edad (40).

con la clorinidad. Sin embargo, conforme la temperatura se incrementa disminuye la pendiente de la gráfica de la clorinidad en relación con la concentración de oxígeno. La concentración de oxígeno contra las curvas de temperatura a una clorinidad constante muestran un trazo lineal aproximado sobre papel semilogarítmico como puede observarse en la figura 1.5.

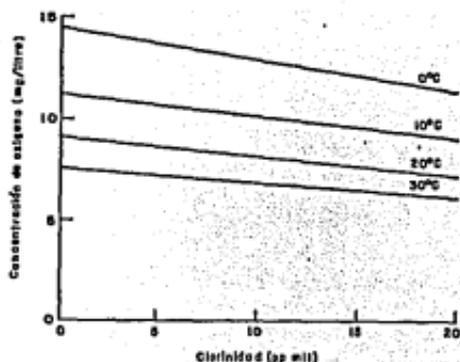


Figura 1.5 .-Concentración de saturación de oxígeno del agua en contacto con el aire a varias temperaturas y clorinidades del agua (40).

La razón de transferencia de oxígeno del aire al agua depende principalmente de la temperatura así como de la salinidad, grado de saturación y de la turbulencia de la interfase aire-agua. La temperatura, salinidad y la proximidad a la saturación del agua influye en el gradiente de concentración. La turbulencia en la interfase aumenta el área de contacto aire-agua. Esto explica porque al agitar la superficie, burbujear aire o provocar caídas libres, la concentración de oxígeno se incrementa en nuestro sistema de incubación.

Las concentraciones de oxígeno en el agua, así como la de otros gases y sustancias, se miden en partes por millón, o lo que es lo mismo mg/lit.

La temperatura del agua tiene una gran influencia sobre las necesidades de oxígeno de los peces, ya que

como vimos son poiquiloterms, lo que significa que su temperatura corporal es esencialmente la misma que el medio que habitan, su metabolismo controlado por enzimas se ve fuertemente influenciado. A mayor temperatura mayor actividad fisiológica y por ende un requerimiento mayor de oxígeno. La figura 1.6 explica gráficamente este fenómeno.



Figura 1.6.-Gráfica hipotética para ilustrar el principio de dependencia respiratoria en peces (40).

Si bien los peces están adaptados para extraer del agua oxígeno que se encuentra en bajas concentraciones. Las concentraciones que requieran dependerán de su característica genética, de la temperatura del agua y de los compuestos químicos en suspensión. En general, aguas con concentraciones menores a las 3 ppm no sustentarán a los peces. Consecuentemente, si se desea aumentar la densidad de población en el estanque, será necesario proceder a aerear el medio ya sea por agitación de la

superficie, burbujeo, caídas de agua, o bien la oxigenación (oxígeno puro o aire enriquecido); lo cual permitirá elevar la productividad.

1.5 LOS METALES EN EL AGUA PARA PISCICULTURA.

Se propone que los colectores solares usados en la piscicultura no sean metálicos, o que si lo son, se utilice un ciclo cerrado en el sistema de captación y que el calor sea transferido a la incubadora por algún medio indirecto. Se propone que esto sea así porque al circular el agua por los tubos se forman sales metálicas en cantidades perjudiciales. Las del cobre, que es el metal más usado, en concentraciones superiores a las toleradas por los peces (ver tabla VI del anexo D), en ocasiones causan coagulación, precipitación de mucus y daño en los tejidos de las agallas. La coagulación trae como resultado una reducción en el intercambio de gases en las agallas, falta de oxígeno en los tejidos y la muerte. Cuando el efecto de las sales metálicas no es suficiente para causar la hipoxia (falta de oxígeno) fatal, las lesiones en las agallas reducen la resistencia del pez a las enfermedades. La combinación de cobre, zinc, alta temperatura y como consecuencia poco oxígeno disuelto en el agua, incrementa grandemente la tasa de mortalidad cuando *A. Licuifasciens* está presente. Los peces infectados por esta bacteria presentan aletas en estado de putrefacción, úlceras externas y daños musculares (35)

CAPITULO II

LA ENERGIA SOLAR

No obstante que nuestro sol no es sino una modesta estrella entre los millones y millones de astros semejantes que pueblan el Universo, una infima parte de la enorme cantidad de energia radiada basta para sostener la vida en nuestro planeta. En el presente capitulo veremos el origen y magnitud de su energia, asi como los factores que modifica su intensidad constantemente durante el día y a través del año, antes de que podamos captarla. Asimismo, estudiaremos la relación Tierra-Sol, los diversos ángulos que forma la radiación solar respecto a las superficies, la manera de estimarla y/o medirla, mediante las tablas de insolación y los instrumentos más usuales que se han creado con este fin.

2.1 ORIGEN Y CARACTERISTICAS

El Sol es una esfera de gases incandescentes, formado esencialmente de Hidrógeno (81.76 %) y Helio. Actualmente se acepta que el origen de la energía radiada por las estrellas está en la conversión de materia en energía mediante procesos termonucleares de fusión. Estos fenómenos físicos, consisten básicamente en la formación de núcleos de helio a partir de núcleos de hidrógeno. Se

estima que existen dos secuencias posibles, (Bothe, 36). Una de ellas se denomina cadena protón-protón, con una probabilidad de ocurrencia del 99.75% y a la otra se le llama ciclo del carbono. El análisis detallado de las reacciones termonucleares que se efectúan en el interior del Sol pueden consultarse en la referencia (36). Ambos ciclos tienen como resultado neto la transformación de 580×10^6 Ton de hidrógeno en 583.7×10^6 Ton de helio por segundo. La masa faltante, 4.3×10^6 Ton (0.726 % del total), es convertida en energía según lo predice la ecuación de Einstein $E = Mc^2$, en donde M es la masa en kg y c es la velocidad de la luz, igual a 3×10^8 m/s. De aquí que la energía emitida por el Sol sea de 3.8×10^{26} W, de la cual la Tierra recibe 1.75×10^{17} W. Con auxilio de la ecuación de Stephan-Boltzman que predice la energía radiada por un "cuerpo negro" en función de su temperatura superficial $E = \sigma T^4$, en donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴; se obtiene que la temperatura efectiva del Sol es de 5776 K.

2.2 LA RELACION TIERRA - SOL

La radiación solar viaja a través del espacio a razón de 2.9979×10^8 m/s, tardando en recorrer la distancia media de 149.5×10^6 km que separa al Sol de la Tierra, aproximadamente 8 minutos. Esta distancia no es constante, cambia durante el año de 152×10^6 km a 147×10^6 km.

km. La separación máxima entre el Sol y la Tierra, afelio, se da alrededor del 2 de julio. La más cercana, llamada perihelio, ocurre aproximadamente el 2 de enero.

Como resultado de la permanente variación en la distancia Tierra-Sol, la radiación recibida en la parte externa de la atmósfera terrestre, denominada "constante solar", no lo es en lo absoluto. El valor de la constante solar G_0 aceptado actualmente es de $1370 \text{ W/m}^2 \pm 3.4 \%$.

La Tierra en su movimiento de translación alrededor del Sol, describe una trayectoria de forma elíptica contenida en un plano imaginario denominado Eclíptica. El eje de rotación terrestre tiene una inclinación constante, respecto a una normal a la eclíptica, de 23.45 grados. La posición inclinada del eje de rotación terrestre tiene una profunda trascendencia, da origen a las estaciones así como a la longitud variable del día y la noche. En combinación con la rotación diaria y la translación anual, propicia la distribución de la energía solar en el planeta. La figura 2.1 muestra de manera simple la relación Tierra-Sol; la figura 2.2, destaca las fechas importantes producto de los movimientos relativos Tierra-Sol y la figura 2.3, las regiones terrestres definidas por la inclinación del eje de rotación respecto al plano de la eclíptica.

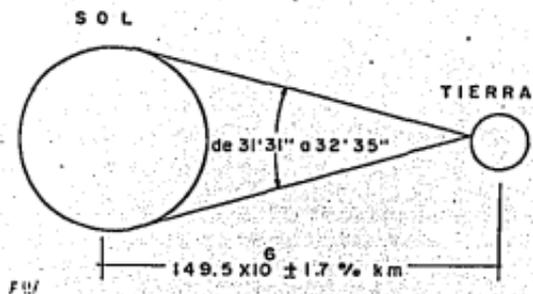


Figura 2.1 Relación Tierra Sol.

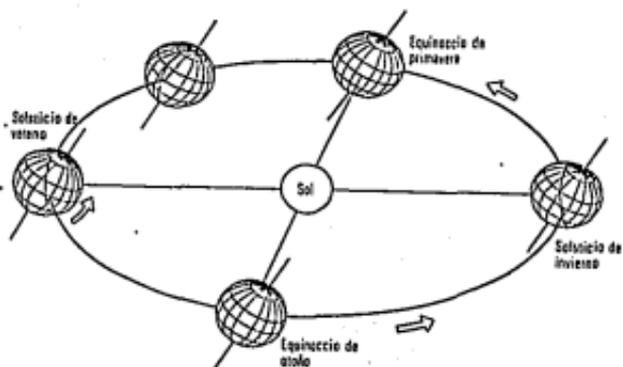
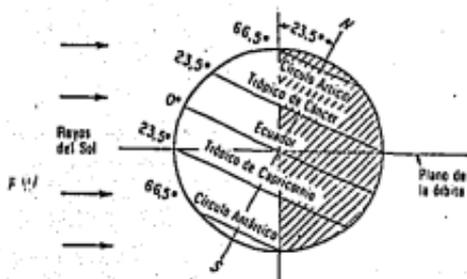


Figura 2.2 Traducción y rotación terrestres.



Posición de la tierra en relación a los rayos solares en la época del solsticio de invierno.

Figura 2.3 Regiones térmicas terrestres generadas por la inclinación del eje de rotación.

2.3 ANGULOS SOLARES

Comenzaremos por definir nuestra escala del tiempo. Todas las relaciones subsecuentes estarán referidas a la hora solar. Nuestro medio día sera el momento en que el Sol, en su movimiento aparente ocasionado por la rotación de la Tierra, cruce por el meridiano local. El meridiano local de cualquier punto sobre la tierra, es el plano vertical que contiene al eje norte-sur terrestre. O desde otro punto de vista, es la mitad del tiempo transcurrido entre la salida y puesta del Sol, cuando éste alcanza el punto más alto respecto al horizonte. Las horas se contarán a partir del medio día, positivas para la mañana

y negativas para la tarde. Ver figura 2.4.

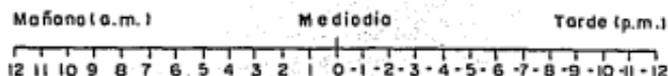


Figura 2.4 Escala de tiempo solar.

El primer ángulo que definiremos será el ángulo horario solar w . El Sol, en su recorrido aparente por el firmamento describe un ángulo plano que se mide respecto al meridiano solar (mediodía), al cual se le denomina Ángulo Horario Solar w . Ver la figura 2.5. Una hora corresponde a $\pi/12$ rad, 15 grados de desplazamiento angular. Al igual que las horas, w adquiere valores positivos al este del sur (por la mañana), y negativos al oeste del sur. El valor numérico de quince grados por hora se basa en el hecho de que aparentemente el Sol efectúa un giro (360 grados) alrededor de la Tierra en 24 horas. Con t en horas se cumple (9,24):

$$w = 15 * t \quad (\text{grados}) \quad (2.01)$$

Como recordaremos, el eje de rotación terrestre forma un ángulo de 66.55 grados respecto a la eclíptica, que combinado con la translación de la tierra, da origen a que aparentemente las trayectorias diarias del Sol se desplacen periódicamente durante el año 23.45 grados al norte y 23.45 grados al sur. Al ángulo formado por el

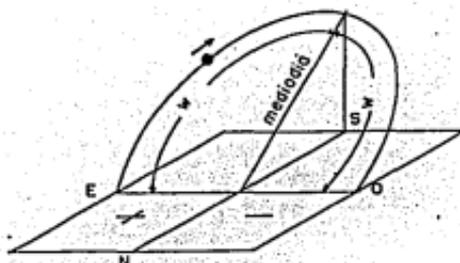


Figura 2.5 Ángulo horario solar w

vector Tierra-Sol y un plano que pase por el ecuador se le llama Ángulo de Declinación Solar S . O de forma equivalente, es el ángulo que forma al mediodía la radiación solar y el plano ecuatorial. Por convención S es considerado positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur. La declinación varía de 23.45 grados en el solsticio de verano, julio 22; a -23.45 grados en el solsticio de invierno, diciembre 22.

La declinación S , puede determinarse aceptablemente mediante la ecuación de (Cooper, 14).

$$S = 23.45 \text{ sen } (360 t (284+n)/365) \quad (2.02)$$

en donde n es el día del año = 1,2,3,...,365.

Dos ángulos nos permiten determinar la posición del Sol en el firmamento, la altura oc y el acimut solares ϕ . Ver figura 2.6. El ángulo ϕ , es el que forma la línea sur-norte en un determinado lugar y la proyección de un rayo solar sobre el plano horizontal. Define la distancia angular del Sol respecto del sur. Por convención, su

signo es positivo al este del sur (de 0 a 180 grados) y negativo al oeste (de 0 a -180 grados). Puede determinarse mediante la siguiente expresión (15,31):

$$\text{sen } \phi = \cos S \text{ sen } w / \cos \text{oc} \quad (2.03)$$

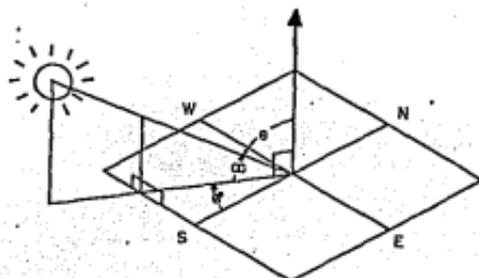


Figura 2.6 La altura oc y el acimut ϕ solares.

La altura solar oc, es el ángulo formado por un rayo directo del Sol y la tangente a la superficie terrestre en el lugar considerado. Puede verse como la distancia angular del sol respecto al horizonte. Se mide de 0 a 90 grados hacia el cenit, punto del cielo situado verticalmente sobre el lugar considerado. Con auxilio de la siguiente expresión oc puede calcularse con facilidad.

$$\text{sen } \text{oc} = \cos \theta \cos S \cos w + \text{sen } \theta \text{ sen } S \quad (2.04)$$

aquí, θ representa la latitud del lugar; S la declinación del Sol y w el ángulo horario definidos anteriormente.

Haciendo uso de las expresiones anteriores puede

calcularse la longitud del día, es decir, el número de horas en que el Sol es visible desde una posición dada. Haciendo $\alpha = 0$, valor de la altura solar para cuando el Sol se encuentra justo en el horizonte, se obtiene:

$$\cos w = -(\sin \theta \sin S) / (\cos \theta \cos S)$$

$$\cos w' = -\tan \theta \tan S \quad (2.05)$$

La expresión anterior define el ángulo horario al alba, w , al ocaso con el signo opuesto. El recorrido angular total del Sol en el día será $2w'$. Recordando que una hora equivale a 15 grados, la duración del día en horas será:

$$N = 2 * w' / 15 \quad (2.06)$$

sustituyendo la ecuación 2.05 en 2.06

$$N = (2/15) \text{ arc cos } (-\tan \theta \tan S) \quad (2.07)$$

Habiendo definido las expresiones que nos permiten determinar la posición del Sol en el cielo y la duración del día; a continuación veremos como determinar el ángulo de incidencia e intensidad de la radiación solar sobre una superficie cualquiera. Esta información será indispensable para cuantificar la energía captada por nuestro sistema solar y, consecuentemente, permitirá dimensionarlo adecuadamente.

Consideremos a una superficie cualquiera inclinada

d' , y el ángulo horario w , todos ellos vistos anteriormente. La expresión que los relaciona es (14,15,31):

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin S \sin \theta \cos B - \sin S \cos \theta \sin B \cos d' \\ &+ \cos S \cos \theta \cos B \cos w \\ &+ \cos S \sin \theta \sin B \cos w \cos d' \\ &+ \cos S \sin B \sin d' \sin w \end{aligned} \quad (2.08)$$

Esta ecuación general, se simplifica cuando la superficie en estudio tiene cierta orientación particular. A continuación veremos su aplicación a dos de los casos más comunes y que nos serán de utilidad posteriormente.

a) Superficie horizontal. En este caso $B=0$. Se obtiene:

$$\cos \theta_z = \sin S \sin \theta + \cos S \cos \theta \cos w \quad (2.09)$$

la ecuación 2.09 define al denominado ángulo cenital θ_z . Es el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre un plano horizontal.

b) Superficie inclinada viendo hacia el sur. En este caso $d'=0$, obteniéndose:

$$\cos \theta = \sin S \sin (\theta - B) + \cos S \cos (\theta - B) \cos w \quad (2.10)$$

Para fines de estudio, por simplicidad y porque así es en realidad, se considera que la radiación solar total G , llamada también global, esta constituida por

radiación que llega del Sol sin sufrir ninguna desviación y de aquella que ha sido absorbida, reemitida y/o desviada por la atmósfera. A la primera se le llama radiación directa G_b y a la segunda se le denomina radiación difusa G_d .

Frecuentemente es necesario conocer la radiación directa sobre una superficie inclinada cuando solamente se conoce referida a un plano horizontal. Esta situación se dará cuando se pretendan utilizar los mapas de radiación solar instantánea del Dr. Fernández que se incluyen en el Anexo F. Para solucionar este problema se ha definido el factor de forma R_b . Es el cociente de la radiación directa sobre un plano inclinado G_d' y la radiación directa sobre un plano horizontal G_d , o sea :

$$R_b = G_b' / G_b = G_0 \cos \theta / G_0 \cos \theta_z = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (2.11)$$

aquí G_0 es una "constante" solar a nivel de suelo.

Para medir cada una de las variables de interés de la radiación solar, se han creado instrumentos adecuados. Para cuantificar su intensidad, se utiliza el piranómetro, la versión más popular es la que tiene como elemento sensor varios termopares en serie, a este arreglo se le llama termopila. Entrega una diferencia de potencial proporcional al cambio de temperatura ocasionado por la radiación solar. Se utiliza para medir

tanto la radiación solar global G como la difusa G_d . Para lograr lo último se le coloca una sombra que impida la incidencia de la radiación directa; generalmente se usa una banda del ancho adecuado colocada en un plano aproximadamente paralelo a la eclíptica; ver figura 2.8.



Figura 2.8 Piranómetros de termopila. a) Para radiación global, b) para difusa.

Para medir la componente directa, existe el llamado Pirheliómetro. Consiste en un sensor semejante al anterior, pero colocado en el extremo de un cilindro en donde incide la radiación que penetra por un orificio que esta en el lado apuesto. Se apunta directamente al Sol y se obtiene la señal eléctrica medible.

Para determinar las horas de insolación, o sea, las horas en las que la radiación solar directa no es obtaculizada por las nubes, se utiliza el Pirheliógrafo. El más popula (23), utiliza un lente esférico que concentra y hace incidir la radiación en un papel registrador, quemándolo; de allí su nombre. En el CINVESTAV MERIDA se creó un pirheliógrafo que utiliza el

mismo principio, quemar un papel registrador. La concentración la efectúa un lente biconvexo (lupa), movido por un mecanismo de relojería imitando el movimiento aparente del Sol. Si bien ambos instrumentos hacen lo mismo, la ventaja del pirheliógrafo de lente móvil consiste en que es bastante más económico. Su costo de construcción fue de \$ 15,000. (quince mil pesos) en diciembre de 1984 (26). Ver figura 2.09.

Para conocer el ángulo de incidencia θ , comunmente se utiliza la ecuación 2.08 y sus variantes; o bien se realizan medidas físicas y se usa la trigonometría. Para simplificar esta actividad se creó, también en CINVESTAV MERIDA, un instrumento al que se le llamó ERASTOMETRO. Consiste básicamente en una cavidad semi-esférica en cuyo centro tiene un hasta de longitud igual al radio de la esfera. Este elemento permite medir directamente el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre cualquier superficie. Mediante el nivel que complementa al Erastómetro, se determina el ángulo de inclinación B de la superficie en cuestión (28). Las figuras 2.09 y 2.10 son fotografías del Erastómetro y Pirheliógrafo respectivamente.

