

SECADO DE TABACO CON ENERGIA SOLAR

Luis Saravia, Aldo Fabris
Santiago Guerrero, Elvio Alanís
Universidad Nacional de Salta
Departamento de Ciencias Exactas
Buenos Aires 177
4400 - SALTA

RESUMEN

Se discuten las condiciones en que se realiza el secado de tabaco "Virgi-
nia" en las estufas de "curado en bulto".

Se calculan las distintas pérdidas de calor del sistema analizándose la u-
tilización de acumuladores regenerativos para recuperar el calor sensible/
del aire caliente y húmedo que sale de la estufa.

Se proponen dos métodos para la utilización de la energía solar en estos /
secadores. En el primero, el aire proveniente de un colector solar, calien-
ta un acumulador de piedras que se conecta con el sistema suministrando el
calor necesario.

En el segundo se usa un agente deshumidificador, regenerado con energía so-
lar, para secar el aire que recircula en la estufa.

Introducción

En las Provincias del Noroeste Argentino, el cultivo del tabaco es de
particular importancia para la economía de la región. La variedad más plan-
tada es el tabaco Virginia, siendo la cosecha en Salta de unos 20.000.000 /

Esta variedad requiere un proceso de secado muy cuidadoso, que se realiza/
en secaderos calentados artificialmente con diversos tipos de combustibles.
El secadero tradicional está formado por una pieza alta, generalmente de a-
cero, cruzada horizontalmente por cañas de las cuales cuelgan las hojas de
tabaco, a las que se somete a un calentamiento indirecto.

Las ventanillas permiten la regulación de la circulación de aire que a-
porta la humedad fuera del horno. Se estima que el número de secaderos /
de este tipo oscila en los 5.000.

Desde la última temporada se han comenzado a instalar en forma sistemá-
tica secaderos más modernos, del tipo de "curado en bulto". En ellos el ca-
lentamiento indirecto se realiza con gas-oil o gas, el aire se circula en /
forma forzada mediante ventiladores y las hojas se cuelgan de soportes es-

Investigador de la CNECH.

///..

//..

peciales que permiten un ahorro significativo en la mano de obra. El ahorro de combustible que se logra con las nuevas estufas es bastante grande.

El gasto de combustible en las estufas es importante, llegando en las modernas a un mínimo de 0,8 kg. de gas-oil por kilo de tabaco seco producido. La incidencia en los costos del tabaco es bastante variable, oscilando de acuerdo a la política nacional de precios de los combustibles. Normalmente incide en alrededor del 10%. Aunque el porcentaje no es muy alto, el monto, la evolución del mercado energético permite predecir que en un tiempo relativamente corto, del orden de los cinco años, ese porcentaje será bastante mayor. A los problemas de índole nacional debemos agregar el regional, debido a que la disponibilidad de leña en zonas cercanas a los cultivos está disminuyendo rápidamente.

Se ha planteado la utilización de fuentes alternativas de energía. El hecho de que la estufa trabaje durante el verano, cuando la irradiación solar hace pensar en la energía solar como un posible sustituto. Ya se ha estudiado y se está experimentando el uso de la energía solar en el secado industrial de diversos productos agrarios: madera, fruta, granos, etc. Incluso se están realizando trabajos sobre tabaco en otros países, habiéndose obtenido ahorros de combustible del orden del 30% en ensayos realizados (4). Debe destacarse que el uso de los secaderos modernos, favorece mucho la adaptación de sistemas solares a ellos.

En este trabajo se analizan las diversas posibilidades de adaptación de un sistema solar a las estufas de curado en bulto y se describen los sistemas experimentales en construcción con el fin de ensayar las diversas posibilidades.

En las secciones 2 y 3 se describe someramente el proceso de secado en bulto y se analiza técnicamente sus diversas etapas en relación con el secado en bulto. En las secciones 4, 5, y 6 se estudian las diversas posibilidades de adaptación de un sistema solar y las instalaciones experimentales que servirán para la realización de ensayos durante la próxima temporada de cosecha.