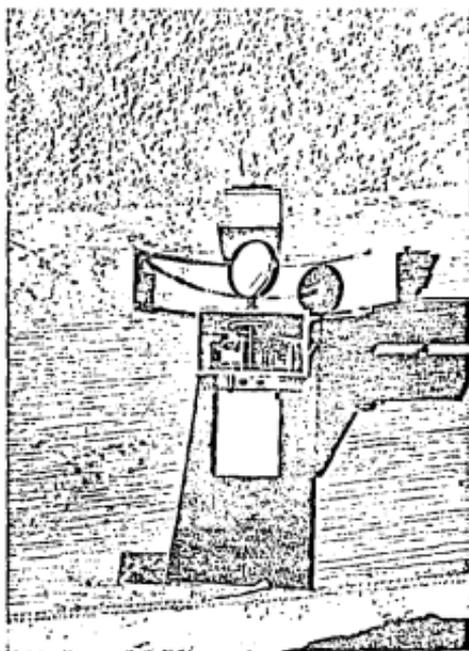


Figura 2.9 Pirheliógrafo diseñado en CINVESTAV.

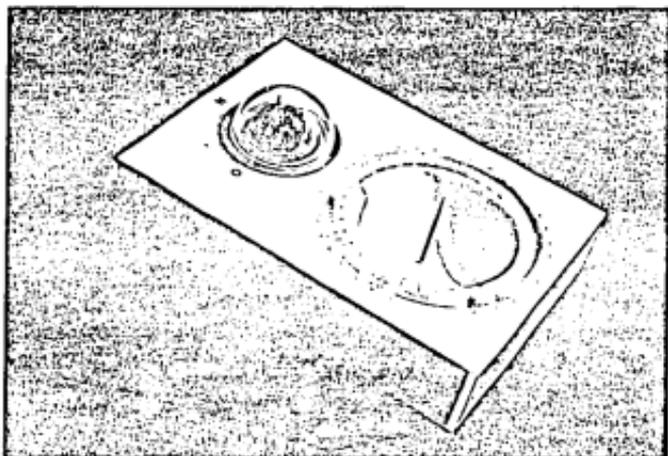


Figura 2.10 El Erastómetro. Instrumento para medir ángulos de incidencia de la radiación solar

2.4 SU INTENSIDAD Y DISTRIBUCION EN LA REPUBLICA MEXICANA

Hasta aquí, mediante los ángulos solares, solamente podemos estimar la posición relativa del Sol respecto a una superficie cualquiera; mas no sabemos como estimar la magnitud de la energía incidente. A continuación veremos el procedimiento para obtener esta información.

Por su facilidad de uso y grado de confiabilidad reportada por los autores, se propone el uso de los resultados y mapas de insolación instantánea en la República Mexicana publicados por el Dr. Fernandez y otros (18). Se incluyen en el anexo F. Observando que la distribución de la radiación solar instantánea global G , directa G_b y difusa G_d , tenían un comportamiento ideal de tipo cosenoidal, ver figura 2.11; el autor propuso la siguiente ecuación para estimarlas:

$$G_i = G_{\max} \cos^a \left(180 \frac{t}{N} \right) \quad [W/m^2] \quad (2.12)$$

aquí G_{\max} es el valor leído en los mapas, según el caso será el valor máximo promedio mensual de la radiación global G_{\max} , o el valor máximo promedio mensual de la radiación directa $G_{b\max}$. El exponente a es igual a 1.2 para la radiación global y 1.5 para la radiación directa. El valor de la componente difusa G_d será simplemente $G_d = G - G_b$. N es la duración del día en horas, definido en la ecuación 2.07; t es el tiempo en horas solares.

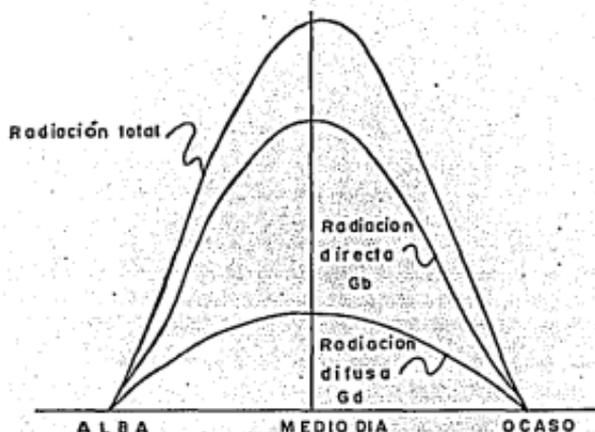


Figura 2.11 Comportamiento ideal de la radiación solar.

En el caso de que no estemos interesados en los valores instantáneos de la radiación, sino en el promedio diario, para que, multiplicado por la duración del día N obtengamos la radiación total incidente en el día; el autor propone las siguientes relaciones:

$$\bar{G} = G_{\max} / 1.665 \quad (2.13)$$

para obtener el promedio de la radiación solar instantánea global diaria. Y

$$\bar{G}_b = G_{b\max} / 1.797 \quad (2.14)$$

para determinar el promedio de la radiación solar instantánea directa diaria.

Los valores de G_{max} y G_{bmax} para el mes y lugar elegidos, pueden obtenerse por lectura directa de las figuras 2.11 y siguientes del anexo F. Como ejemplo, determinaremos los valores de G , G_b y G_d para la ciudad de Mérida, que requeriremos posteriormente en el ejemplo de aplicación. Los valores leídos se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 ^{F11} Radiación solar máxima promedio mensual a usar en el diseño de los colectores.

	G	G_b	G_d
	[W/m ²]		
Enero	540	358	182
Febrero	570	369	201
Marzo	623	405	218
Abril	659	433	226
Mayo	707	486	221
Junio	683	463	120
Julio	698	479	219
Agosto	708	490	218
Septiembre	672	457	215
Octubre	588	383	205
Noviembre	642	471	171
Diciembre	512	336	176

CAPITULO III

EL COLECTOR SOLAR PLANO

Por lo honoroso de la inversión, cuando se pretende utilizar a la energía solar, debe efectuarse un estudio económico previo. Se hace necesario conocer o estimar las características y dimensiones del sistema de captación y el de almacenamiento térmico. Para lograr lo anterior es primordial conocer la intensidad y distribución espacio-temporal de la radiación solar, el uso que se dará a la energía captada, el fluido de trabajo que se utilizará como transporte y almacenador térmico, así como las temperaturas requeridas en la aplicación.

Para satisfacer las temperaturas que las distintas aplicaciones de la energía solar demandan, se han creado diversos sistemas para captarla y transformarla. Van desde una simple superficie por donde escurre agua por gravedad, dispositivos que sin concentrar la radiación obtienen temperaturas del orden de los 100 C, hasta los hornos solares con un alto grado de concentración de la energía, con los cuales pueden obtenerse temperaturas de más de 3500 C.

Tomando en consideración que los metales y sus sales pudieran llegar a ser dañinos a los peces (33) y que las temperaturas requeridas no van más allá de los 35 C para

ninguna especie; en esta tesis se propone el uso de colectores solares planos de plástico (polietileno) en la superficie que se encuentra en contacto permanente con el agua

3.1 COMPONENTES Y CARACTERISTICAS DEL COLECTOR SOLAR

PLANO.

Por sus muchas cualidades, cuando la temperatura requerida no es mayor a 100 C, "EL COLECTOR SOLAR PLANO" en sus diversas versiones, es el arreglo con mayor aceptación. Es durable, fácil de construir, instalar y operar. Sus costos de operación y mantenimiento son casi nulos o, en su defecto, sumamente bajos. Su versatilidad le permite ser útil para calentar líquidos o gases, integrarse a la arquitectura y adaptarse a requerimientos térmicos específicos mediante la supresión, cambio o arreglo adecuado de sus componentes.

El colector solar plano convencional consta de cinco componentes que bien pudieran estar o no en una aplicación concreta, ver figura 3.1. Sus principales constituyentes son:

a) Cubierta transparente. Puede ser de cualquier material que tenga ésta característica. Comúnmente es de vidrio plano, en ocasiones de acrílico o algún otro material plástico. Tiene como finalidad disminuir significativamente las pérdidas térmicas. Con dos cubiertas la temperatura que se obtiene en el fluido de

trabajo es mayor, pero para fines prácticos el incremento obtenido en la temperatura, no justifica el costo de la cubierta adicional. La cubierta, además de disminuir las pérdidas de energía térmica por convección, logra que la radiación de onda larga, aproximadamente mayor a 3 micras, no escape del colector. Su opacidad a la radiación infraroja crea al anterior efecto llamado de invernadero.

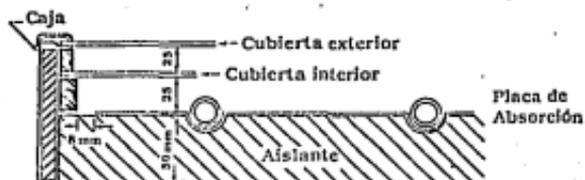


Figura 3.1 Componentes de un colector solar plano

b) Absorbedor. Es el colector propiamente dicho. Consiste en una superficie llana, de aquí el nombre de colector plano, construida comúnmente de metal. Puede ser de acero, aluminio, cobre, etc. Los hay también de materiales plásticos con inhibidores de radiación ultravioleta para prevenir la degradación del material. En contacto térmico a esta superficie absorbadora, o formándola ellos mismos, se encuentran ductos por donde circula el fluido de trabajo a calentar.

Para mejorar las cualidades ópticas de los absorbedores, en ocasiones se recubren con óxidos metálicos o pinturas que mejoran su capacidad para absorber la radiación y disminuyen a la que emiten. A las superficies así tratadas se les denomina superficies selectivas.

c) Aislante térmico. Su función, evidentemente es la de evitar las pérdidas de energía al medio. Se coloca en las caras no expuestas al sol. Los más utilizados son la fibra de vidrio, poliuretano y poliestireno expandidos al igual que fibras vegetales.

d) Contenedor. Esta estructura externa, llamada también carcasa, sirve para soportar a los demás elementos sólidos y darle robustez al conjunto. En su manufactura pueden utilizarse los más diversos materiales. Pueden ser : Lámina galvanizada, madera, fibra de vidrio y resinas poliéster, aluminio, etc.

e) El quinto componente del colector solar plano es el fluido de trabajo. Para aplicaciones térmicas el fluido más utilizado es el agua, debido a su bajo costo y abundancia aunado a su excelente capacidad térmica, 4.18 kJ/kg K .

3.2 LOS COLECTORES PROPUESTOS.

Para seleccionar el tipo y diseño de los colectores solares planos se siguieron básicamente dos criterios que se consideraron fundamentales : La temperatura demandada y

el hecho de que los metales en altas concentraciones en el agua afectan negativamente a los peces. Por ello se optó por los siguientes (5,6,12,25,27,29):

1) Colector de manguera de polietileno negra, de 3/4" de diámetro. El colector se forma colocando la manguera en espiral, sobre un plano de poliestireno soportado por una estructura de madera. Ver figuras 3.2 y 3.3. El área del colector mostrado es de 2 m². La longitud de la manguera es de 82.5 m. El volumen de agua contenido es de 28 lt. Para su elección también se tomaron en cuenta su bajo costo inicial y facilidad de construcción.

2) Colector Solar Plano de Manguera de Plástico Negro de 3" de diámetro en arreglo reticular. Autocontenido. El absorbedor de manguera de plástico de 3" de diámetro se colocó dentro de un contenedor de lámina galvanizada. Se aisló térmicamente con poliestireno expandido y se le colocó una cubierta de vidrio plano común de 5 mm. Como puede verse en las figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se trata de un colector solar plano convencional. La diferencia está en que como absorbedor se utilizan las mismas mangueras; su capacidad volumétrica es de 120 lt. El Área del prototipo es de 2 m². Si bien su construcción es más laboriosa respecto al de manguera en espiral, como veremos posteriormente, su eficiencia térmica es mejor.

Conviene hacer notar que: si bien el colector será autocontenido para aplicaciones domésticas, en el ejemplo

resuelto en esta tesis para la incubación de peces, se utilizarán termotanques en todos los casos.

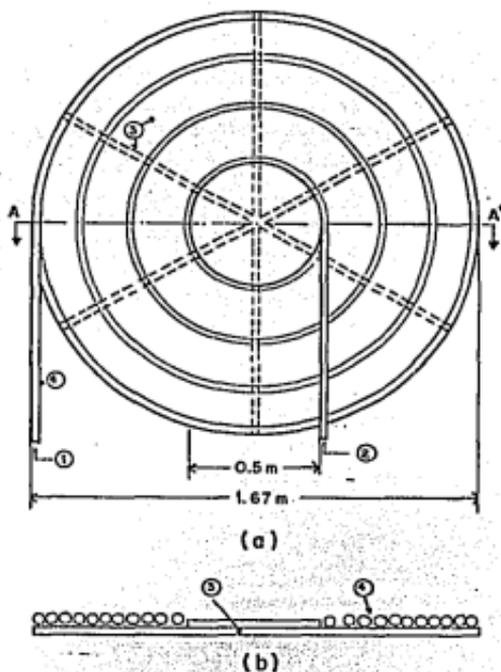


Figura 3.2 Colector Solar Plano de Manguera de Plástico negro en espiral. a) Vista Superior. b) Corte A-A'. 1) Agua fría 2) agua caliente 3) estructura y aislante térmico 4) manguera.



Figura 3.3 Colector Solar Plano de Manguera en Espiral

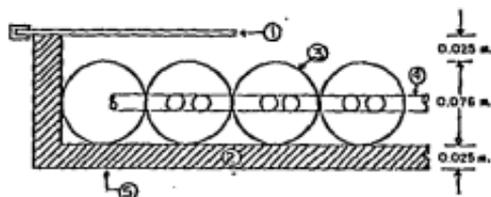


Figura 3.4 Colector solar plano con manguera de 3" de diámetro como absorbedor. 1) cubierta de vidrio 2) aislante 3) absorbedor-tanque 4) cabezales 5) carcasa.

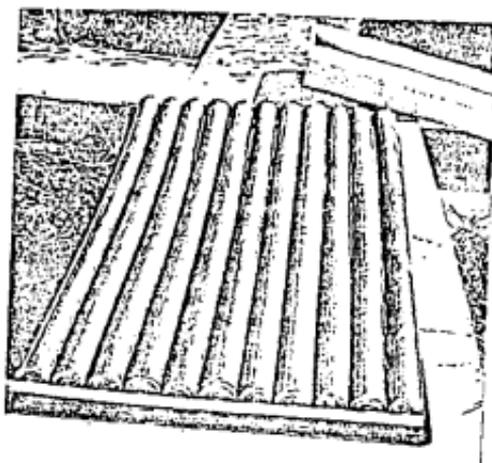


Figura 3.5 Absorbedor de mangueras de plástico de 3" de diámetro fuera del contenedor.

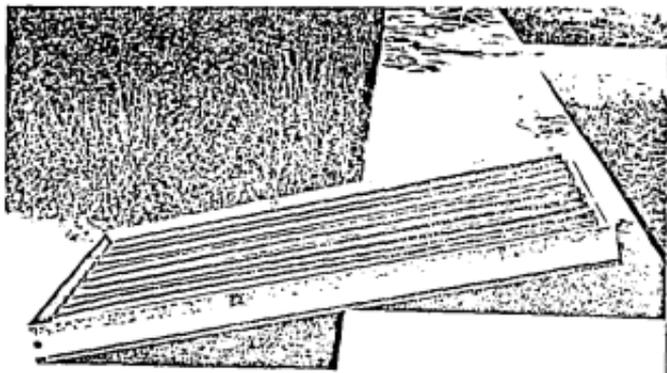


Figura 3.6 Vista lateral del colector autocontenido sin cubierta.

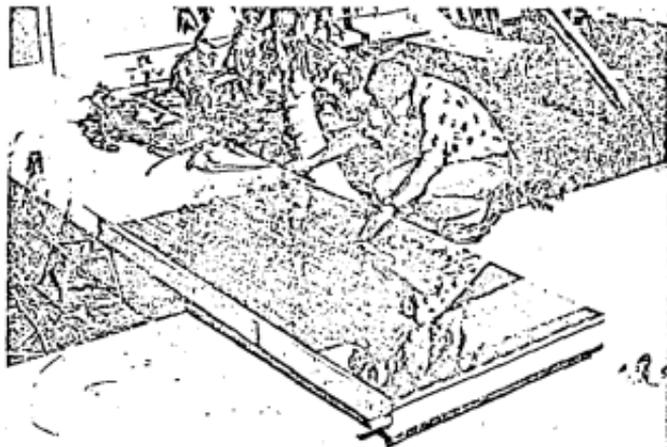


Figura 3.7 Colocando la cubierta del colector autocontenido de plástico.

3) Colector solar plano tipo estanque somero. Como su nombre lo indica, consiste en un estanque de 13 cm de profundidad. Puede ser de cualquier material impermeable. El que se construyó fué hecho de poliestireno, con acabado superficial de mortero reforzado con henequén, recubierto con una película de polietileno negro. El nivel del agua se controla fácilmente con un flotador. Se cubrió con el vidrio plano, obteniéndose un colector solar plano sin absorbedor, ni ductos, el agua misma los sustituye. Ver figura 3.8.

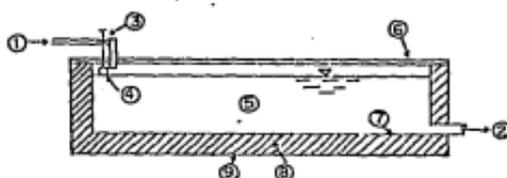


Figura 3.8 Colector solar plano tipo estanque somero. sección transversal. 1) agua fría 2) agua caliente 3) Válvula 4) Flotador 5) Agua 6) cubierta 7) Película de polietileno 8) Aislante térmico.

De inmediato se puede uno cuestionar, porqué no incubar a los peces directamente en el estanque?, para qué instalar estanques colectores, sistema de bombeo, etc, ?. La respuesta es simple, no puede controlarse la temperatura. Por otra parte, tampoco podría almacenarse convenientemente la energía, así como se capta de día, se emite en la noche.

3.3 COMPORTAMIENTO FOTOTERMICO.

Cuando la radiación solar incide sobre un objeto pueden suceder tres cosas no excluyentes: Que se refleje total o parcialmente; que pase a través del objeto, también de manera total o parcial; o que produzca un incremento en la temperatura del cuerpo por la absorción parcial o total de la energía radiante. A la propiedad de un cuerpo de reflejar la radiación se le llama reflectancia r ; a la de permitir el paso de ella a través de él, transmitancia t ; y a la de utilizarla para incrementar su temperatura, absorptancia a . Las tres tienen valores entre 0 y 1; si no existe un sumidero o producción interna de energía, siempre se cumple:

$$r + t + a = 1 \quad (3.01)$$

Para un cuerpo reflejante ideal $r=1$, $t=0$, y $a=0$. Un cuerpo totalmente opaco tendrá una transmitancia $t=0$, entonces, $r + a = 1$. Un cuerpo negro ideal tendrá una absorptancia $a = 1$ y su transmitancia así como su reflectancia igual a cero.

En el diseño y evaluación de los colectores solares planos se utiliza un parámetro denominado Producto Tau-Alfa ($\tau\alpha$). Puede demostrarse que la fracción de la energía que finalmente el colector aprovecha después de las múltiples absorciones-reflexiones que se dan entre la cubierta del colector y la superficie absorbidora

puede estimarse mediante la siguiente expresión que define al factor (t_a) . Ver figura 3.09, (14,15).

$$(t_a) = \frac{t + a}{1 - (1-a)rd} \quad (3.02)$$

en donde t es la transmitancia del vidrio atenuada por su absortividad a y su reflectancia r ; a es la absortividad del absorbedor del colector. La reflectancia difusa de la cubierta puede suponerse igual a 0.16. La transmitancia t es igual a (14.15):

$$t = t_r + t_a \quad (3.03)$$

En donde t_r es la transmitancia afectada por la reflexión y t_a la transmitancia afectada por la absortividad. Para un colector con una cubierta estan definidas por:

$$t_a = \exp(-kl) \quad (3.04)$$

aquí k es el coeficiente de extinción del material y l su espesor. Para el vidrio común puede usarse $k = 0.3/\text{cm}$.

$$t_r = \frac{1 - r}{1 + r} \quad (3.05)$$

en donde r es la reflectancia del material. Suponiendo que las propiedades ópticas del material son independientes de la longitud de onda de la radiación, caso sumamente ideal; Fresnel (31) dedujo una ecuación para determinar la reflexión o reflectancia media.

$$r = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\sin (\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\tan (\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (3.06)$$

en donde θ_1 es el ángulo de incidencia de la radiación y θ_2 es el ángulo de refracción. Ambos están relacionados entre sí con los índices de refracción de los dos medios por la ley de Snell (31).

$$\sin \theta_2 = \sin \theta_1 \left(n_1 / n_2 \right) \quad (3.07)$$

en donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios. En este caso son aire y vidrio, sus valores son 1.0 y 1.5 respectivamente.

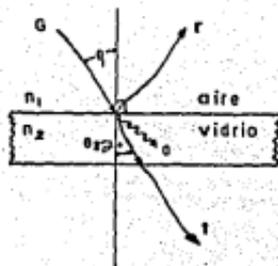


Figura 3.9 Angulos importantes en la interacción de la materia y la energía radiante.

Hemos visto que la materia expuesta a la radiación experimenta un incremento en su temperatura. Un colector solar plano aprovecha este fenómeno para captar la energía solar. Dado que una de las formas para interpretar el contenido energético de la radiación es mediante el modelo de cuantos o paquetes de energía; se dice que el colector efectúa una conversión fototérmica de la energía solar.

El comportamiento térmico de un colector solar plano puede ser analizado mediante un balance de la energía que fluye a través de él. Así conoceremos la porción de la radiación incidente cedida como energía útil al fluido de trabajo. El balance de energía puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{dE}{dt} = A \tau G (1 - \tau_a) - q_u - q_p \quad (3.08)$$

en donde dE/dt , es el cambio de la energía interna del colector en el tiempo; A [m^2], es el área del colector; G [W/m^2], es la radiación solar global incidente; q_u [W], es la energía útil, calor cedido por el colector al fluido de trabajo; q_p [W], es la energía perdida, energía térmica cedida por el colector al medio ambiente; τ_a adimensional, es el factor tau-alfa (transmitancia - absorptancia) de eficiencia óptica.

Al cabo de un cierto tiempo de iniciado el funcionamiento, puede suponerse que el colector se encuentra en estado estacionario. En este caso $dE/dt = 0$, entonces, la energía útil proporcionada por el colector será:

$$q_u = A \cdot G \cdot (t_a) - q_p = A [G \cdot (t_a) - U (T_c - T_a)] \quad (3.09)$$

aquí U [$W/K \cdot m^2$], es el coeficiente global de pérdidas térmicas, consultar el anexo B para su explicación; T_c [K], es la temperatura del colector, para fines prácticos puede tomarse como la media aritmética de la temperatura del agua a la entrada más la temperatura del fluido a la salida del colector; T_a [K], es la temperatura ambiente, puede estimarse mediante el modelo que se proporciona en el anexo A.

La eficiencia de un sistema solar depende en gran medida del funcionamiento del colector. Así, determinar el funcionamiento de los colectores es un paso importante y necesario para conocer el comportamiento del sistema en conjunto. Si bien el método analítico de diseño, particularmente para colectores solares planos, concuerda aceptablemente con los resultados experimentales, cuando es posible se prefiere diseñar en base a datos reales.

Con estas ideas se procedió a la caracterización experimental de los colectores solares propuestos en esta

tesis. Se utilizaron las recomendaciones y propuestas emitidas por Chargoy (11), que a su vez están fundamentadas en normas de la National Bureau of Standards (NBS), reporte NBSIR 74-635; así como de la American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, bajo la clave ASHRAE standard 93-77.

El método para la caracterización térmica de los colectores, se basa en la generalización de la eficiencia instantánea n de ellos. La cual está definida por:

$$n = \frac{q_u}{G \cdot A} = \dot{m} C_p (T_s - T_e) / G \cdot A \quad (3.10)$$

que no es otra cosa que el cociente de la energía útil entregada por el sistema, entre la energía que está disponible al incidir sobre el colector. En la expresión anterior, \dot{m} [kg/min], es el flujo másico y C_p [kJ/kg K] es la capacidad térmica del fluido de trabajo. El método es particularmente útil, medir simultáneamente el flujo másico \dot{m} del fluido caloportador circulando en el colector, su diferencia de temperatura ΔT entre la entrada y la salida, así como la insolación global G que incide sobre él mismo, es relativamente simple.

Las recomendaciones generales para utilizar el método de la eficiencia instantánea pueden resumirse en las siguientes:

-Efectuar series de prueba de 15 minutos de duración, cada una de las cuales permita calcular la eficiencia

promedio del colector mediante la siguiente expresión:

$$\bar{n} = \frac{\int_0^t q_u dt}{\int_0^t AG dt} = \frac{\int_0^t \dot{m} C_p (T_s - T_e) dt}{\int_0^t AG dt} \quad (3.11)$$

- Flujo o gasto másico igual a 0.02 kg/s m²,
- Conocer el calor específico del fluido con una variación máxima del 5% en el período de prueba,
- Efectuar las medidas simétricas respecto al mediodía solar,
- Determinar el mayor número posible de valores de \bar{n} ,
- Temperatura ambiente menor a 30 C durante la prueba, esto no fue posible en la ciudad de Mérida en las pruebas efectuadas,
- Angulo de incidencia de la radiación solar no mayor a los 30 grados y
- Efectuar la caracterización del colector en un día sin nubosidad. Las pruebas realizadas se hicieron en el mes de abril. Los días son relativamente secos y sin nubes.

Utilizando la ecuación 3.09, la eficiencia del colector operando en condiciones de estado permanente puede escribirse como:

$$n = \frac{q_u}{AG} = (t_a) - U \left[\frac{T_c - T_a}{G} \right] \quad (3.12)$$

Se observa que la ecuación 3.12 describe una recta, con ordenada al origen (t_a) y pendiente U . Si se grafican los valores de la eficiencia instantánea promedio \bar{n} contra el apropiado $(T_c - T_a)/G$, (t_a) representa el factor de eficiencia óptica del colector y U su coeficiente global de pérdidas térmicas. Precisamente esto es lo que se hizo experimentalmente para los tres colectores solares planos propuestos. Se determinaron experimentalmente los valores de \bar{n} auxiliándose de la expresión 3.11. Simultáneamente se obtuvieron los valores de $(t_c - t_a)/G$. Se localizaron los puntos en un plano cartesiano y, mediante el método de regresión lineal de mínimos cuadrados se obtuvieron los valores de la pendiente U y la intercepción (t_a) con el eje de las ordenadas. La tabla 3.1 resume los valores obtenidos del factor de eficiencia óptica (t_a) y el coeficiente global de pérdidas térmicas U . La figura 3.10 muestra las rectas obtenidas por regresión lineal de los valores experimentales.

Tabla 3.1 Características de diseño de
de los colectores propuestos

colector	(t_a)	U (W/K m ²)
De manguera en espiral	.57 ± .03	97 ± 6
De manguera autocontenido	.70 ± .04	10 ± 0.6
Estanque somero	.75 ± .04	7 ± 0.4

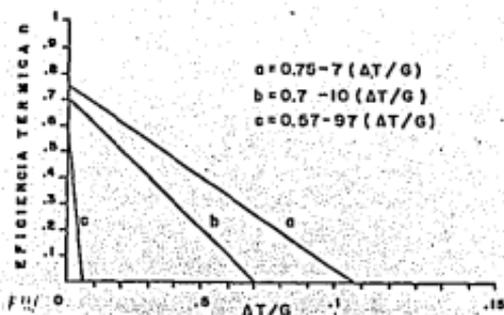


Figura 3.10 Eficiencia térmica η en función de $(T_c - T_a)/G$. Para a) Estanque somero b) autocontenido c) de manguera en espiral.

Las pruebas se efectuaron en el mes de abril de 1986 en las instalaciones del CINVESTAV-MERIDA. Como fluido de trabajo se utilizó agua y un $C_p = 4.178 \text{ kJ/kg K}$. Se efectuaron 20 medidas con intervalos de un minuto, en cada uno de los 10 períodos de prueba para cada uno de los colectores. Como sensores de temperatura se utilizaron termistores. El gasto másico se midió por el volumen acumulado en un recipiente de descarga. Para medir la insolación, se utilizó un piranómetro Hollis - Geosystem modelo MR-1, su constante de calibración fue de $13.95 \times 10^{-6} \text{ V m}^2 / \text{W}$. Para efectuar la regresión lineal de los puntos experimentales se auxilió de una calculadora de bolsillo HP-33 C.

CAPITULO IV

LA INCUBADORA

Los conceptos de solarimetría expuestos en el capítulo II y las características de los colectores obtenidas en el capítulo III, así como los fundamentos de transferencia de calor por radiación, convección, conducción y cambio de fase que aparecen en los anexos B y C, son necesarios y suficientes para dimensionar los sistemas de captación de la energía solar propuestos. Como ejemplo de aplicación de estos principios, en seguida se utilizarán para determinar el área de captación requerido por uno de los sistemas de incubación existentes en el Cinvestav - Mérida. Se mostrará el procedimiento a seguir así como el algoritmo para la elaboración del programa de cómputo utilizado. Al saber sus dimensiones, estaremos en posibilidad de evaluarlo económicamente para su comparación con el sistema eléctrico alternativo. Si bien los cálculos pueden hacerse manualmente, por la naturaleza iterativa del procedimiento nos auxiliaremos de los recursos de la computación. El programa de cómputo utilizado se muestra en el anexo E.

El sistema solar, se diseñará para las condiciones más desfavorables, o sea, para el mes de insolación

promedio anual mínima; y para los días de menor duración. Se obtendrá el área de captación mínima necesaria para las condiciones ambientales y requerimientos de diseño. Estas condiciones se dan en la ciudad de Mérida durante el mes de diciembre. Con fines de comparación, se determina el área de captación requerida durante el mes de junio en que las condiciones climatológicas son más favorables a los sistemas solares. Asimismo, para el caso en que no sea posible variar la inclinación de los colectores para obtener una mayor ganancia de energía solar, se determinará la inclinación θ óptima. Los criterios para estimar esta posición serán: a) Que proporcione la máxima cantidad de energía durante el invierno, b) Que la cantidad de energía proporcionada durante el año sea lo más constante posible, c) Que la energía aportada durante el año sea máxima.

4.1 DISEÑO PROPUESTO

En acuicultura no hay un arreglo universalmente aceptado para la incubación de peces. El determinar que sistemas de incubación, así como la disposición relativa de sus distintos componentes, cae en el campo de la Ingeniería en Acuicultura. Su elección dependerá entre otras cosas de la especie a cultivar y de la magnitud de la piscifactoría.

La incubadora a la que se propone anexar el sistema solar de calefacción y que se usará como ejemplo, esta

funcionando, con una resistencia eléctrica de un kilowatt, en el Departamento de Recursos del Mar del propio Cinvestav - Mérida. Un diagrama de flujo, en el que se pretende mostrar también la disposición física de sus componentes, se muestra en la figura 4.1.

Actualmente la incubadora está formada por cinco tinajas de fibra de vidrio de un metro cuadrado de área libre, cuenta con tres recipientes de polietileno de 100 lt cada uno. Sirven como mezclador, distribuidor y filtro-aerador, respectivamente. La complementan seis recipientes de 50 litros que sirven como tanques de descarga y reposo del agua. La circulación del agua se realiza mediante una bomba que la eleva hasta el tanque distribuidor; por gravedad cae a las tinajas de incubación. El flujo se regula con una llave de paso, el agua no utilizada regresa por gravedad al tanque de mezclado a través del filtro-aerador. El agua sobrante en las tinajas de incubación cae por un rebosadero que mantiene un nivel fijo, al tanque de mezclado; pasando previamente por los recipientes de reposo. Como puede observarse, es un sistema cerrado. Únicamente se restituye el agua evaporada.

Al sistema original se le agregarán tres termotanques de un metro cúbico cada uno, una bomba de recirculación, los colectores solares, así como la tubería y accesorios requeridos. La diferencia en

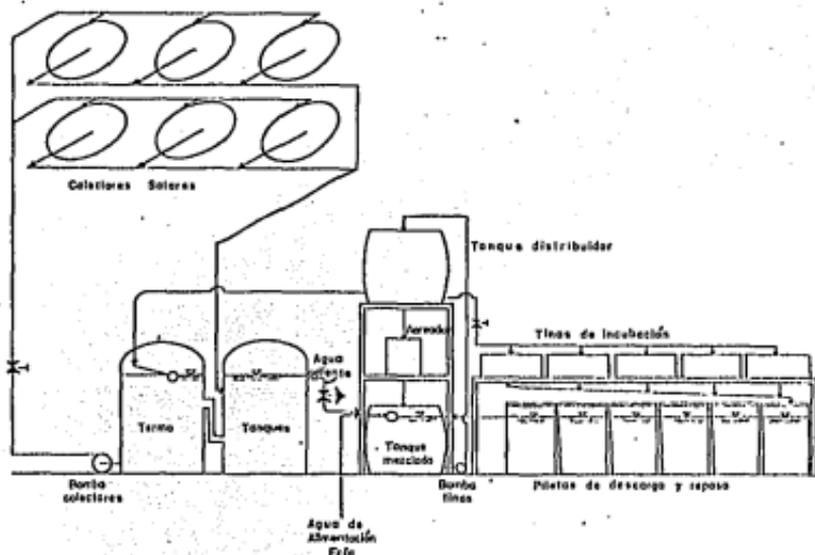


FIG. 4.1.- Sistema de incubación con Energía Solar. Diagrama de flujo.

funcionamiento consistirá en lo siguiente: El control de temperatura que gobernaba a la resistencia eléctrica, al monitorear las temperaturas del tanque de mezclado, así como de los colectores y el termotanque, se encargará de controlar a la bomba de los colectores y a una válvula de solenoide. Hará funcionar la bomba cuando la temperatura de los colectores sea mayor a la del agua almacenada en los termotanques. Cuando el sistema de incubación lo demande, permitirá el paso del agua caliente al tanque de mezclado. El volumen y consecuentemente el nivel, es

mantenido constante en los termotanques mediante un flotador, de tal manera que el agua que es extraída a mayor temperatura hacia la incubadora, se restituye por gravedad a través del tanque de distribución.

4.2 ENERGIA REQUERIDA AL SISTEMA SOLAR

Como paso inicial en el dimensionamiento del sistema solar, se estimarán las pérdidas de energía en el sistema de incubación. Será la energía demandada por la incubadora y consecuentemente, la energía mínima que deberá aportar el sistema solar.

Por razones de experimentación la incubadora se localiza en un laboratorio con temperatura ambiente constante de 24 C. Esto permite considerar a las pérdidas térmicas también constantes. La temperatura de operación de la incubadora se fijará en 30 C. que, como puede verse en la tabla V del Anexo D, es la temperatura máxima requerida por las especies de aguas cálidas cultivadas en México. Las condiciones fijadas en este ejemplo no son únicas, para otra incubadora o especie a incubar, las condiciones de diseño deberán modificarse de acuerdo a los requerimientos específicos.

Recordando que se tienen cinco tinas de incubación, con una superficie libre de agua de 1 m² cada una, además de tres recipientes con 0.2 m² de superficie libre, las pérdidas térmicas por radiación en el agua serán:

$$q_r = 5.6 \text{ m}^2 [0.96 + 5.67 \times 10^{-8} (303 - 297)^4]$$

$$q_r = 198 \text{ W}$$

se utilizó la ecuación b.1 del anexo B y un valor de 0.96 para la emisividad del agua.

Las Pérdidas por evaporación se determinarán con el auxilio de la ecuación b.11 ó c.10. Para ello, necesitamos el valor de las presiones parciales del vapor de agua en el aire, tanto a nivel de la superficie de agua como en el medio ambiente. Usando las ecuaciones b.12 y b.13, con una humedad relativa medida del 100% obtenemos:

$$P_s = \exp[18.403 - 3885/(30+230)] = 32 \text{ mmHg}$$

$$P_a = 1 \exp[18.403 - 3885/(24+230)] = 22 \text{ mmHg}$$

Tambien se necesita el coeficiente de convección dado por la ecuación b.8, entonces

$$h_c = 5.7 + 3.8 \times (0) = 5.7 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

en donde se utilizó un valor de cero para la velocidad del viento, debido a que la incubadora está en un local cerrado.

Sustituyendo valores en la ecuación b.11 la energía perdida por evaporación será:

$$q_{ev} = \frac{(5.6) (5.7) (2437) (32-22)}{(1.6) (1) \cdot 760}$$

$$q_{ev} = 606 \text{ W}$$

En donde se utilizó el valor de 2437 kJ/kg para el calor latente de evaporación C_l , y de 1 kJ/kg K para la capacidad calorífica del aire seco. Se usó el valor de 760 mmHg para la presión atmosférica standard.

Consecuentemente, la masa del agua que se evapora ininterrumpidamente y que deberá realimentarse será:

$$m_{ev} = q_{ev}/C_f = .606 \text{ [kJ/s]} / 2437 \text{ [kJ/kg]}$$

$$m_{ev} = 249 \times 10^{-6} \text{ kg/s} = 21.5 \text{ kg/día}$$

Las pérdidas por convección y radiación en las paredes de los recipientes se consideran de poca magnitud respecto a las de conducción, de tal manera que solo determinaremos estas últimas. En conjunto la incubadora tiene un área de transferencia de calor por conducción de 40 m² (18 m² de tres termotanques + 11 m² de las tinas incubadoras + 8 m² de las tinas de reposo + 3 m² de los tanques de mezclado, filtrado y distribución); usando una conductividad térmica de 0.03 W/m K (poliestireno expandido) y un espesor de 0.025 m, las pérdidas por conducción son:

$$q_k = (0.03 / 0.025) (30 - 24) (40)$$

$$q_k = 288 \text{ W}$$

las pérdidas totales de energía será la suma de

$$q_r + q_{ev} \leftarrow q_l = 198 + 606 + 288 = 1092 \text{ W}$$

lo cual concuerda aceptablemente con el sistema de calefacción eléctrica de 1 kW usado hasta ahora. Para fines de diseño usaremos el valor de 1.1 kW. Por lo tanto, la energía requerida diariamente y de manera constante por la incubadora es:

$$Q_r = 1100 \text{ W} \times 86400 \text{ s/día}$$

$$Q_r = 95 \times 10^6 \text{ J/día}$$

En este ejemplo resuelto, por las características propias de la incubadora elegida, las pérdidas térmicas son constantes. Si en otro diseño son variables en el tiempo, deberán tenerse en consideración. Todo sistema solar, por lo aleatoria que es la fuente de energía, requiere de un sistema de almacenamiento térmico. En la incubadora como almacén de energía se utilizan tres tanques de un metro cúbico cada uno de ellos y la misma agua que circula por los colectores. Tomando la capacidad calorífica del agua igual a 4178 J/kg K y recordando que la temperatura solicitada es de 30 C , el volumen de almacenamiento térmico de 3 m^3 , podrá satisfacer a la incubadora durante 24 horas si tiene la temperatura de:

$$T_t = 30 + (1100 \times 86400) / (3000 \times 4178) = 37.6 \text{ C}$$

se usó una densidad de 1000 kg/m^3 .

4.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA SOLAR

Después de saber la magnitud y frecuencia de la energía que deberá aportar el sistema solar, debemos determinar el área de captación que proporcionará la energía demandada por la incubadora. Conviene saberlo porque así invertiremos lo justo, si instalamos un área pequeña de colectores, tal vez invertimos menos dinero, pero no satisficemos nuestras necesidades. Por otro lado, si el área de captación es excesivamente mayor, nuestro costo inicial será elevado innecesariamente.

Sabemos de la sección anterior, que la energía demandada constantemente por la incubadora es de 1.1 kW, equivalente a 95×10^6 J/día. Si determinamos la energía proporcionada por un metro cuadrado de colector durante todo el día escogido para el diseño, el área de captación total necesaria será simplemente

$$A = Q_r \text{ [J/día]} / q_u \text{ [J/día m}^2\text{]}$$

$$A = 95 \times 10^6 / q_u \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.01)$$

La energía útil aportada por el colector solar es resultado de la energía por él captada, menos la energía térmica que cede al medio ambiente, menos la energía necesaria al inicio del día para incrementar su temperatura hasta la de operación mínima requerida. Lo anterior podemos expresarlo de la siguiente manera:

calor = energía - pérdidas - energía
útil = captada - térmicas - acumulada

$q_u = q_g - q_p - q_a$

q_a representa un evento transitorio al inicio de operación del colector. Esto se toma en cuenta en los cálculos al incluir la condición de que, el colector solar aporta energía útil sólo, hasta que alcanza una cierta temperatura de operación fijada previamente. En estado permanente, mediante la ecuación 3.09, el anterior balance de energía podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$q_u = G_t (t_a) - U (T_c - T_a) \quad (3.09)$$

Como se verá, el uso de la ecuación 3.09 es sencillo pero laborioso, esencialmente en la determinación de las pérdidas térmicas. Por esta razón nos auxiliaremos de la computadora para evaluar la energía útil captada por la unidad de área de colector y, con éste valor, determinar el área de captación óptima requerida desde el punto de vista térmico.