2.- El proceso de secado

La Fig. 1 muestra un esquema de una estufa típica de tabaco del tipo "curado en bulto", la que tiene 7 m de profundidad, por 5 de ancho y 2,7 de altura. Las hojas de tabaco se cargan en 146 soportes a razón de unos 300 a 50 kgs. de tabaco húmedo en cada uno, los que se colocan en tres niveles. Un ventilador, con un motor de 5 HP, toma el aire del plenum superior, lo hace circular por el calentador, el plenum inferior y lo impulsa a través del tabaco. El aire es renovado mediante un sistema de ventanillas. Dos de ellas, colocadas en la zona de menor presión, antes del ventilador, permiten la entrada de aire. El aire húmedo sale por el plenum superior a través de

ventanilla colocada en la parte delantera. El flujo de aire circulante es de $400 \text{ m}^3/\text{min}$, permitiendo obtener velocidades del orden de $14 \text{ m}/\text{min}$ sobre la hoja de tabaco. La cantidad de aire que se renueva depende de la etapa de secado.

El secado del tabaco Virginia debe pasar por varias etapas bien especificadas (3.4) que a grandes rasgos son:

1) Amarillamiento. Este es un proceso fisiológico en el que se producen transformaciones químicas dentro de la hoja, las que conducen a un cambio de color. Esta etapa se realiza a temperaturas bajas, del orden de los 35°C en una cámara muy húmeda sin extracción alguna de humedad.

2) Secado de la hoja. Terminado el amarillamiento se procede a extraer el agua de la hoja levantando su temperatura a unos 48°C y efectuando una renovación parcial del aire que circula para permitir la extracción de la humedad.

3) Secado de la nervadura. Este proceso es lento debido al grosor de la nervadura, razón por la cual se eleva la temperatura al máximo posible, unos 70°C .

Para cumplir con estas etapas se controla la temperatura y humedad del secado a través de la cantidad de combustible quemado y la abertura de las ventanillas. En la Fig. 2 se muestran curvas típicas de la variación de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire de la estufa a lo largo del proceso.

Estos datos fueron controlados por medidas directas realizadas sobre un secadero instalado en la cercanías de Salta.

Partiendo de estos datos primarios se puede realizar un balance térmico y de masa con el fin de calcular la cantidad de agua que se va extrayendo así como la cantidad de calor necesario para ello. Con el fin de simplificar los cálculos y apreciar debidamente las características térmicas de las tres etapas por las que pasa el secadero, las temperaturas se han idealizado según muestra la Fig. 3. En cada etapa principal: amarillamiento, secado de hoja y secado de nervadura se han adoptado temperaturas constantes, par bulbo seco y húmedo. El resultado del cálculo térmico se muestra en la Tabla I. Los resultados para la cantidad de calor necesaria se muestran en la Fig. 4 y 5 en forma de consumo horario o consumo acumulativo. Los rubros principales que aportan al consumo de calor son: pérdida térmica a través de la superficie de la estructura, calentamiento de la masa del horno y del tabaco, evaporación del agua y salida del aire caliente por las ventanillas. El primer rubro fué calculado para una estructura típica con construcción en ladrillo. El calentamiento de la masa se consideró en forma aproximada, distribuyendo el consumo total en forma uniforme sobre un porcentaje de tiempo de cada etapa. Para el rubro de evaporación y pérdida

//..

//..

de aire caliente se realizó un balance térmico teniendo en cuenta las propiedades del aire húmedo que entra y sale del secadero.

Los resultados parciales se muestran en la Fig. 6.

Estas cifras dan un consumo de combustible de unos 0,5 kg. por kilo de tabaco seco, por debajo del ya indicado como medido. Debe tenerse en cuenta que no se ha incorporado al cálculo las pérdidas en el intercambiador de calor ni las fugas de aire de la estufa. Puede estimarse que ellas producen un rendimiento del orden del 70%, elevando el consumo unos 0,7 kg. combustible por kg. tabaco, lo que nos muestra que el cálculo ha considerado los factores más importantes.