El listado del programa de cómputo utilizado se muestra en el anexo E para su consulta. Los resultados de diseño obtenidos se utilizarán en el siguiente capítulo para efectuar la intercomparación económica de las alternativas propuestas.

Intentando explicar la estructura y funcionamiento

lógico del programa, en la figura 4.2 se incluye su diagrama de flujo. A manera de ejemplo, y refiriéndonos a la numeración de las instrucciones en él contenidas, se obtendrá la energía captada por el colector en un intervalo finito de tiempo. Evidentemente, si el procedimiento se aplica a cada uno de los intervalos de tiempo que componen al día de duración N , y se suman cada uno de los valores de Q_c obtenidos, encontraremos la energía total aportada por la unidad de Área de captador. Precisamente es lo que hace el programa de cómputo.

Los requisitos, condiciones y supuestos que deben cumplirse tanto en el fragmento de ejemplo, como en el programa son los siguientes:

Condiciones Generales

- Los colectores se encuentran ubicados en la ciudad de Mérida, por lo tanto la latitud es $\theta = 21$ grados;
- El flujo de agua a través de los colectores es de $f_m = 0.033 \text{ kg/s m}^2$;
- Los factores de eficiencia óptica (τ_a), así como los coeficientes globales de pérdidas térmicas U [$\text{W/m}^2 \text{ C}$] a utilizar serán los determinados en el capítulo previo;
- La masa de los termotanques es de 3000 kg;
- La masa de los colectores se considerará igual a la masa del volumen de agua por ellos contenido;
- La energía demandada por la incubadora es de 1.1 kW,

equivalente a 95×10^6 J/día

- La energía adicional que debe aportar el sistema solar será la necesaria para igualar su temperatura a la de operación, igual a $mC_p (T_o - T_c')$, en donde T_o es la temperatura de operación y T_c' la temperatura inicial del colector; además, deberá entregar la energía utilizada en el calentamiento del agua de realimentación, igual a $m_e C_p (T_o - T_r)$, aquí, T_r es la temperatura del agua realimentada.
- La temperatura de la incubadora se fijará en 30 C. Es la temperatura de operación T_o .
- El colector tipo estanque somero siempre estará horizontal, por lo que $B=0$ en todos los casos.
- Los colectores siempre se orientarán al sur, por lo tanto $d=0$ para todos ellos.
- Los valores de radiación solar instantánea máxima utilizados serán los de la tabla 2.1.

Para el día 10 de diciembre: (El diseño se efectúa para los días de cada mes en que las variables solares son las promedio (14))

- La radiación solar instantánea global será $G_M=512$ W/m².
- La radiación solar instantánea directa es $G_{bM}=336$ W/m²
- Para este día $n = 344$.
- Entonces, usando la ecuación 2.02, la declinación es

$$\theta = 23.45 \text{ sen } [(360/365)(284+350)]$$

$$\theta = -22.9 \text{ grados}$$

- Con la cual, mediante la ecuación 2.07, encontramos que el día tiene una duración de:

$$N = 2/15 * \text{arc cos } [-\tan (-22.9) \tan (21)]$$

$$N = 10.8 \text{ hr.}$$

- Para que la radiación solar al mediodía incida perpendicularmente sobre los colectores que pueden inclinarse (los de manguera en espiral y autocontenido), deberán colocarse de manera tal que $B = (\theta - \delta)$. Para este día $B = 21 - (-22.9) = 43.9$ grados
- Las temperaturas máxima y mínima esperadas serán 33 y 9.3 grados centígrados respectivamente.

Para el 11 de junio

- La radiación solar global instantánea será $G_M = 683 \text{ W/m}^2$
- La radiación solar directa instantánea es $G_{bM} = 463 \text{ W/m}^2$
- En este caso $n = 162$.
- De donde, calculando de igual forma que para el 10 de diciembre, $\theta = 23.1$ grados y $N = 13.3$ hr.
- Para este día la inclinación de los colectores deberá ser de $B = 21 - 23.1 = -2.1$ grados. El signo negativo indica que tendrán una inclinación de 2.3 grados respecto a la horizontal pero estarán viendo al norte

no al sur.

- La temperatura ambiente máxima esperada es de 38 C y la mínima de 19.5.

Comenzaremos la solución del ejemplo encontrando la potencia ganada en el colector q_g [W/m²] al tiempo $t+dt$. Posteriormente determinaremos las pérdidas térmicas q_p [W/m²]. Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.09, obtendremos la potencia útil q_u [W/m²]. El ejemplo se resolverá para el colector autocontenido y uno de los N/dt intervalos; pero el procedimiento es similar para cualquiera de los colectores y para todos los intervalos de tiempo dt durante el día de duración N .

Utilizando el algoritmo mostrado en el diagrama de flujo de la figura 4.2, un valor de $t=2$ (10:00 a.m.) y un intervalo $dt=12$ min (0.2 hr). Refiriéndonos a los números de instrucción mostrados en el diagrama de flujo, comenzaremos por determinar la hora

(1) $t = 2 - 12/60 = 1.80$ (10:12 a.m.)

(2) La temperatura ambiente se necesita para cuantificar las pérdidas térmicas en el colector. Podemos determinarla con ayuda del método presentado en el anexo A (30). De datos estadísticos, la temperatura promedio máxima para diciembre es $T_M = 33$ C, la cual se da aproximadamente a las $t_2 = -2$ (14:00 hr p.m.). La temperatura promedio mínima es igual a $T_m = 9.3$ C.

Supondremos que ocurre al amanecer, a las $t_1 = N/2 = 5.4$ hr (6:39 a.m.). La temperatura ambiente a las 1.8 hr (horas solares) es:

$$T_a = 21.15 + 11.85 [\sin (X(t) TT)]$$

$$\text{con } X(t) = 3/2 - (5.4-1.8)/(5.4-(-2))$$

$$X(t) = 1.02$$

$$T_a = 21.8 \text{ C}$$

(3) El Angulo horario solar se necesita en el cálculo del Angulo de incidencia de la radiación solar sobre el colector; es simplemente $w = 15 (1.8)$

$$w = 27 \text{ grados.}$$

(4) A continuación, se determina el coseno del Angulo de incidencia de la radiación solar directa sobre el colector mediante la ecuación 2.10. Si el coseno de θ fuese negativo, significaría que la radiación solar incide sobre la cara posterior del colector. En este caso la energía captada es nula.

$$\cos \theta = \sin(-22.9)\sin(21-44.4) + \cos(-23.4)\cos(21-44.4)\cos(27)$$

$$\cos \theta = 0.91$$

(5) y sobre la horizontal, con la ecuación 2.09

$$\cos \theta = \sin(-2.43)\sin(21) + \cos(-23.4)\cos(21)\cos(27)$$

$$\cos \theta = 0.62$$

(6) Con los dos valores previos el factor de forma es igual a

$$R_b = 0.91/0.62 = 1.47$$

(7) En este paso se determina la radiación solar global instantánea con ayuda de la ecuación 2.12

$$G = 512 \cos^{1.2} [180 + (1.8/10.8)]$$
$$G = 431 \text{ W/m}^2$$

(8) Auxiliándonos también de la ecuación 2.12 la radiación solar directa es

$$G_b = 336 \cos^{1.5} [180 + (1.8/10.8)]$$
$$G_b = 271 \text{ W/m}^2$$

(9) con ambos valores determinamos la radiación difusa, que es igual a $G_d = 431 - 271 = 160 \text{ W/m}^2$.

(10) Entonces, la radiación total que incide en el colector inclinado 44 grados hacia el sur es:

$$G_t = 271 (1.47) + 160 = 558 \text{ W/m}^2 \quad (4.02)$$

(11) Por lo tanto, la energía que está captando el colector a las 1.8 hr es igual a:

$$q_g = G_t \cdot (t_a) = 558 \cdot 0.70 = 391 \text{ W/m}^2$$

Hasta aquí hemos calculado la energía captada por el colector por unidad de área y unidad de tiempo, a partir del paso (12) se procederá a determinar q_p .

(12) De la ecuación 3.9 vemos que $q_p = A (T_c - 21.8)$ [W/m²]. Al inicio de la simulación T_c es igual a la temperatura ambiente T_a . Posteriormente, podemos expresarla como la media aritmética de la temperatura del agua a la entrada y salida del mismo, $T_c = (T_s + T_e)/2$ [C]. Hasta que $T_c \geq T_o$ a la temperatura de operación T_o previamente fijada, hay energía útil aportada por el colector. Con esta condición, se toma en cuenta la inercia térmica del colector, que es consecuencia principalmente del volumen de agua por el contenido. A la temperatura del agua a la entrada T_e , podemos considerarla igual a la temperatura del tanque de almacenamiento térmico, (termotanques) igual a:

$$T_t = T_t' + [q_u \cdot A - q_r] dt / m_t \cdot C_p \quad (4.03)$$

En este caso T_t' es la temperatura del termotanque al tiempo t y T_t lo es al tiempo $t+dt$. En ningún caso podrá ser menor a la temperatura de operación T_o de la incubadora. La temperatura del agua a la salida del colector depende también del calor útil q_u , de la siguiente forma:

$$T_s = T_e + q_u / f_m \cdot C_p \quad (4.04)$$

Pero, como en estado estacionario $q_u = q_g - q_p$, resulta obvio que, tanto la temperatura del termotanque, la del colector al inicio de operación, así como la del agua a la salida del colector, dependen del calor útil q_u , y consecuentemente de q_p . A su vez, la temperatura del termotanque es dependiente del área de captación A , que es precisamente el valor buscado en el diseño. Concretando, tenemos cinco ecuaciones que son mutuamente dependientes y que obligan a resolver el problema mediante procesos iterativos. El proceso para determinar las pérdidas térmicas se inicia suponiendo una temperatura T_c y un área A que se irán corrigiendo en cada una de las iteraciones del programa hasta obtener el valor definitivo. Suponiendo una temperatura de colector de 35 °C, la primera aproximación para las pérdidas térmicas será:

$$q_p = 10 (35 - 21.8) = 132 \text{ W/m}^2$$

(13) Con lo que el calor útil en primera aproximación es

$$q_u = 391 - 132 = 259 \text{ W/m}^2$$

Como criterio a seguir en el programa de cómputo, si $q_u \leq 0$, la bomba de recirculación de agua no funciona, entonces $q_u = 0$.

(14) Como vimos anteriormente, la temperatura que tiene el agua a la salida del colector T_s [°C], es consecuencia

de la temperatura que tiene a la entrada, T_e [C]; de la energía útil captada por el mismo, q_u [W/m²]; así como del flujo másico, \dot{m} [kg/s m²] que lo atraviesa, o sea

$$T_s = [259 / (0.033) (4178)] + 30 = 31.9 \text{ C}$$

(15) Ya estamos ahora en posibilidad de corregir el valor de T_c supuesto inicialmente en el paso (12). La cual en forma simple es igual a:

$$T_c' = (31.9 + 35) / 2 = 33.5 \text{ C}$$

(16) Ahora podemos estimar un valor de q_p más aproximado al "real"

$$q_p' = 10 (33.5 - 25.8) = 77 \text{ W/m}^2$$

(17) Asimismo, un calor útil más aproximado al buscado

$$q_u' = 391 - 77 = 314 \text{ W/m}^2$$

Si continuamos calculando sucesivamente nuevos valores de T_s , T_c' , q_p' y q_u' , llegaremos finalmente a la condición (18) en donde debe cumplirse que $|q_p - q_p'| \leq$ a un valor de convergencia arbitrario. En el momento que se cumpla, podemos decir que el valor más reciente de q_p' , es el valor buscado. Estaremos en condiciones de calcular la energía útil captada por un área unitaria de colector en un intervalo de tiempo dt . Para el ejemplo, el algoritmo convergió rápidamente. Se encontró un valor

de q_p' en la segunda iteración de 78 W/m^2 . Por lo tanto, la energía captada en 12 minutos es:

$$Q_u = (q_g - q_p) * dt$$

$$Q_u = (391 - 78) (720) = 225 \text{ kJ/m}^2$$

Si no se cumple la condición en el paso (18), se actualiza el valor de q_p y se inicia otra prueba a partir de (13). Las instrucciones en el paso (20) es un acumulador de la energía captada por el colector durante el día.

Los pasos (21) a (24), son para tomar en cuenta que al inicio del día la temperatura del colector es menor a la de operación requerida por la incubadora. La condición (21) verifica la temperatura del colector T_c . Si es mayor a la temperatura T_o mínima requerida, hay energía útil aportada por el colector, y el programa continúa en la instrucción (25). Si la condición (21) no se cumple, en (22) se calcula la temperatura del colector. En (23) se actualiza la energía acumulada q_a por el colector, hasta que adquiere la temperatura de operación. En (29), el valor final de q_a durante el día se resta a la energía total Q_t aportada por el colector, obteniéndose una energía útil neta, usada en la determinación del área de captación requerida por el sistema de incubación. En el paso (25) se encuentra la temperatura del termotanque para cada intervalo de tiempo. En las instrucciones (26)

y (27) se realiza el control del tiempo. La actualización de la temperatura del agua a la entrada del colector. Se efectúa en la instrucción (28). El paso (30) verifica si el Área calculada es semejante a la supuesta en cierta medida, si esta condición se cumple termina la simulación y el Área calculada es la requerida. De lo contrario se efectúa otra corrida del programa a partir del paso (1).

Las rutinas del diagrama de flujo de la figura 4.2 previamente resofadas, dieron forma al programa de cómputo del anexo E. Se elaboró en lenguaje Pascal y se corrió en una computadora Printaform 5203, IBM-PC compatible.

Dibujada en base a los valores generados por el mismo programa, en la figura 4.3 se muestra la magnitud y comportamiento de la radiación solar el día 10 de diciembre. La curva a, corresponde a la radiación global G que incide sobre una superficie horizontal; la b, a su componente directa G_b y c, a la componente difusa G_d . La curva d representa la radiación global incidente sobre un plano inclinado, con $B = 43.9$ grados y $\delta = 0$. Observese la conveniencia de que el colector se encuentre perpendicular a los rayos solares, la energía que incide sobre él es mayor y, en consecuencia, será mayor la energía útil que aportará.

Así mismo, la figura 4.4 muestra la energía útil aportada por cada uno de los colectores. Se destaca la sensibilidad del colector de manguera en espiral (c), a

los cambios de temperatura ambiente T_a y la del agua a la entrada T_o , de allí su apariencia irregular.

La figura 4.5 exhibe el comportamiento térmico del termotanque en función del colector que lo alimenta con agua caliente. Si bien cada uno de los tipos de colector propuestos es capaz de proporcionar la energía requerida con mayor o menor área de captación, cada uno de ellos, para un mismo gasto másico, entregará el agua a distinta temperatura, dependiendo del coeficiente global de pérdidas U . Por lo que, bajo las condiciones de diseño, el colector de manguera en espiral resultó inadecuado.

La figura 4.6 muestra el patrón de demanda en el tiempo, de agua caliente por parte de la incubadora, para la potencia de 1.1 kW requeridos constantemente. Los valores instantáneos de la masa de agua caliente que entra a la incubadora se obtuvieron a partir del

$$m(t) = 1.1 \text{ [kJ/s]} / 4178 \text{ [J/kg } ^\circ\text{C]} + T_t(t) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Como se vió en la sección 4.2, la evaporación de agua en las tinas de incubación es de 249×10^{-6} kg/s (21.5 kg/día), pérdidas de agua que se consideraron constantes por las condiciones físicas en que se encuentra la incubadora.

La figura 4.7 muestra la energía captada por el colector autocontenido durante el año a distintas inclinaciones, se destaca el hecho de que la inclinación

más adecuada para las condiciones de diseño, si esta no cambia durante el año es la de $B = 40$ grados.

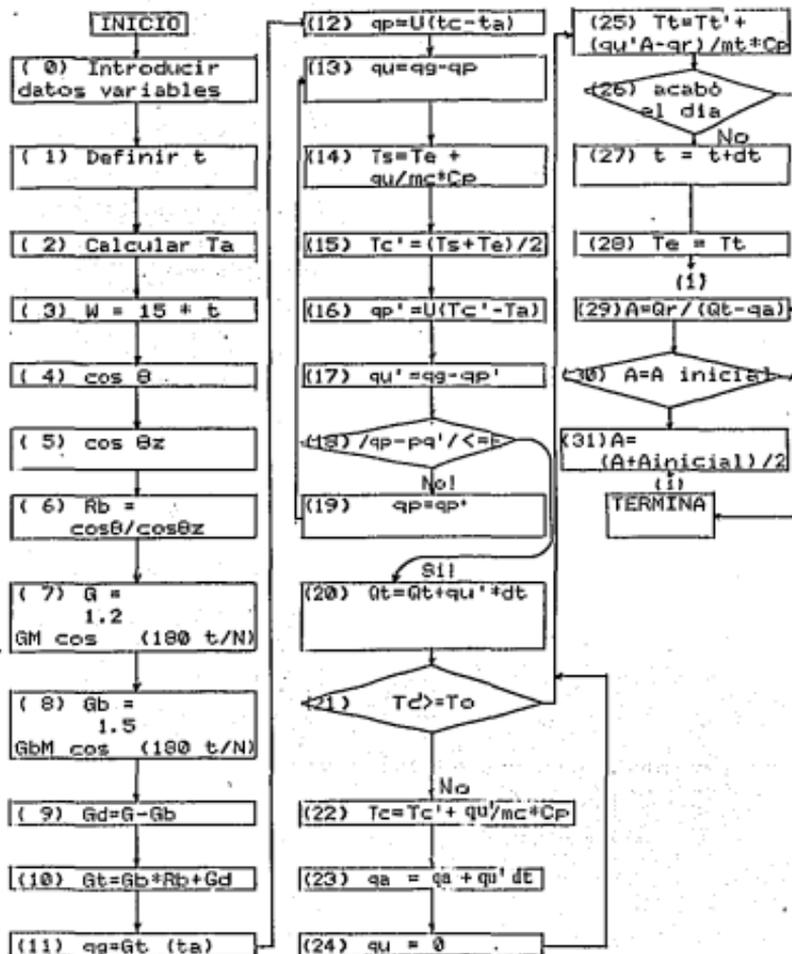
En el siguiente capítulo, se aprovecharán los valores de área requerida, obtenidos mediante el programa de cómputo, para efectuar la intercomparación económica de los sistemas de captación propuestos.

La tabla 4.1 muestra los resultados de diseño obtenidos mediante el programa de cómputo. Se observa que las dimensiones requeridas para el mes de junio son significativamente menores. Si se adoptara esta superficie para su uso en la incubadora, durante el mes de diciembre la aportación de agua caliente sería insuficiente.

Tabla 4.1 Resultados de diseño

	colector autocontenido	estanque solar
Diciembre		
Energía captada [MJ/día m ²]	9.3	8.2
Área requerida [m ²] (programa)	10.2	11.6
Área usada para diseño	11	12
Junio		
Energía captada	13	14.1
Área requerida	7.2	6.7

Figura 4.2 Incubadora Solar
Diseño del área de captación
Diagrama de flujo



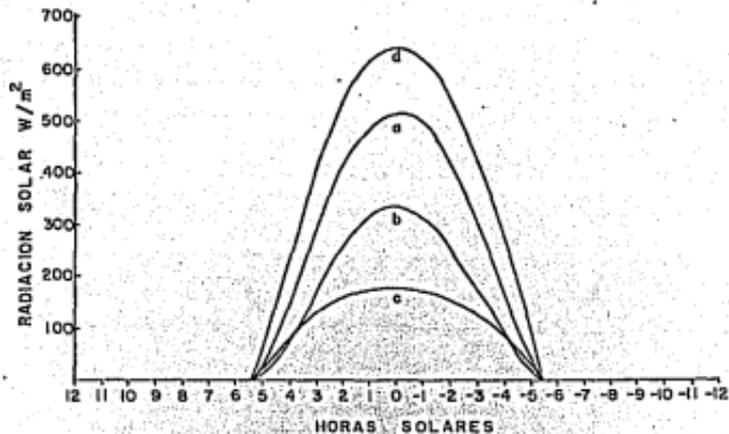


Figura 4.3 Radiación solar incidente el 10 de diciembre sobre la horizontal a) Global b) directa c) difusa d) Radiación global sobre una superficie inclinada $D=44$ grados $\delta=0$.