De estos resultados se pueden extraer algunas conclusiones básicas respecto a las posibilidades de utilización de la energía solar.

En primer lugar, cabe destacar que la mayor parte del consumo de calor es producido por el proceso de evaporación del agua del tabaco.

Esto plantea dos posibles métodos para la utilización de la energía solar.

El más convencional utilizaría colectores solares para calentar el aire que circula en el secadero y será estudiado en la sección 5. La alternativa consistiría en la utilización de un agente deshumidificador que extrae la humedad del aire del secador en recirculación, con lo cual no habría necesidad de arrojar aire caliente al exterior. La energía solar sería utilizada para regenerar el agente deshumidificador. Ella será estudiada en la sección 6.

En segundo lugar, es interesante hacer notar que al enviar aire caliente al exterior, se pierde en forma de calor sensible unas 960.000 Cal. durante el secado de la hoja, y 470.000 Cal. al secar la nervadura, o sea un total, el 27% del consumo total de la estufa. La pérdida puede ser evitada si se utiliza un intercambiador de calor en el que circulen las dos corrientes de aire. Los intercambiadores comunes son poco apropiados para estos fines debido a los bajos coeficientes de convección para el aire. Sin embargo, con motivo del desarrollo de equipos solares para acondicionar aire por métodos evaporativos, se han comenzado a utilizar intercambiadores regenerativos de costo accesible. Este esquema puede emplearse simultáneamente con la primera alternativa solar y será desarrollado en la sección 6.

En tercer lugar, la Fig. 4 nos muestra que las exigencias de calor de la estufa son muy disímiles a lo largo de su funcionamiento. Si ellas se satisficieran con energía solar, habría que instalar colectores y/o acumuladores para satisfacer las necesidades de pico, aumentando los costos iniciales. Dado que en la mayoría de los casos se instalan varias unidades, se resuelve este problema trabajando con ellas en forma coordinada, lo que ya se hace en forma natural debido a que se consigne un mejor aprovechamiento de la mano de obra si se cargan y descargan las estufas en forma desfasada. La Fig. 7 muestra el consumo total, que así resulta casi constante.

2.- Recuperación de calor

De acuerdo a lo explicado en la sección anterior, alrededor de 1/4 del calor consumido en una estufa puede ser ahorrado recuperando el calor sensible que se pierde en el aire húmedo que sale de la estufa. Por ej., durante la segunda etapa de secado, la estufa elimina aire caliente a 46°C. a un caudal de 3.400 Kg/hora, el que puede usarse para calentar el aire de entrada que llega con igual flujo y una temperatura de 25°C. El intercambio de calor debe producirse sin intercambio de humedad para hacer posible el proceso de secado. El aire saldría del horno con una humedad superior a 60%, mientras que entraría con 15%.

El más sencillo de los intercambiadores utilizados en equipos solares de acondicionamiento ambiental por evaporación (7) es el equipo regenerativo con lecho de piedras. Su esquema, aplicado a un secadero de tabaco, se muestra en la Fig. 8. Está formado por dos lechos de piedra que trabajan alternativamente. En una primera etapa, el lecho A) es calentado por el aire cálido que el ventilador extrae del plenum superior de la estufa. Por el lecho B), ya calentado en una etapa anterior, pasa el aire frío que se toma del exterior, elevando su temperatura. Al cabo de un cierto tiempo comienza la segunda etapa, en la que el papel de ambos lechos se invierte.

Si extraeremos aquí en el diseño detallado de los lechos de piedra, es decir determinación de longitud, área, diámetro de piedras y caída de presión, lo cual puede realizarse utilizando los criterios expuestos en un trabajo anterior (8).

Para tener una idea de la magnitud del sistema basta estimar su volumen. Si $T_{g,c}$ es la temperatura del aire frío y $T_{g,c}$ la del caliente, el calor máximo acumulable está dado por

$$Q_M = c_p \cdot (1-f) \cdot V \cdot (T_{g,c} - T_{g,f})$$

donde c_p es el calor específico de la piedra, ρ su densidad, f el porcentaje de huecos y V el volumen del acumulador.

Si Q_1 es el calor sensible a extraer del gas, y por tanto acumulable en el lecho, la relación Q_1/Q_M tiene en los diseños habituales un valor del orden de 0.9. Dado que Q_1 se conoce, se determina V . Para un ciclo completo del sistema de una hora, el valor de V es de 1,5 m³ para cada lecho, muy pequeño en relación al volumen de todo el secadero.

En lo que se refiere a la potencia consumida en el ventilador, el gasto que circula es del orden del 10% del de recirculación de todo el secadero, mientras que la caída de presión es del mismo orden de valores. Por tanto, la potencia consumida es del orden de 1/2 HP.

//..

//..

4.- Calentamiento de la estufa con energía solar.

Existe bastante experiencia en el uso de aire calentado por vía solar en procesos de secado de productos agrícolas a escala reducida (2).

Experiencias a escala mayor en granos, frutas, pasto, etc. es reciente y bastante más reducida (1,4,etc.)

El proceso de secado de tabaco es de los más delicados entre los utilizados con diversos productos agrícolas debido a las exigencias estrictas de temperatura y humedad a lo largo de todo el proceso, así como la necesidad de realizar el trabajo en forma continua. De ahí que el diseño de un sistema solar sea más complicado que en otros casos.

En una primera etapa de diseño se puede procurar una sustitución directa de los métodos convencionales de calentamiento por el solar. A estos efectos debe utilizarse un colector solar calentador de aire con el que se pueda obtener temperaturas del orden de 65°C. Dado que las superficies necesarias son de entidad y se instalarán en zonas rurales, deberá tener un diseño sencillo y de costo reducido. Este problema, que es común a todos los procesos de secado, se ha estudiado por separado (9), por lo que no se tratará en detalles aquí. En términos generales, la Fig. 9 ilustra el colector a ser utilizado en las pruebas iniciales. Su forma es circular, el aire entra por la periferia, atraviesa una matriz porosa negra calentada por la radiación solar y sale por el centro.

Una unidad tendrá una superficie del orden de los 40 m² conectándose entre sí el número necesario para el funcionamiento de la estufa.

El segundo aspecto a tener en cuenta es el carácter no continuo de la radiación solar, la que está disponible durante unas 8 horas de las 24 diurnas. El acumulador más sencillo capaz de trabajar con un ciclo de almacenamiento y extracción es el acumulador de piedra, del cual se ha estudiado con detalle los aspectos de diseño y construcción (8,10).

Basicamente consta de un lecho de cantos rodados entre cuyos huecos circula el aire caliente, o frío, que entrega o extrae, el calor de los cantos.

El sistema es de construcción sencilla y funcionamiento efectivo. En este caso se deberá prestar atención al problema de retención de humedad en la superficie de la piedra, que puede llegar en circunstancias especiales a 3% del peso (11).

Esto no sería importante en el caso del acumulador principal ya que se desea retirar humedad de la estufa, pero debe tenerse en cuenta en los regeneradores, ya que ahí se introduce aire seco a la estufa.

Estos acumuladores pueden llegar a ser voluminosos, pero en el caso de aplicaciones agrícolas este factor no es de los más importantes.

La utilización de otro tipo de acumuladores, de cambio de fase, está siendo

se considerada. (12).

El conjunto colector-ventilador-acumulador-estufa debe estar interconectado con el fin de que el calor sea transferido del colector al acumulador y estufa durante el día, y del acumulador a la estufa durante la noche.

El principal problema de esta conexión proviene de las condiciones controladas del aire de la estufa, las que en general son de una humedad muy alta para ser pasado por los colectores. Dentro de las condiciones tradicionales de secado, se hará necesario separar los circuitos de aire del colector de los de la estufa, existen varias posibilidades, que satisfacen un distinto grado de plenitud las necesidades planteadas.