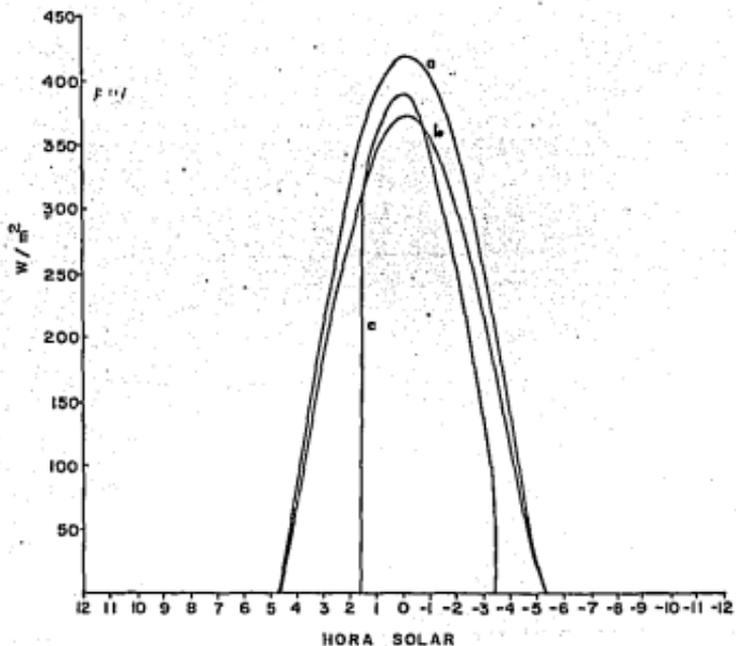


Figura 4.4 Potência útil instantânea aportada en diciembre por a) Colector autocontenido b) Colector tipo estanque somero c) Colector de manguera en espiral

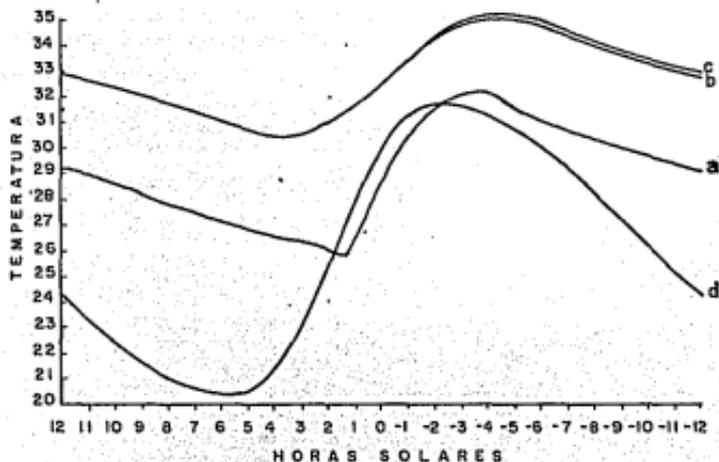


Figura 4.5 Temperatura ambiente (d) y comportamiento térmico del termotanque con a)colector en espiral b)estanque somero c)Autocontenido para el día 10 de diciembre.

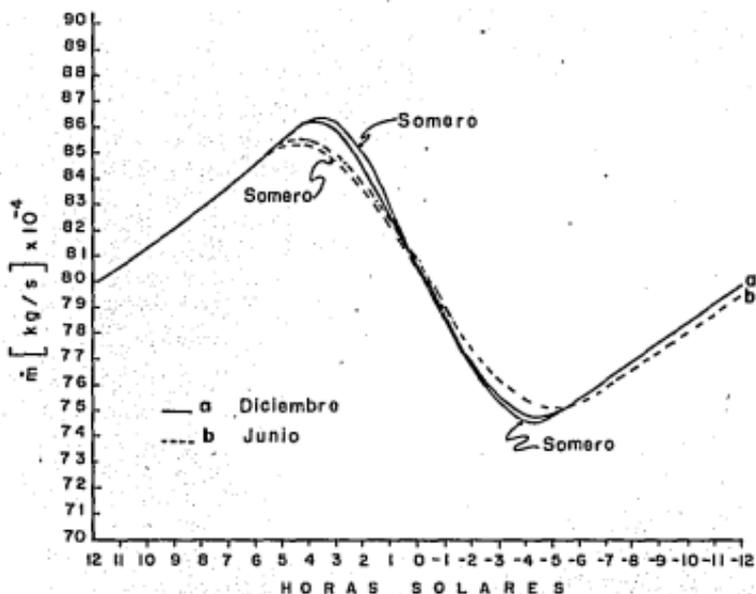


Figura 4.6 Patrón de demanda de agua caliente por parte de la incubadora en los meses de diciembre y junio.

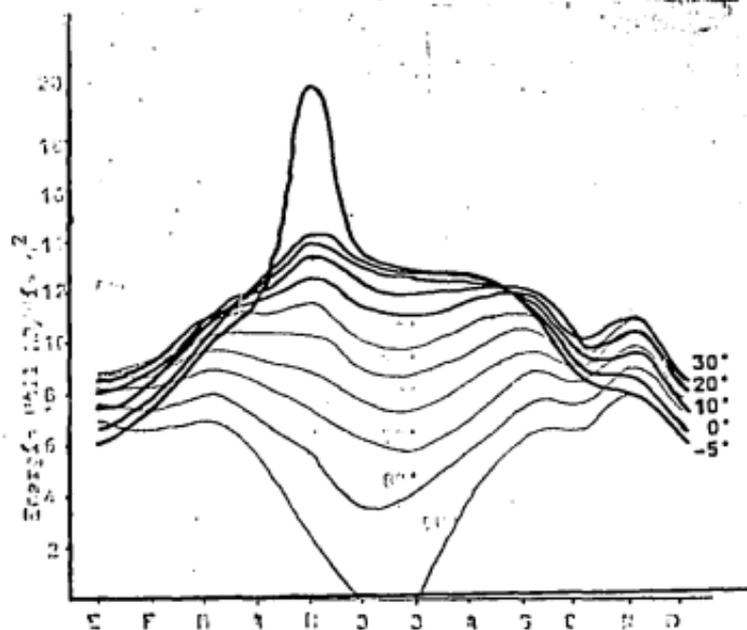


Figura 4.7 Potencia útil aportada por el colector autocontenido durante el año a distintas inclinaciones.

CAPITULO V

ASPECTOS DE INGENIERIA ECONOMICA

A continuación haremos una breve revisión de algunos conceptos y fórmulas de ingeniería económica. Nos serán de utilidad al evaluar, analizar y comparar los distintos sistemas de calefacción que tendremos como alternativas. Con estas herramientas de índole monetaria estaremos en posibilidad de efectuar una selección más acertada; de tal forma que utilicemos más eficientemente nuestros escasos recursos financieros. La información sobre ingeniería económica del presente capítulo se obtuvo de las referencias (20,32,37 y 38).

Como ejemplo, se analizarán los dos sistemas de calefacción solar propuestos en el presente trabajo que resultaron adecuados para las condiciones requeridas; y se compararán con el sistema eléctrico tradicional.

5.1 CONCEPTOS Y FORMULAS DE INTERES

Para la economía el valor del dinero cambia en el tiempo. Esta variación temporal está considerada en el costo del capital llamado interés o tasa de descuento. Este costo puede ser una tasa de interés general (r), que no toma en cuenta la inflación (f) o, una tasa de interés efectiva $i = [(1+r)/(1+f)] - 1$, (37), que si la considera. En la expresión anterior (f) es la tasa de inflación.

Según el caso, es la tasa de inflación del energético involucrado o una tasa de inflación general.

Para determinar el importe (F)uturo que recibiríamos por una cantidad invertida (P)resente al cabo de un cierto período (n) y una tasa de interés (i), pueden seguirse dos criterios: Uno, aplicar la tasa de interés al término de cada período sólo al capital, con lo que obtendríamos

$$F = P (1 + n \cdot i) \quad (5.01)$$

al factor $(1 + n \cdot i)$ se le llama factor de interés simple. El otro criterio sería aplicar la tasa de interés, a la suma del capital más el interés del período inmediato anterior, obteniendo

$$F = P (1 + i)^n = P \cdot B \quad (5.02)$$

al factor (B) se le conoce como factor de interés compuesto. Este último factor es más utilizado que el de interés simple mostrado en (5.1).

Al inverso del factor de interés compuesto B^{-1} , se le conoce como factor de valor presente. Se le emplea para encontrar el valor presente (P), de una cantidad futura (F); o sea:

$$P = F \cdot (1 + i)^{-n} = F \cdot B^{-1} \quad (5.03)$$

Es poco frecuente que una inversión se recupere en

un solo período o ciclo económico. Lo más común es que la recuperación se obtenga en (n) pagos, utilidades o ahorros iguales. Si (A) representa una serie de recuperaciones iguales de capital; en nuestro caso serían ahorros de energía obtenidos gracias a la instalación solar; la cantidad total (F) que se tendrá en el futuro, es igual a la suma de las cantidades futuras individuales de cada pago (A); o sea:

$$F = A + A(1+i) + \dots + A(1+i)^{n-2} + A(1+i)^{n-1} \quad (5.04)$$

al multiplicar (5.04) por (1+i) se obtiene:

$$F(1+i) = A(1+i) + A(1+i)^2 + \dots + A(1+i)^{n-1} + A(1+i)^n$$

restando a esta última la ecuación (5.04), resulta:

$$F(1+i) - F = -A + A(1+i)^n \quad (5.05)$$

de donde

$$F/A = ([1 + i]^n - 1) / i \quad (5.06)$$

Al factor resultante podemos llamarle factor para el valor futuro de una serie de recuperaciones compuestas iguales.

Por otra parte si lo que nos interesa es conocer la recuperación requerida anualmente A, para acumular una cantidad futura F, usamos el inverso del factor definido en (5.06), lo denominaremos factor de amortización de un

valor futuro mediante una serie de recuperaciones iguales, entonces

$$A = F (i / [B - 1]) \quad (5.07)$$

Al sustituir la ecuación (5.02) en la (5.07) se obtiene el factor de recuperación de capital $[iB / (B-1)]$

$$A = P ([1 + B] / [B - 1]) \quad (5.08)$$

Este factor es de utilidad para cuando se desea recuperar el capital invertido más los intereses, en una serie de cantidades iguales, al finalizar cada cada ciclo durante un período de (n) años. Al hacer la última recuperación no debe quedar ninguna cantidad invertida.

Finalmente, llegamos a la definición del factor de valor presente para una serie de recuperaciones de capital iguales. Este factor es el inverso del factor definido en la ecuación (5.08), o sea:

$$FVP = (B - 1) / (1 + B) \quad (5.09)$$

Se utiliza para determinar que cantidad única (P) debe depositarse hoy, de manera que puedan hacerse recuperaciones iguales (A) al final de los próximos (n) años. (P) se encuentra en función de (A).

$$P = A ([B - 1] / [1 + B]) \quad (5.10)$$

Reescribiendo a (5.10) en forma funcional, puede

observarse que el factor de valor presente (FVP) es

$$P/A = (FVP)(n, i) \quad (5.11)$$

puede considerarse como una razón de recuperación de capital. Cuando el cociente P/A en una inversión actual es menor al (FVP), la inversión es rentable. Cuando es igual al (FVP), es indiferente. Cuando es mayor al (FVP), esta no es rentable y la inversión podría ser rechazada.

5.2 METODOS DE ANALISIS ECONOMICO DE ALTERNATIVAS

Toda decisión económica requiere de la existencia de una base de comparación que resuma las diferencias de las alternativas de inversión.

Los índices de comparación más usuales son: El valor presente, El valor equivalente anual, La cantidad capitalizada equivalente, El valor futuro, La tasa interna de retorno, El período de recuperación y El Valor potencial. Cada uno de estos métodos tienen cualidades que los hacen adecuados para una aplicación en particular. En nuestro caso solo trataremos los métodos que se adaptan a la evaluación económica de alternativas fototérmicas; comenzaremos con:

EL VALOR PRESENTE. Definiendo a un flujo de caja como al conjunto de ingresos y egresos de capital, no necesariamente de la misma magnitud, podemos decir que: El valor presente es una cantidad en el momento actual ($t = 0$), que es equivalente al flujo de caja (Fj), de una

inversión (j), a una tasa de interés (i), con una vida útil de (n) años. Usando la ecuación (5.03), esto podemos expresarlo de la siguiente forma:

$$VP(i) = F_j \frac{1}{(1+i)^0} + F_j \frac{1}{(1+i)^1} + \dots + F_j \frac{1}{(1+i)^n}$$

$$VP = \sum_{t=0}^n F_j (1+i)^{-t} \quad (5.12)$$

El valor presente, posee características que lo hacen indicado como base de comparación, porque cualquier secuencia de ingresos y egresos, genera un valor presente único para un cierto valor dado de (i).

CANTIDAD ANUAL EQUIVALENTE. La cantidad anual equivalente, posee características similares al método de valor presente. La similitud es evidente cuando se observa que cualquier flujo de caja puede convertirse en una serie de pagos anuales iguales, calculando primero el valor presente de la serie original y multiplicando luego este valor por el factor de recuperación de capital para una serie de pagos iguales, ecuación (5.08). En consecuencia la cantidad equivalente anual para una tasa de interés (i) y (n) años puede definirse como:

$$AE(i) = VP(i) \left[\frac{(1+i)^n}{i} \right] \quad (5.13)$$

$$AE(i) = \left[\sum_{t=0}^n F_j (1+i)^{-t} \right] \left[\frac{(1+i)^n}{i} \right]$$

TASA DE RETORNO. O tasa interna de retorno. Se define como la tasa de interes que reduce a cero el valor presente de una serie de ingresos y egresos. Es decir la tasa de retorno para la propuesta de inversión (j), con una vida útil de (n) años, es la tasa de interes (i*) que satisface la ecuación.

$$VP(i^*) = \sum_{t=0}^n F_j [1 + i^*]^{-t} = 0 \quad (5.14)$$

Esta tasa de retorno es generalmente encontrada por tanteo o por métodos gráficos.

Para situaciones de inversión en las cuales el conocimiento sobre el futuro de las tasas de interes sea altamente incierto, la tasa de retorno puede constituir una forma aceptable y fácil para comparar la factibilidad económica de alternativas de inversión.

5.3 EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

La intercomparación económica de las alternativas se hará mediante los métodos de costo anual equivalente y el de valor presente. Se plantea a manera de...

PROBLEMA.- Se desea instalar una incubadora de peces. Las opciones para la calefacción del agua son : Una resistencia eléctrica de 1 kW o la energía solar. Hay dos tipos de colectores solares planos como alternativas. El de manguera de 3"Ø autocontenido y el tipo estanque somero. Los resultados obtenidos en el diseño previo del área de captación, mediante la simulación numérica,

mostraron que el colector de manguera en espiral no proporciona las temperaturas requeridas en esta aplicación. Los costos iniciales C_0 , en base al área de captación requerida; el costo anual de la energía eléctrica consumida $E(j)$ y los costos de operación y mantenimiento $OM(j)$ de las opciones, se muestran en la tabla 5.3. En la tabla 5.1 se muestran con mayor detalle los costos de inversión iniciales. Se supone una tasa de descuento de $r = 10\%$ anual y dos escenarios económicos. Uno, sin inflación y el otro, con una tasa inflacionaria del $f = 5\%$ anual; tanto en la energía como en bienes de consumo general (32). Los valores de los factores utilizados se muestran en la tabla 5.2. Cuál es la mejor alternativa desde el punto de vista económico?

SOLUCION.- Para la opción eléctrica, se obtiene que el costo anual está dado por:

$$CA_e = A_e + E_e + OMe \quad (5.15)$$

aquí la anualidad A_e incluye la cantidad a pagar para recuperar la inversión, más el costo o interés por el uso del capital; E_e , representa el costo de la energía eléctrica consumida y OMe , los costos de operación y mantenimiento. Por simplicidad estos últimos se suponen iguales al 10% de la inversión inicial C_0 . Los costos de recuperación y retiro se consideraron de igual magnitud en todos los casos, por lo que se anulan mutuamente.

Aplicando la ecuación 5.08 a la 5.15 obtenemos

$$CAe = \frac{[IB]}{[B-1]} [Coe + n (Ee + OMe)] \quad (5.16)$$

recordemos que $B = (1+i)^n$. La multiplicación directa de

Ee y OMe por n fue posible por conocer sus valores presentes. Si no es el caso, debe usarse la ecuación 5.12. Sin inflación la tasa efectiva de interés $i = r = 10\%$, entonces $B = (1 + 0.1)^{7.5} = 2.0438$. Sustituyendo valores en la ecuación 5.16

$$CAe = \frac{0.1 (2.0438)}{2.0438 - 1} [125 + 7.5 (518+13)]$$

$$CAe = \$ 80.4 \text{ USD}$$

Con la inflación igual a 5% anual, la tasa efectiva de interés $i = [(1+0.1) / (1+0.05)] - 1 = 0.0476$, entonces $B = (1 + 0.0476)^{7.5} = 1.4173$ y

$$CAe' = \frac{0.0476 (1.4173)}{1.4173 - 1} [125 + 7.5 (518+13)]$$

$$CAe' = \$ 66.4 \text{ USD}$$

Los sistemas solares se evalúan de igual forma. Notando solamente, que para ellos el costo de la energía es cero. Se estima que tendrán una vida útil de 15 años

y costos de operación y mantenimiento anuales del 2% de la inversión inicial Co.

Sin inflación el costo anual equivalente del colector autocontenido es:

$$CAa = 0.13147 [1031 + 15 (21)]$$

$$CAa = \$ 177 \text{ USD}$$

con inflación

$$CAa' = 0.0948 [1031 + 15 (21)] = \$ 128 \text{ USD}$$

Ayudándonos también con la expresión 5.17, sin inflación el colector tipo estanque somero tiene un costo equivalente anual dado por:

$$CAa = 0.13147 [539 + 15 (11)]$$

$$CAa = \$ 93 \text{ USD}$$

con inflación este costo es

$$CAa' = 0.0948 [539 + 15 (11)]$$

$$CAa' = \$ 67 \text{ USD}$$

Los resultados previos obtenidos con el método del costo equivalente, así como los que a continuación se determinan mediante el método del valor presente, se concentran en la tabla 5.4.

Hay que notar que al aplicar el método del valor presente, se requiere que las alternativas con distinta vida útil estimada, sean comparadas sobre períodos iguales de tiempo. Se tomará como base los 15 años de vida útil estimada para los colectores como base de comparación. Además se tomará en cuenta el valor de reemplazo del sistema eléctrico a los 7.5 años, que es su vida útil estimada. Con estas consideraciones, el sistema eléctrico tiene un valor presente sin inflación durante los 15 años de operación dado por :

$$VPe = Co + n [Ee + MOe] + Vr$$

$$VPe = 125 + 15 [518 + 13] + 125$$

$$VPe = \$ 8215 \text{ USD}$$

Con inflación, el valor presente de la energía consumida, así como el valor de reemplazo y los costos de operación y mantenimiento, se ven afectados de la siguiente forma:

$$VPe' = Co + FVPA(15, 0.0476) * FRC(15, 0.1) [n (Ee + MOe)] \\ + FVP(7.5, 0.0476) [VF(0.5, 0.1) Vr]$$

$$VPe' = 125 + 10.55 * 0.1315 [15 (518 + 13)] \\ + (1.0476)^{-7.5} [(1.1)^{7.5} (125)]$$

$$VPe' = \$ 11,355 \text{ USD}$$

Mediante el factor de recuperación de capital (FRC) para 15 años sin inflación, igual a 0.1315, se obtiene la anualidad a pagar durante 15 años para cubrir los \$7965 USD; valor presente de los costos de la energía más los costos de operación y mantenimiento. El factor de valor presente (FVPA) = 10,55 basado en un período de 15 años y una tasa de interés efectiva con inflación de 0.0476; nos proporciona el valor presente de estas anualidades con inflación. En el tercer sumando, a partir del valor de reemplazo presente de \$125 USD, se encuentra el valor futuro a 7.5 años sin inflación y, posteriormente se determina el valor presente con inflación.

Para el colector autocontenido, sin inflación, el valor presente de los 15 años de operación será simplemente:

$$VP_a = 1031 + 15 (21)$$

$$VP_a = \$ 1,346 \text{ USD}$$

con inflación el valor presente es:

$$VP_a' = 1031 + 7.606 (0.0948) [15 (21)]$$

$$VP_a' = \$ 1,258 \text{ USD}$$

De igual forma, el valor presente sin inflación del colector tipo estanque somero en base a 7.5 años será:

$$VP_b = 539 + 15 (11)$$

VPs = \$ 704 USD

Con inflación adquiere el valor de :

$$VPs' = 539 + (7.606)(0.0948) [15 (11)]$$

VPs' = \$ 658 USD

Como puede verse en la tabla 5.4, la alternativa más económica resultó ser el colector tipo estanque somero. A reserva de otras consideraciones, desde el punto de vista del inversionista, resultó ser la opción más atractiva.

Tabla 5.1 Detalle del costo inicial de alternativas
(precios al menudeo en mayo de 1987 en Mérida, Yucatán)

concepto	OPCION		
	Eléctrica	Autocont.	Somero
		\$/m2	\$/m2
Resistencia	150,000		
Vidrio de 5mm	---	16,000	16,000
Lámina galv. cal.22	---	15,765	---
Poliestireno	---	2,995	---
Fierro comercial	---	2,420	---
Manguera de 3" Ø	---	32,370	---
Tapones de 3" Ø	---	13,000	---
Manguera de 3/4" Ø	---	---	---
Tuberías y acc.	---	15,207	13,940
Termotanques	---	10,182	9,333
Bomba de 1/4 hp	---	4,588	4,205
Madera	---	---	---
Estanque mampostería	---	---	10,424
Costo por metro cuadrado	---	112,527	53,902
Area requerida		11	12
Costo total	150000	1,237,797	646,824

Tabla 5.2 Valores de los factores económicos usados

Período	Factor de rec. de capital (FRC)	Factor de valor presente p/anualidad (FVPA)
n	$i * B / (B-1)$	$(B-1) / i * B$
Sin inflación $i = r = 10\%$		
7.5	0.1958	5.103
15	0.1315	7.606
Con inflación $f = 5\%$ anual $i = (1+r)/(1+f) = 0.0476$		
7.5	0.1616	6.186
15	0.0948	10.55

Tabla 5.3 Resumen de costos de alternativas

Opción	Vida media esperada	Costo Inicial Co (1)	Costo Anual Energía (2)	Costo Anual Op. y Mant.
Eléctrica	7.5	150,000 (125) (3)	621,567 (518)	15,000 (13)
Autocontenido	15	1,237,797 (1,031)	0	24,756 (21)
Estanque Som.	15	646,824 (539)	0	12,936 (11)

(1) Ver detalle en tabla 5.1

(2) Se aplicó la tarifa 2 de CFE de mayo de 1987 a un consumo de 1440 kWh bimestral.

(3) Dolares de mayo de 1987 \$1200.00 / \$1 USD.

Tabla 5.4 Resumen de resultados

Opción	sin inflación		con inflación	
	CA	VP	CA	VP
	\$USD (\$1200 / \$USD, mayo de 1987)			
Eléctrico	804	8215	664	11355
Autocontenido	177	1346	128	1258
Somero	93	704	67	658

Tabla 5.5 Costo anual y valor presente por unidad de energía [\$USD/MJ]

Opción	sin inflación		con inflación	
	CA	VP	CA	VP
Electrico	.023	.016	.019	.022
Autocontenido	.005	.002	.003	.002
Estanque somero	.003	.001	.002	.001

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las experiencias y conocimientos adquiridos a través de la elaboración de la presente tesis son bastos y muy variados. Se aprendió que al pretender usar a la energía solar en una aplicación concreta, el ingeniero debe involucrarse en aspectos aparentemente ajenos y para él desconocidos, que influirán en forma significativa en el diseño final del sistema utilizado. Lo anterior viene al caso porque al pensar en la calefacción de la incubadora mediante la energía solar, se encontró con que los metales y sus sales podrían llegar a ser perjudiciales a los peces incubados (33,35,40). Por esta razón, se propone el uso de colectores solares planos de plástico, en sustitución de los colectores metálicos convencionales.

Se diseñó y construyó un colector con absorbedor y ductos de polietileno con manguera de 3" de diámetro. Resultó térmicamente eficiente. Además de conservar las ventajas del colector solar plano convencional de metal, por el volumen de agua por él contenido (60 lt/m²), en algunas aplicaciones, entre ellas la doméstica, puede ser usado sin tanque de almacenamiento térmico; representando una cualidad ventajosa respecto a los que no tienen esta

característica. Por ejemplo, en una aplicación doméstica no es necesario modificar la instalación original. Basta con intercalarlo entre el tanque principal y el punto de uso final del agua caliente. Por otro lado, por estar construido de mangueras, no tiene problemas de fugas por la presión hidrostática, molestia que ha obligado a descartar otros diseños de colector autocontenido. El diseño y método de construcción del colector autocontenido de manguera de plástico es producto del trabajo en esta tesis.

Para contar con otras opciones, se eligió al colector de manguera en espiral por ser sumamente fácil de construir y bastante barato. Lamentablemente, el prototipo construido que se caracterizó, puso de manifiesto su alto coeficiente de pérdidas térmicas, y su baja eficiencia óptica, características que lo hicieron inadecuado para la aplicación estudiada en esta tesis. Se recomienda tomarlo en cuenta en aplicaciones a más baja temperatura; y dotarlo de aislante térmico y cubierta transparente para mejorar sus características térmicas.

También por su sencillez y facilidad de construcción se pensó en el colector tipo estanque somero. El cual a la postre resultó el más económico, cubriendo satisfactoriamente los requisitos de diseño.

Se recomienda abordar el tema de los materiales no metálicos para la fabricación de colectores solares

planos. Los plásticos tienen propiedades químicas, mecánicas y económicas que los hacen atractivos en aplicaciones como la presente. En la actualidad se ha solucionado el problema de la degradación de los plásticos a causa de la radiación solar, mediante la adición de aditivos inhibidores tales como el negro de humo.

La alternativa solar como fuente de energía hasta la fecha se ha desaprovechado. Esta tesis pretende anular en parte, el desconocimiento de las múltiples aplicaciones que pueden dársele a la energía solar, mostrando una de ellas. Se destaca la simplicidad de uso tanto de los sistemas de captación físicos, como de las herramientas teóricas y matemáticas que se mostraron para estimar la magnitud de la energía captada. Como se vió, tan fácil es construir los colectores solares como operarlos. Su caracterización, basándonos en la eficiencia térmica, es muy sencilla de realizar. Los dos parámetros básicos determinados experimentalmente, factor de eficiencia óptica (t_a) y coeficiente global de pérdidas U son suficientes para dimensionar el sistema.

En base al trabajo desarrollado se detectó la escasez a nivel nacional de datos de insolación así como de instrumentación solar fabricada en México. Intentando mitigar esta necesidad, se diseñaron y construyeron un Erastómetro y un Pirheliógrafo. Ambos son de diseño

original. El primero es un instrumento que nos permite medir, tanto ángulos de incidencia de la radiación solar, como la inclinación del colector evaluado, de manera sencilla y directa. El segundo, mediante la lupa movida por un mecanismo de relojería, quemaba un papel registrador, proporcionando las horas de insolación. Ambos son instrumentos bastante económicos y confiables.

Se recomienda apoyar el desarrollo de la instrumentación en solarimetría, principalmente actinómetros y sistemas de captación y manejo de datos. Con la idea de disminuir los costos de adquisición y la dependencia del exterior difundir los logros obtenidos para su fabricación masiva y menguar en lo posible nuestras deficiencias en el sector. Así mismo, se sugiere impulsar el monitoreo y evaluación de la radiación solar a nivel nacional, ya sea mediante la medida directa con una red solarimétrica que cubra el territorio de la República Mexicana. Galindo (19), recomienda una estación solarimétrica por cada 500 km²; o de manera indirecta, como por ejemplo la fotointerpretación de imágenes meteorológicas obtenidas por satélites.

La alternativa solar resultó ser la más atractiva respecto a la eléctrica, tanto desde el punto de vista económico como técnico. El valor presente así como la anualidad equivalente resultaron de menor magnitud para el sistema solar, que para el método eléctrico

convencional. Para su aplicación en la incubación, a reserva de evaluar sus propiedades bajo otros criterios de diseño y distintos usos el colector tipo estanque somero resultó el más económico y fácil de construir. Considerando a los ahorros de energía como ingresos, cualquiera de los sistemas solares se pagan en cuando mucho dos años.

La opción solar resultó ser una alternativa apropiada para economías con inflación. Como puede verse en la tabla 5.4 el costo anual y el valor presente resultaron menores con inflación que sin ella en todos los casos. Esto se explica por el costo nulo de la energía utilizada y los bajos costos de operación y mantenimiento.

Por la abundancia del recurso solar, costos crecientes y disponibilidad cada vez menor de las fuentes de energía convencionales, factibilidad técnica y económica del uso de los colectores solares planos, así como por la urgencia por diversificar nuestras fuentes de energía, en base a los resultados técnicos y económicos obtenidos en la presente tesis a nivel de diseño, se recomienda enfáticamente el uso del "COLECTOR SOLAR PLANO" en la incubación de peces.

Finalmente, conviene destacar que, a través del comportamiento y sensibilidad del programa de diseño utilizado, así como por la congruencia de los resultados

obtenidos, se puede concluir que la tesis representa un paquete de diseño de amplia aplicabilidad. Si bien se utilizó para dimensionar un sistema solar utilizado en la incubación de peces, los principios teóricos así como la información y conceptos involucrados son útiles y adecuados para evaluar cualquier sistema solar que tenga como elemento principal a un colector solar plano.

REFERENCIAS

- 1) Aguilera, H.P., Noriega, C.P., Guzmán, Ch.J. ; "¿Qué es la Acuicultura ?", Secretaría de Pesca, México, 1985.
- 2) Almanza, R. y López, S., "Radiación Solar Global en la Republica Mexicana Mediante Datos de Insolación". Instituto de Ingeniería, UNAM, 1975.
- 3) Alvarado, R. y Gudino, D., "Calentadores Solares Autocontenidos , Alternativa para Economía en Crisis", Memorias de la VII Reunión Nacional de Energía Solar, ANES, 1983.
- 4) Anónimo, Anuario Estadístico de Pesca 1984, Secretaría de Pesca, México.
- 5) Anónimo, " A Flat-plate Solar Collector System for Use In Acuicultura", The Progressive Fish Culturist, Vol. 47, No. 2, april, 1985.
- 6) Anónimo, "Construction and Operation of a Solar-Heated Hatchery for Brine Shrimp.", The Progressive Fish Culturist, Vol.46, No.4, October 1984.
- 7) Anónimo , Manual de Piscicultura, Secretaría de Pesca México, 1982.

- 8) Ballina, E. La energía Solar en México. Datos Para Una Cronología. La Revista Solar , No. 11-12, 1986.
- 9) Beckman, W.A., et. al., Units and Symbols in Solar Energy, Solar Energy Vol. 21, pp. 65-68, 1978,
- 10) Castellanos, A. y Escobedo, M., La Energía Solar en México, Situación Actual y Perspectivas, Centro de Ecodesarrollo, 1980.
- 11) Chargoy, N., Proposición de Normas Nacionales para la Evaluación de Colectores Solares Planos., Memorias de la IX Reunión Nacional de Energía Solar, ANES, 1985.
- 12) Clark, A.F., Dickinson, W.C., "Shallow Solar Ponds", Solar Energy Technology Hand Book , part A. Dickinson, W.C., and Cherenisinoff, P.N., Marcel Dekker, Inc. New York, 1980.
- 13) Contreras, F., "Las Lagunas Costeras Mexicanas", Centro de Ecodesarrollo, Secretaría de Pesca, 1985.
- 14) Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, 1980.
- 15) Dunde, P.J., Solar Thermal Engineering, John Wiley and Sons, 1980.
- 16) Estrada, C.V. y Fernández, J.L.Z., "Métodos para Elaborar Mapas Solarimétricos en Latinoamérica.", Instituto de Ingeniería, UNAM. México, 1983.

- 17) Fernández, J.L., "Modelo Simplificado para Calcular Pérdidas Térmicas de Captadores Solares Planos.", Informe preparado para la OLADE, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1983.
- 18) Fernández, J.L., y Estrada, C.V., "Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana.", Instituto de Ingeniería, UNAM, No.472, Octubre de 1983.
- 19) Galindo, I. y Chaves, A., "Estudio del Clima Solar en la República Mexicana.", Instituto de Geofísica, UNAM, México, 1977.
- 20) Hall, A.D., Ingeniería de Sistemas, CECSA, México, 1983.
- 21) Hernández, E., La distribución de la Radiación Global En México Evaluada Mediante la Fotointerpretación de la Nubosidad Observada por Satélites Meteorológicos, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1976.
- 22) Jauregui, E., "La Radiación Global en México", Revista Recursos Hidráulicos, SARH, Vol.VII, No.2, México, 1978.
- 23) Kreider, J.F. and Kreith, F., Solar Energy Handbook, Mc Graw Hill, 1981.

- 24) Kruder Solcut, M., et al, Glossary of Terms Used in Solar Energy, Solar Energy, Vol. 33 No. 1, pp.97-114, 1984.
- 25) Lazcano, S.F., "Calefacción de un Estanque Mediante Energía Solar", Análisis de Factibilidad, Reporte interno, Cinvestav Mérida, Diciembre de 1986.
- 26) Lazcano, S.F., Diseño y Construcción de un Pirheliógrafo de bajo costo., Cinvestav Mérida, Reporte Interno, febrero de 1987.
- 27) Lazcano, S.F., El Colector Solar Plano, Cinvestav Mérida, Reporte Interno, Mayo de 1986.
- 28) Lazcano, S.F. "El Erastómetro, un Nuevo Instrumento para Medir Angulos en Solarimetría", Cinvestav Unidad Mérida, Reporte Interno, Septiembre de 1986.
- 29) Lazcano, S.F., Incubación de Bagre utilizando Energía Solar, Requisitos Biológicos y Sistema Propuesto, Cinvestav Mérida, Reporte Interno, Febrero de 1986.
- 30) Lazcano, S.F., Modelo Para Estimar la Temperatura Ambiente Instantánea, Reporte Interno, Cinvestav Mérida, mayo de 1986.
- 31) Manriquo, J.A., Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, Harla, México, 1984.

- 32) Martínez, M., Fernández, J.L., Economía de las Fuentes Renovables de Energía, inédito.
- 33) Monteza, J.R., "Métodos intensivos del Bagre (*Ictalurus punctatus* R.) Bajo Condiciones Controladas (inédito), Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- 34) Necati, O.M., Transferencia de Calor, Mc.Graw Hill, 1979.
- 35) Reichenbach, H.H., y Klinke, Enfermedades de los Peces, Acribia, España, 1982.
- 36) Selecciones del Scientific American, El Sistema Solar, Editorial Blume, España.
- 37) Taylor, G.A., Ingeniería Económica, Edit. Limusa, México, 1978.
- 38) Thuesen, H.G., y otros, Ingeniería Económica, Edit. Prentice Hall, 1981.
- 39) Urbina, P.R., Acuicultura en México, 2o. Simposio Latinoamericano de Acuicultura, Departamento de Pesca, México, 1980.
- 40) Wheaton, F.W., Acuacultural Engineering, John Wiley and Sons, 1977.

ANEXO A

LA TEMPERATURA AMBIENTE

Se ha observado que la temperatura ambiente tiene un comportamiento diario que puede aproximarse mediante una función senoidal. Tiene un valor mínimo T_m al tiempo t_1 alrededor de una hora antes del amanecer, y un valor máximo T_M al tiempo t_2 , cerca de dos horas después del mediodía solar. Ver figura A.1.

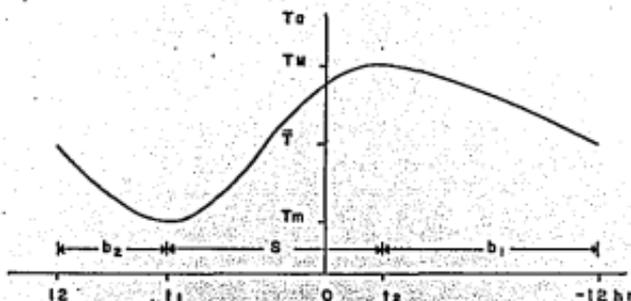


Figura A.1 Temperatura ambiente, definición de variables.

Definiendo una temperatura media $\bar{T} = (T_M + T_m)/2$, así como un incremento de temperatura $dT = \bar{T} - T_m = T_M - \bar{T}$; además, observando que la función seno varía de -1 en $3\pi/2$ a 1 cuando el argumento adquiere el valor de $\pi/2$; podemos definir también, en base a la figura A.1, una ecuación

para estimar la temperatura ambiente instantánea de la siguiente forma:

$$T_a(t) = \bar{T} + dT [\text{sen}(\pi X(t))] \quad (a.1)$$

En donde $X(t)$ es una función del tiempo que varía de $3/2$ a $1/2$, de tal manera que el argumento del seno adquiere valores de $3\pi/2$ a $\pi/2$, permitiendo obtener la temperatura mínima T_m cuando el seno vale -1 y la máxima T_M , cuando adquiere el valor de 1 .

$$X(t) = \begin{cases} 3/2 - s & \text{si } t_1 \geq t \geq t_2 \\ 3/2 - b_1 & \text{si } t_2 \geq t \geq -12 \\ 3/2 - b_2 & \text{si } 12 \geq t \geq t_1 \end{cases} \quad (a.2)$$

en donde

$$s = \frac{t_1 - t}{t_1 - t_2} ; b_1 = \frac{24 - t_1 + t}{24 - (t_1 - t_2)} ; b_2 = \frac{t - t_1}{24 - (t_1 - t_2)}$$

observar que el tiempo t está en horas solares, positivas en la mañana (de 12 a 0) y negativas para la tarde (de 0 a -12).

ANEXO B

CONCEPTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La sencillez aparente de los colectores solares propuestos, encubren un comportamiento térmico complejo. En ellos se dan las principales formas de transferencia de calor. Intercambio de calor por radiación entre la cubierta y el absorbedor, así como entre el colector y el cielo; transferencia de calor por convección tanto natural en la cavidad formada por la cubierta y el absorbedor, como forzada entre el colector, el fluido de trabajo y el medio ambiente; transferencia de calor por conducción en todos los componentes del colector y sistema de incubación así como transferencia de calor por cambio de fase en la evaporación del agua en las tinas incubadoras y en el estanque somero. Tratando de auxiliar en la solución de estos problemas, en el presente anexo se presentan en su forma general las ecuaciones que nos permiten evaluar los flujos de energía antes descritos.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

Como comentamos en el párrafo anterior, en nuestro sistema de incubación solar se dan dos casos generales de transferencia de calor por radiación. a) El intercambio de radiación entre una superficie sumamente pequeña A_1 ,

el colector por ejemplo; respecto a una superficie envolvente relativamente mucho mayor A2, el cielo por ejemplo. De tal manera que $A_1/A_2 \cong 0$. En este caso el flujo neto de energía entre las dos áreas está determinado por:

$$q_r = e \sigma (T_1^4 - T_2^4) \text{ W/m}^2 \quad (\text{b.1})$$

En donde e es la emisividad de la superficie a mayor temperatura y σ es la constante de Stephan-Boltzman ya definida anteriormente en el capítulo III. Las temperaturas T_1 y T_2 están en grados Kelvin. La relación b.1 puede ser reescrita como:

$$q_r = h_r (T_1 - T_2) \text{ W/m}^2 \quad (\text{b.2})$$

en donde

$$h_r = e \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (\text{b.3})$$

b).- La transferencia de calor por radiación entre dos áreas A_1 y A_2 iguales, paralelas, espaciadas entre sí por una distancia pequeña,

$$q_r = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/e_1 + 1/e_2 - 1} \text{ W/m}^2 \quad (\text{b.4})$$

si se utiliza la ecuación b.2

$$hr = \frac{\sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad \text{W/m}^2 \text{ K} \quad (\text{b.5})$$

Para el caso en que T_2 sea la temperatura del cielo T_c , esta última puede ser determinada mediante:

$$T_c = T_a (0.55 + 0.061 P_a)^{0.25} \quad (\text{b.6})$$

en donde P_a [mmHg] es la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera, que puede ser evaluada mediante la ecuación b.13 que se detalla posteriormente; T_a [C] es la temperatura ambiente.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION

En las superficies expuestas al medio ambiente se da la transferencia de calor por convección forzada; esta transferencia de energía puede ser evaluada mediante

$$q_c = hc (T_1 - T_2) \quad \text{W/m}^2 \quad (\text{b.7})$$

en donde

$$hc = 5.7 + 3.8 V_a \quad \text{W/m}^2 \text{ K} \quad (\text{b.8})$$

aquí V_a [m/s] es la velocidad del viento.

En una cavidad rectangular en donde la superficie inferior es un líquido que puede evaporarse, además de estar a mayor temperatura que la superficie superior, el flujo de calor por convección natural es:

$$q_c = hc (T_1 - T_2)$$

en donde

$$hc = \frac{Nu \ k}{x} \quad (b.9)$$

Nu es el número de Nusselt, k [kJ/m K] es la conductividad térmica de la mezcla aire - vapor y x [m] es la separación entre las superficies. Para esta situación el número de Nusselt está dado por:

$$Nu = [0.069 - 0.020 (B/90)] [Gr \ Pr]^{1/3} [Pr]^{0.074} \quad (b.10)$$

Si el líquido se evapora, la transferencia de energía se da también a través de la transferencia de masa. De un balance de masa (ver anexo C), se obtiene la siguiente expresión para evaluar el flujo neto de energía debido a la evaporación-condensación:

$$q_w = \frac{hc \ C_l (P_s - P_a)}{1.6 \ C_{pa} \ P} \quad (b.11)$$

todas las variables se definen en el anexo C. La presión de vapor para aire saturado en la superficie del agua P_s , se determina mediante la siguiente expresión:

$$P_s = \exp (18.403 - 3855 / (T_s + 230)) \quad (b.12)$$

la temperatura en la superficie del agua T_s está en, grados Celsius, podemos suponerla igual a la temperatura ambiente T_a . P_s se obtiene en mmHg. Recordando que la

humedad relativa es la razón de la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera P_a , a la presión de vapor saturado a la temperatura ambiente $P_s(T_a) = P_s$, obtenemos que:

$$P_a = HR P_s = HR \exp [18.403 - 3885 / (T_a + 230)] \quad (b.13)$$

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

Si bien las pérdidas de calor por conducción en el sistema propuesto no son notables si está bien construido, conviene tener presente que para el caso de transferencia de calor unidimensional estas pueden ser determinadas mediante:

$$q_k = - dT/dx \quad (b.14)$$

Si la transferencia de calor se da a través de una placa compuesta de distintos materiales homogéneos

$$q_k = (T_1 - T_2) / R \quad (b.15)$$

en donde T_1 y T_2 son las temperaturas en las dos caras externas y R es la resistencia total a la conducción del calor, igual a la suma de los inversos de las distintas conductividades térmica k_i . O sea

$$R = x_1/k_1 + x_2/k_2 + x_3/k_3 \dots x_n/k_n \quad (b.16)$$

las x_i son los distintos espesores de los materiales que constituyen la placa compuesta.

Finalmente definiremos el coeficiente global de pérdidas térmicas, es igual a:

$$U = (1/hr + 1/hc + 1/hw + 1/hk.)^{-1} \quad (b.17)$$

ANEXO C

LA EVAPORACION DEL AGUA

Tanto en las tinas de incubación, como en el colector tipo estanque somero, existe una superficie libre de agua en contacto directo con el aire. Por tal razón, la transferencia de masa y, consecuentemente de energía, es un tema que debe interesarnos. A continuación deduciremos la expresión para estimar el flujo de energía que se da en la interfase aire-agua a consecuencia del flujo de masa generado por la evaporación y condensación del agua.

El balance de energía para el sistema en estado permanente será:

Flujo neto de energía = Ganancias por condensación - Pérdidas por evaporación

$$q = C_f (m_c - m_e) \quad \text{KW/m}^2 \quad (c.01)$$

en donde C_f [kJ/kg], es el calor latente de evaporación-condensación; m_i [kg/s m²], es el flujo de masa.

Este flujo de energía, también puede ser definido en función de un coeficiente convectivo de transferencia de calor h_c [W/m² K] y las temperaturas del agua T_w y ambiente T_a , o en base a las propiedades termodinámicas del aire. Usando estas ideas nuestro balance de energía

queda de la siguiente forma:

$$q = hc (T_w - T_a) = m_a * C_{pa} (T_w - T_a) \quad (c.02)$$

aquí m_a es la masa del aire seco y C_{pa} la capacidad calorífica del mismo. Suponiendo aire saturado en la interfase aire-agua, de la definición de humedad específica

$$w = \text{masa de vapor} / \text{masa de aire seco} = m_v / m_a \quad (c.03)$$

Recordando que la densidad es igual a $1/V_i$, siendo V_i un volumen parcial y considerando a la mezcla aire vapor como si fuera un gas ideal $V_i = R_i T / P_i$, de donde

$$w = V_a / V_w = R_a P_s / R_w P_a \quad (c.04)$$

Siendo P_a [mmHg], la presión parcial del aire seco; P_s [mmHg], la presión parcial del vapor de agua en la superficie libre. Si $R_i = R / M_i$, es la constante universal de los gases ideales dividida por el peso molecular de la especie i

$$w = M_w P_s / M_a P_a = 18.016 P_s / 28.97 P_a \quad (c.05)$$

si la presión total es $P = P_s + P_a$, entonces $P_a = P - P_s$. Igualando la ecuación c.03 con la c.05

$$m_w / m_a = P_s / 1.6 P_a \quad (c.06)$$

de donde

$$m_w = m_a P_s / 1.6 (P - P_s)$$

sustituyendo en la ecuación c.02, el agua evaporada será:

$$m_e = \frac{h_c}{1.6 C_{pa}} \frac{P_s}{P - P_s} \quad (c.07)$$

Análogamente, el agua condensada será:

$$m_c = \frac{h_c}{1.6 C_{pa}} \frac{P_a}{P - P_a} \quad (c.08)$$

Sustituyendo los valores de m_e y m_c en la ecuación c.01

$$q = \frac{h_c C_f}{1.6 C_{pa}} \left[\frac{P (P_s - P_a)}{(P - P_a) (P - P_s)} \right] \quad (c.09)$$

como P_a y P_s son realmente pequeñas respecto a P

$$(P - P_a) = (P - P_s) = P$$

$$q = \frac{h_c C_f}{1.6 C_{pa}} \left[\frac{P_s - P_a}{P} \right] \quad (c.10)$$

ANEXO D TABLAS ACUACULTURALES

TABLA I Especies que se cultivan en México
Su distribución de acuerdo a las características del Habitat. (5)

T°C	MIN-MAX	Habitat	Familia	Nombre Científico	Nombre Vulgar
6-18		Léctica (Corriente)	Salmonidae	1.- <i>Salmo gairdneri</i> (Var. Arcoiris) 2.- <i>Salvelinus fontinalis</i>	Trucha Arcoiris Trucha de Arroyo
12-20		Léctica (Estancada)	Cyprinidae	3.- <i>Cyprinus carpio communis</i> 4.- " " <i>especularis</i> 5.- <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> 6.- <i>Ctenopharingodon idellus</i> 7.- <i>Aristichthys nobilis</i>	Carpa Común o Escanuda " Espejo " Plateada " Herbívora " Cabezona
		Léctica		<i>Ctenopharingodon idellus</i>	" Herbívora
14-24		Léctica	Cyprinidae	3,4,5,6,7	Carpa Común, Cabezona " Espejo, Herbívora " Plateada
24-35			Cichlidae	8.- <i>Oreochromis aureus</i> 9.- " <i>niloticus</i> 10.- " <i>Mossambicus</i> 11.- <i>Tilapia melanopleura</i>	Tilapia o Mojarra " " " " " "
		Léctica	Ictaluridae	12.- <i>Ictalurus punctatus</i>	Bagre de Canal
			Cyprinidae	<i>Ctenopharingodon idellus</i>	Carpa Herbívora
20-34		Léctica	Cichlidae	8,9,10,11	Tilapia o Mojarra
			Cyprinidae	3,4,5,6,7	Carpa Herbívora, Plateada. Cabezona, Escanuda Espejo
		Léctica	Cyprinidae	<i>Ctenopharingodon idellus</i> <i>Carassius auratus</i>	Carpa Herbívora Carpa Dorada

Tabla II. Especies con Posibilidades de Cultivo en México
Su distribución de acuerdo a las características del Habitat. {5}

T°C	Habitat.	Familia	Nombre Científico	Nombre Vulgar
6-18	<u>Agua Fria</u> Léntica (Estancada)	Salmonidae	Salmo gairdneri (Var. Kamloops)	Trucha Kamloops
12-20	<u>Agua Templada</u> Léntica	Centrarchidae Atherinidae	Lepomis macrochirus Chirostoma ester- " grandocule " bartoni " patzcuaro	Mojarra Agallas Azules Pescado Blanco Charal " " Prieto " Pinto
	Lótica (Corriente)	Ictaluridae	Ictalurus ochoterinali " lacustris " mexicanus	Bagre " "
14-24	<u>Agua Semi-Calida</u> Léntica	Atherinidae	Chirostoma sphyraeana " chapalae " ocotlanae	Pescado Blanco Charal "
		Ictaluridae	Ictalurus dugesi " lacustris " ochoterinali	Bagre " "
	Lótica	Ictaluridae	" furcatus " balsanus	Bagre Azul " Rio Balsas
20-34	<u>Agua Calida</u> Lótica	Ictaluridae	Ictalurus balsanus " meridionalis	Bagre Rio Balsas " Mexicano

TABLA III

TEMPERATURAS LETALES ALTA Y BAJA, PARA VARIAS ESPECIES EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE ACLIMATACION

NOMBRE COMUN	ESPECIE	FAMILIA		Temperatura de la letalidad alta (A) y Baja (B) para la temperatura de aclimatación de °C					
				5	10	15	20	25	30
Trucha de Río	Salvelinus	Salmonidae	A	23.7	24.4	25.0	25.3	25.3	-
	Pontinalis		B	-	-	-	-	-	0.5
Carpa Esmeralda	Metropis	Cyprinidae	A	23.2	26.7	28.0	30.7	30.7	-
	atherinooides		B	-	-	1.6	5.2	8.0	-
Carpa Plateada	Notropis	Cyprinidae	A	26.7	28.6	30.3	-	31.0	31.0
	Cornutus		B	-	-	-	-	-	-
Carpa Vieja	Hyborhynchus	Cyprinidae	A	26.0	28.3	30.6	31.7	33.3	-
	Notatus		B	-	-	1.0	4.2	7.5	-
Carpa Dorada	Natcmigonus	Cyprinidae	A	29.3	30.5	31.8	33.2	34.7	-
	Crysoleucas		B	-	1.5	4.0	7.0	11.2	-
Bagre de Canal	Ictalurus	Ameiuridae	A	-	-	30.3	32.8	33.5	-
	Punctatus		B	-	-	0.0	2.5	6.0	-
Mojarra de	Lepomis	Centrarchidae	A	-	-	30.7	31.5	-	38.8 ?
	Macrochirus		B	-	-	2.5	5.0	7.5	11.1 ?
Carpa Pequeña	Rutilus		A	-	-	29.0	31.0	32.3	-
	Rutilus		B	22.1	22.9	24.0	-	-	-

Fuente: Wheaton, F.W. Acuicultura AGT Editor S. A. México, 1982. - No se encontró dato

T A B L A I V

Zonas Piscícolas de acuerdo a la fisiografía de México (1)

Z O N A	A.S.N.M.* [m]	Temperaturas Min[°C] Max[°C]	Especie Propicia
1.- Aguas Frías	2000	5 18-20	- Truchas
2.- Aguas templadas	2000-1500	10 25	- Pescado Blanco, Charal, Carpa Común, Lobina Negra etc.
3.- Aguas Semicálidas.	1500-1000	12 25-30	- Zona de Transición puede albergar las más variadas especies.
4.- Aguas Cálidas	800-100	20 arriba de 30	- Mojarras.

* Altura sobre el Nivel del Mar.

T A B L A V

Parámetros Físicos del Agua en el Cultivo de Bagre, Carpa y Tilapia. [1]

	Etapas del ciclo de Vida.					
	Desove	Incubación (Duración)	Fresa	Alevín	Juvenil	Reproductores.
<u>Bagre</u>						
(Ictalúridos)						
Temperaturas [°C]	26-30	21-29 (6-8 días)	24-29	24-29	24-29	20-29
Oxígeno disuelto [ppm]*	5	5	5	5	5	5
PH	7-8	7.5-8	7.5-8	7.5-8	7.5-8	7.5-8
Transparencia [cm]	45	-----	45	45	45	45
<u>Carpa</u>						
(Cípridos)						
Temperatura [°C]	22-23	22-24 (4-8 días)	22-24	22-24	22-24	22-24
Oxígeno Disuelto [ppm]	5-7	6-7	5-7	5-7	5-7	5-7
PH	7.5-8	7.5	7.5-8	7.5-8	7.5-8	7.5-8
<u>Tilapia</u>						
(Cíclidos)						
Temperatura	25.30	25	24-30	24-20	24-30	24-30
óptimo	29	(3-5 días)				
Oxígeno disuelto [ppm]	5	5	5	5	5	5
PH	7.4-8	7.4-8	7-8	7-8	7-8	7-8
Transparencia [cm]	45	45	45	45	45	45

* Partes por millón=mg/lt.

Tabla VI. Características que debe reunir el agua destinada a contener peces. [14]

Características químicas	Valores límites superiores para explotaciones
Acidez	pH 6-9
Alcalinidad	<20 ppm como CaCO ₃ ; muy bajo
Amoníaco	0.02 ppm
Cadmio	0,0004 ppm en aguas blandas
Cadmio	0,003 ppm en aguas duras
Cromo	0,03 ppm
	0,006 ppm en aguas blandas
Acido Sulfhídrico	0,002 ppm
Plomo	0,03 ppm
Mercurio	0,2 ppm
Nitrógeno	máx. 110% de la saturación
PCB	0,002 ppm
Ester-ftalato	0,3 ppb
Sustancia depositable	<80 ppm
Amoníaco	0,1 mg N/l (vestigios)
Hierro	0,1 mg/l (0,33;0,2)
Aluminio	5 mg/l
Cromo	0,001 mg/l 0,05
Manganeso	0,01 mg/l
Níquel	0,001 mg/l
Cobre	0,001 mg/l (-;0,03)
Zinc	0,005 mg/l (-;0,13) 2
Mercurio	0,0001 mg/l 0,004
Plomo	0,0001 mg/l (-;0,05) 0,04
Arsénico	0,001 mg/l (-;0,007) 0,04
Cloruros	100 mg/l (-;0,55)
Sulfuros	0,01 mg/l
Sulfatos	250 mg/l (25;36) 240
Nitratos	5 mg/l N(-;0,7)
Nitritos	0,01 mg N/l (0,02;vestigios)
Fosfatos	0,01 mg P/l (0,35;vestigios)
Carbonatos	250 mg/l (149;219)
Cianuros	0,001 mg/l 0,05
Cloro	0,01 mg/l
Acido carbónico	10 mg/l
Acido sulfhídrico	0,001 mg/l
Sustancias en suspensión	5 mg/l (28,4;+475)
Fenoles	0,01 mg/l
Detergentes	0,01 mg/l
Valor del pH	6,5-8,5 (7,8;7,6-8,4)

F''

ANEXO E PROGRAMA DE COMPUTO

Program SINCOL (input,output);

Const

Pi=3.1415926;
Alfa=1.2;
AlfaB=1.5;
Cp=4170;

Var

auxilio,caldera,dia,periodo,trabajando:integer;
area,b,beta,batahor,cosincidencia,cosincideta:real;
deltat,difuso,duradia,error,error1,f,g,gama:real;
GMb,GMg,Mt,Mc,Narba,Qt,qp,qg,qu,qpp,qr,Orag,qput:real;
r,Rb,radiacionsolar,t1,t2,Ta,Tc,Te,Tt,Tti:real;
Taalfa,Tcom,tote,ttara,Tiepo,Tinf,Tpc,Tsup,Ts,U:real;
agua:real;

Procedure Tempamb

(dia:integer;horasol:real;var tempa:real);
(Calcula la temperatura ambiente instantanea)

Var

Tmedia,Tmax,s,b1,b2,xt,deltat:real;

Begin

Tmax:=Tsup;
Tmedia:=(Tinf+Tmax)/2.0;
s:=(t1-horasol)/(t1-t2);
b1:=(24.0-t1+horasol)/(24.0-(t1-t2));
b2:=(horasol-t1)/(24.0-(t1-t2));
If (horasol>t2) and (horasol<=t1) then
xt:=(3.0/2.0)-s
Else
If (horasol>=-12) and (horasol<=t2) then
xt:=(3.0/2.0)-b1
Else
If (horasol>=t1) and (horasol<=12) then
xt:=(3.0/2.0)-b2;
deltat:=Tmax-Tmedia;
Tempa:=Tmedia + deltat*(sin(pi*xt));

End;

```

Function delta
  (dia:integer;pi:real):real;
  (Calcula la declinacion del Sol)
Begin
  Delta:=23.45 + sin(360.0*(294+dia)/365.0*(pi/180.0));
End;

```

```

Procedure incidencia
  (delta,fi,pi,beta,gama,r,horasol:real;var costeta:real);
  (Calcula coseno de teta, en donde teta es el angulo de
  incidencia de la radiacion solar sobre el colector)

```

```

Var
  w,j,k,l,m,n:real;
Begin
  w:=15*horasol;
  j:=sin(delta*r)*sin(fi*r)*cos(beta*r);
  k:=sin(delta*r)*cos(fi*r)*sin(beta*r)*cos(gama*r);
  l:=cos(delta*r)*cos(fi*r)*cos(beta*r)*cos(gama*r);
  m:=cos(delta*r)*sin(fi*r)*sin(beta*r)*cos(gama*r)*
    cos(w*r);
  n:=cos(delta*r)*sin(beta*r)*sin(gama*r)*sin(w*r);
  costeta:=j-k+l+m+n;
End;

```

```

Function radiacion
  (horasol,gmax,alfa,duradia,pi:real):real;
  (Calculo de la radiacion solar instantanea)
Var m,n:real;

```

```

Begin
  m:=ln(abs(cos(pi*horasol/duradia)));
  n:=exp(alfa*m);
  radiacion:=gmax*n;
End;

```

INICIO DE PROGRAMA PRINCIPAL

Begin

```
Write('Introduzca los siguientes datos');
Write('');
Write('Que dia del a/o es?.[1-355].....');
readln(dia);
Write('Cual es su duracion en horas?.....');
readln(duradia);
write('La temperatura minima esperada?.[C].....');
readln(Tinf);
write('A que hora?.[12,-12].....');
readln(t1);
write('La temperatura maxima esperada?..[C].....');
readln(Tsup);
Write('A que hora?.[12,-12].....');
readln(t2);
write('Cual es la inclinacion del colector?.[grad]');
readln(beta);
write('Cual es su acimut?.[grad].....');
readln(gama);
write('Cual es la latitud del lugar?.[grad].....');
readln(fi);
Write('El coeficiente global de perdidas del col. ');
readln(U);
Write('Su eficiencia optica?.....');
readln(taocalfa);
Write('Cual es la masa del termotanque?.[kg].....');
readln(Mt);
Write('El gasto masico en el colector?.[lt/m2 s]');
readln(Mc);
Write('Cuanta energia se extrae del termotanque?.[W]');
readln(qr);
Write('Cuanta energia se requiere al dia?.[J].....');
readln(Qreq);
Write('A que hora comienza la simulacion?.[hr].....');
readln(tcom);
Write('Cada cuanto tiempo evaluo al sistema?.[hr]');
readln(deltat);
Write('A que hora termino la evaluacion [12,-12]');
readln(tterm);
Write('Cuantos dias hago la simulacion?.[dias].....');
readln(periodo);
Write('Cual es el error permitido en resultados?');
readln(epsilon);
Write('Y en el area?.....');
readln(epsilon1);
Write('Cual es el area supuesta inicial?.[m2].....');
readln(Narea);
```

```

Write('Cual es la temperatura inicial del tanque? (C):');
readln(T1);
Write('Y su temperatura minima permitida? (C)...:');
readln(Tmin);
Write('La radiacion global maxima esperada es? (W/m2):');
readln(GMg);
Write('La radiacion directa maxima esperada? (W/m2).:');
readln(GMb);

r:=pi/180;

Auxilio:=0; Caldera:=1; Tiempo:=Tcom; Qt:=0;
Tt:=Tt; Tc:=Tt; Tc:=Tt;

  For
    (COMIENZO DE LA SIMULACION)

For trabajando:=1 to periodo do
Begin
  While (abs(Narea-area)>error1) do
  Begin
    Qt:=0;
Write(LST, ' HORA           TEMP. AMBIENTE      ENERGIA');
WriteLn(LST, ' UTIL      TEMP.TANQUE      AGUA CALTE');
    While (Tiempo>Tterm) do
    Begin

      (Calculo de la temperatura ambiente)
      Tempamb(dia, tiempo, Ta);

      (Calculo del factor geometrico)
      incidencia
      (delta(dia, pi), fi, pi, beta, gama, r,
      tiempo, cosincidencia);
      betahor:=0.0;
      incidencia(delta(dia, pi), fi, pi, betahor,
      gama, r, tiempo, cosincideta);
      Rht:=(cosincidencia/cosincideta);

```

```

(Calculo de la energia solar captada)
  If cosincidzeta<=0 then
    Begin
      (No hay Sol)
      g:=0;
      b:=0;
      difusa:=0;
      qg:=0;

    End
  Else
    Begin
      (Si hay Sol)
      g:=radiacion (tiempo,Ghg,alfag,
        duradia,pi);
      b:=radiacion (tiempo,GHb,alfab,
        duradia,pi);
      difusa:=g-b;
      radiacionsolar:=b+(b+difusa);
      qg:=radiacionsolar*taoalfa;

    End;

(Perdidas termicas en el colector)
  qp:=U*(Tc-Ta);

(Calculo de la energia util)
  qui:=qg-qp;

(Verificando el angulo de incidencia)
  If cosincidencia<=0 then
    Begin
      qg:=0;
      qp:=0;
      qui:=0;

    End;

(Correccion de temperatura colector supuesta)
  If qu<=0 then
    Begin
      qui:=0;
      Tt:=Tt+(-qr*deltat*(3600)/(M* Cp));
      If Tt<Tcpe Then
        Begin
          Write('El colector no satisface las condiciones ');
          WriteLn(' Introducir sistema auxiliar de calor');
          Tt:=Tt+caldera;
          Auxilio:=-Auxilio+1;

        End;
      Tc:=Tt;
      Tc:=Tt;
      Tiempo:=tiempo-deltat;

    End
  End

```

Else

Begin

qpp:=0;
While abs(qp-qpp)>error do

Begin

qp:=qpp;
Ts:=qu/(Mc*Cp)+Te;
Tpc:=(Ts+Te)/2;
qpp:=U*(Tpc-Ta);
qu:=qg-qpp;

If qu<0 then qu:=0;

End;

Qt:=Qt+qu*deltat#3600;

Tt:=Tt+(qu*Narea-qr)*deltat#3600
/(Mc*Cp);

Te:=Tt;

Tc:=Tpc;

Tiempo:=tiempo-deltat;

End;

agua:=qr/(Cp*Tt);

Writeln(LST, tiempo, Te, qu, Tt, agua);

End; (termino de un día de simulacion)

If Qt> 0 then

Begin

Area:=(Dr*qt+(Mt*Cp*auxilio))/Qt;

Narea:=(Narea+Area)/2;

end;

Writeln('EN PRIMERA APROXIMACION');

Writeln(LST, 'Día -Area sup. -E.Captada/m2 -Area calculada ');

Writeln(LST, trabajando, Narea, Qt, Area);

Writeln('');

Tiempo:=Tcom;

(Pueden no actualizarse estas temperaturas)

Tt:=Tti;

Te:=Ttl;

Tc:=Tts;

Auxilio:=0;

End;(Comprobacion de area)

```
WriteLn('DIA ENERGIA CAPTADA/m2 AREA REQUERIDA');
WriteLn('trabajando,Cl,area);
WriteLn('');
Narea:=Area;
Qarea:=Q;
Cl:=0;
(Pueden o no actualizando estas temperaturas)
Tt:=Tt1;
Tot:=Tt;
Tc:=Tt;
Qutil:=Q;
End; (For)

End. (Termina el programa)
```

ANEXO F MAPAS DE RADIACION SOLAR INSTANTANEA

MAKZO

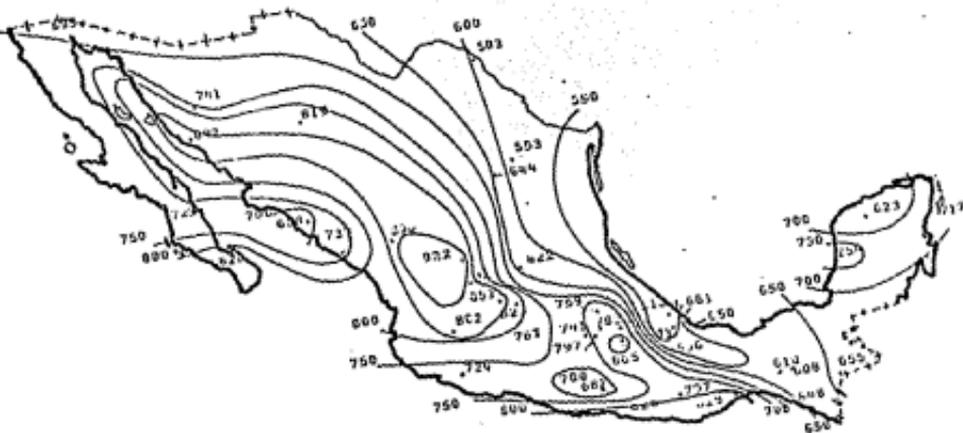


FIG.2.13

ABRIL

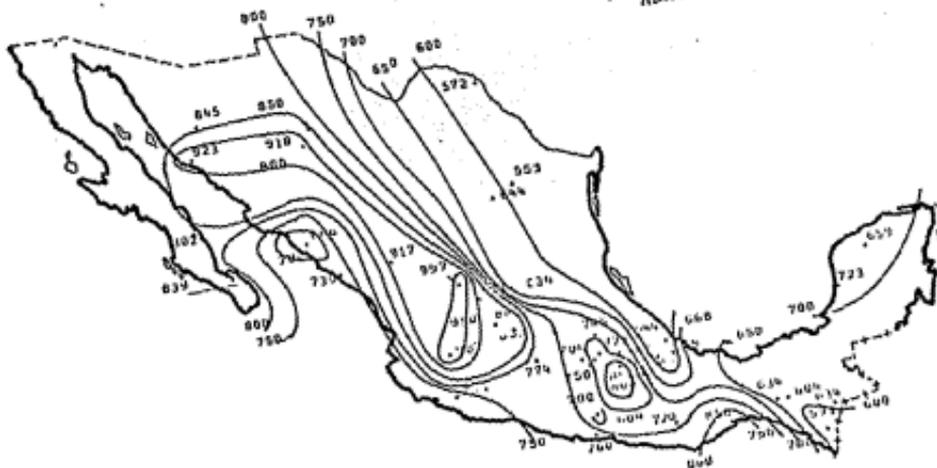
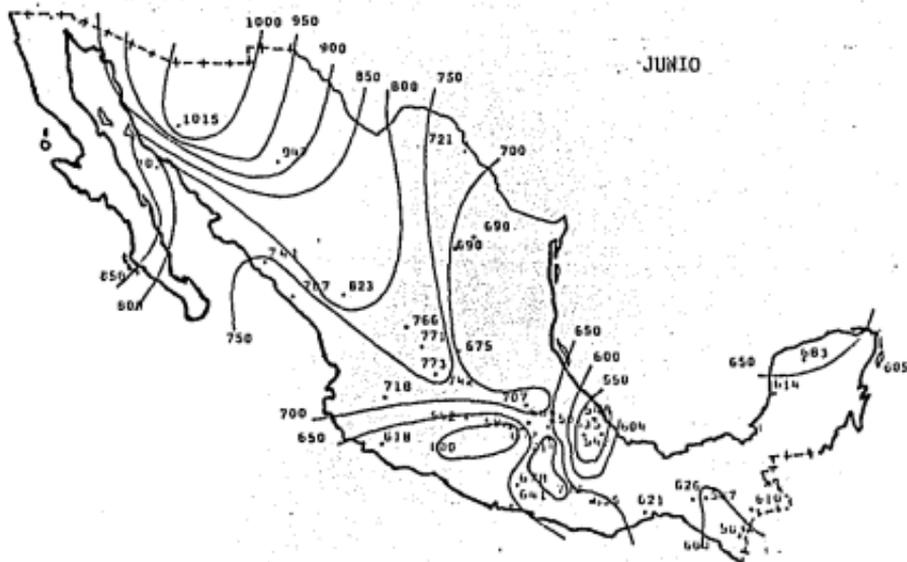
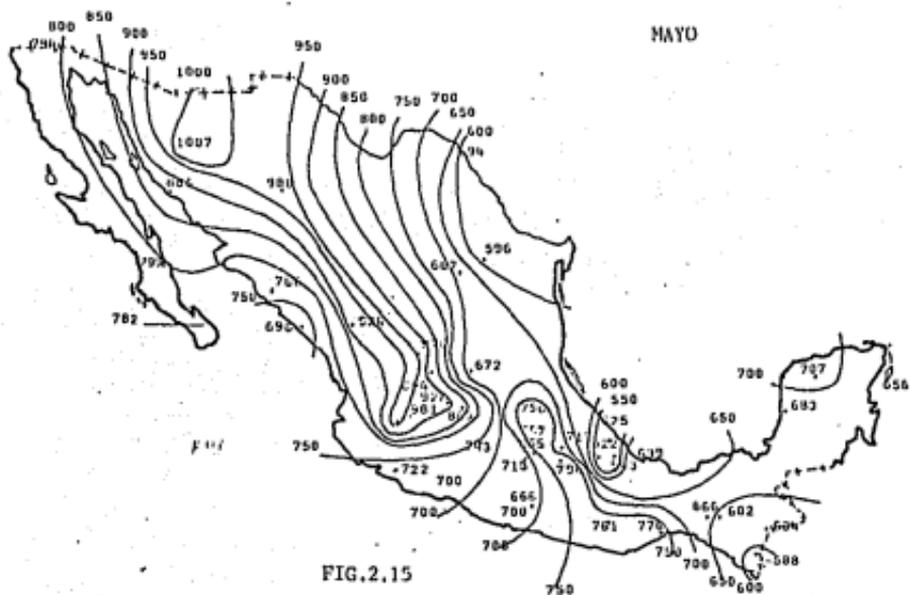


FIG.3.14



SEPTEMBRE

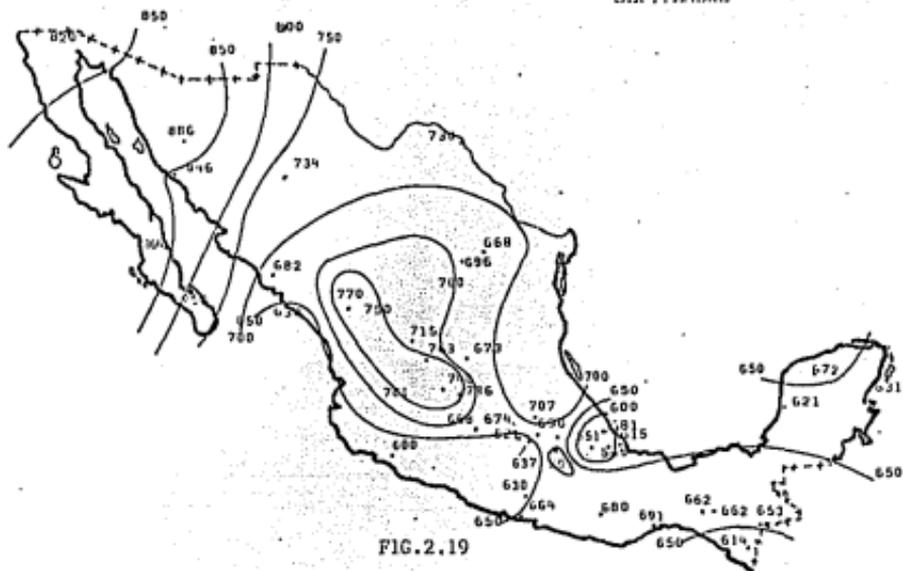


FIG. 2.19

OCTUBRE

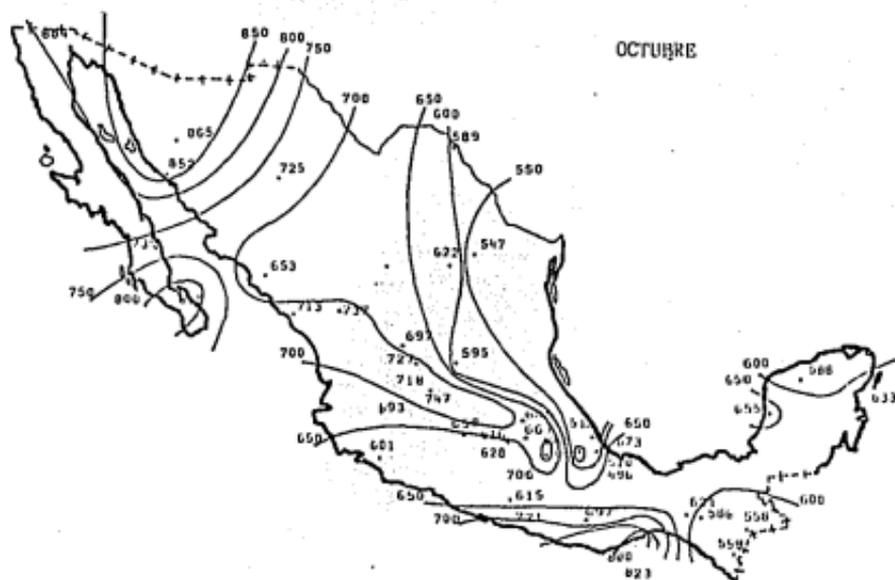
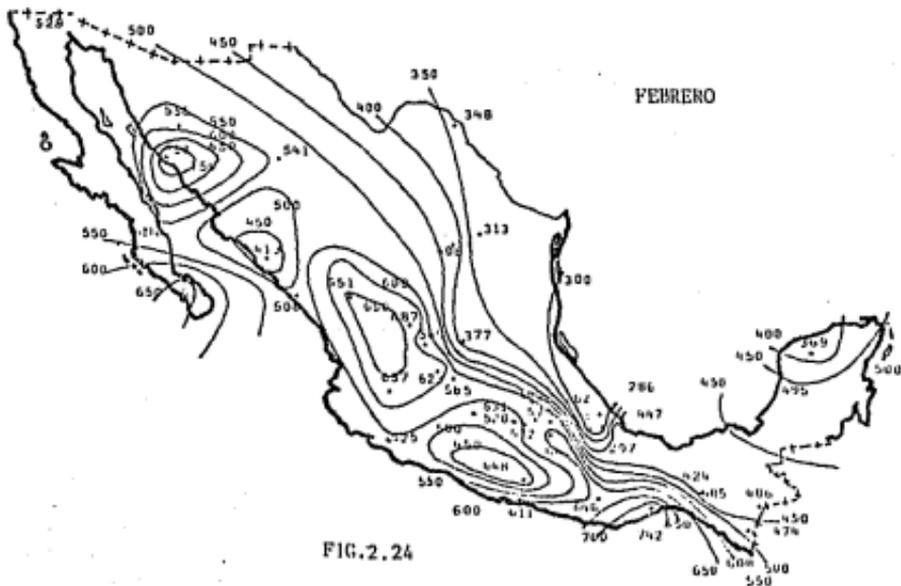
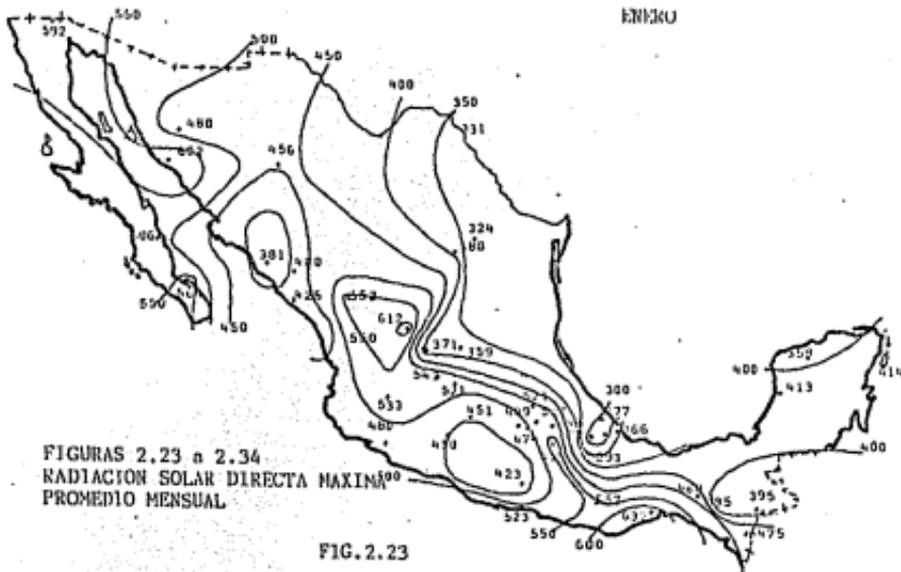


FIG. 2.20



HAIZU

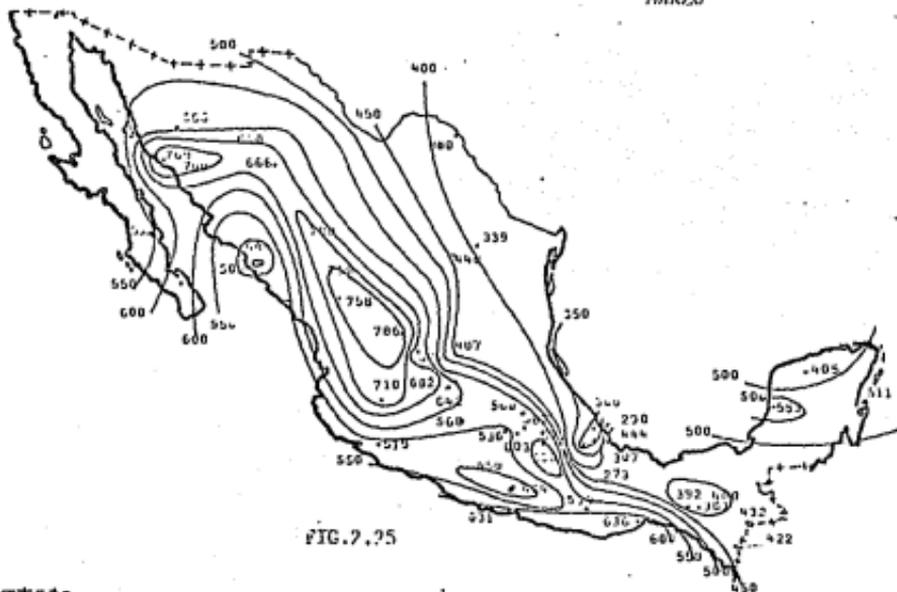


FIG.2.75

AGAIL

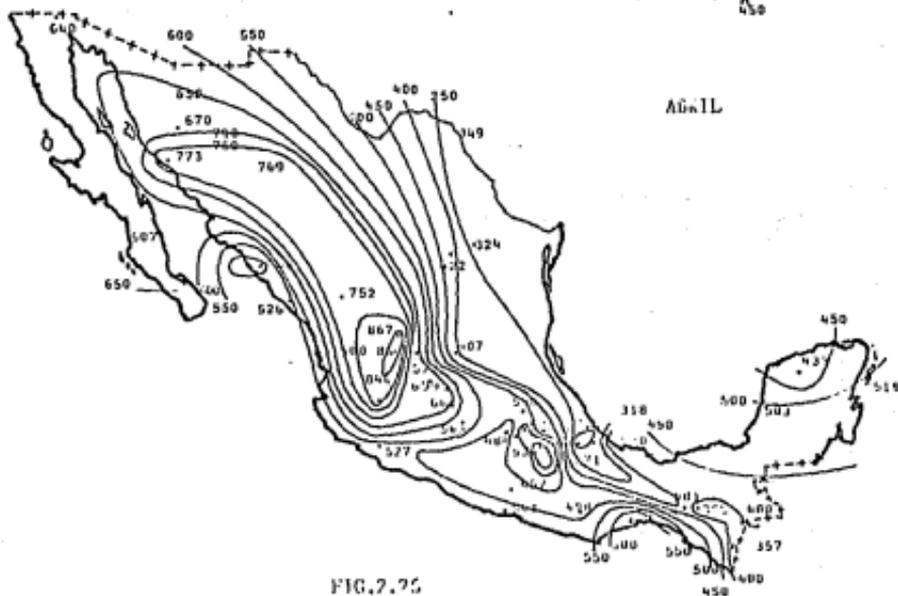


FIG.2.76