La más sencilla se esquematiza en la Fig. 10. Durante el día el ventilador circula el aire por el colector calentando el acumulador. Durante la noche, el ventilador circula el aire entre el acumulador y la estufa.

De esta disposición, se proporciona calor durante el 75% del tiempo total de funcionamiento.

Si con este esquema se justificase económicamente cubrir todo el período de tiempo, el acumulador se puede dividir en dos partes, cada una de las cuales trabajará 4 horas con el colector y el resto del tiempo con la estufa. Desfasando en el tiempo la conexión, se tendrá calor disponible todo el tiempo, según ilustra la Fig. 11.

Es posible encarar un análisis computacional del sistema para evaluar las posibilidades. Este trabajo se encuentra en ejecución (10), pero se necesita completar el modelo con una determinación experimental de los parámetros que gobiernan su comportamiento. Por tal razón se ha encarado la construcción de un prototipo de secadero a escala reducida. El prototipo también servirá al ensayo de otros aspectos de importancia tales como: cambios en las condiciones de temperatura y humedad con que funciona el secadero con el fin de mejorar la adaptación a la producción de energía solar, comportamiento del regenerador y acumulador con respecto al aire húmedo, eficiencia global de los distintos ciclos de operación, controles de temperatura y humedad, materiales constitutivos del sistema.

El prototipo de secadero en construcción tiene una capacidad de 200kg. de material húmedo. Con el fin de lograr máxima flexibilidad en la interconexión de los elementos y en los ciclos de operación, las unidades básicas se construyen sin integrarse físicamente. El secadero puede admitir hasta 4 unidades de tamaño normal, montados en dos niveles. Una cámara superior y una inferior uniformizan la distribución de aire y permiten la conexión a otras unidades. El colector tiene 25 m² de superficie y su diseño se detalla en otro trabajo (9). La superficie es mayor que la necesaria para el secadero al cual se conectará. Este tamaño fue elegido con el fin de estudiar a escala real la distribución de aire en el colector. El acumulador, en pie, fue diseñado para la capacidad del colector, con un volumen de 6 m³.

//..

//..

La distribución de los elementos, correspondientes a la distribución sencilla fué descrita, se muestra en la figura 12 y 13. A este sistema se le agregará un regenerador según se describió en la sección 4.

El colector y secadero han sido construidos, estándose en vías de un acumulador. La temporada de recolección de tabaco comienza en noviembre. Los ensayos se realizarán en colaboración con especialistas del INTA, Corrientes, Salta.

Los elementos descriptos son comunes a diversos tipos de secado agrícola por lo que además del tabaco se realizarán ensayos sobre otros productos agrícolas de interés para la nación.

5.- Secado con deshumidificadores.

El uso de agentes deshumidificadores para secar aire con fines de acondicionamiento ambiental ha sido estudiado en diversas oportunidades. Recientemente (11) se ha propuesto la utilización de lechos de sílice que trabajarían en forma similar a un acumulador de piedras en un circuito de aire caliente, produciendo el secado del aire en vez de calentarlo exclusivamente. Una vez seco, el lecho se utilizaría en combinación con un secadero.

Uno de los deshumidificadores disponibles en la Argentina a precios razonables son las soluciones de Cl_2Ca .

Se han propuesto dos tipos de sistemas basados en deshumidificadores. Los dos, para acondicionamiento ambiental, los que podrían adaptarse en un sistema de secado.

El primer tipo (14) se esquematiza en la Fig. 14. Un tanque de solución de Cl_2Ca hace las veces de acumulador. La solución es bombeada desde allí bañando el aire del secadero y extrayendo su humedad. La solución se regenera, por lo que es regenerada en otra columna mediante aire caliente en un colector convencional. Dado que es conveniente que el regenerador baje a la mayor temperatura posible con el fin de aumentar la presión parcial del vapor de agua en la solución, se calienta la solución durante su llegada a éste. Por el contrario, conviene que la temperatura de la solución en la extracción sea lo menor posible, por lo que puede ser conveniente enfriar la solución hasta la temperatura ambiente en alguna etapa intermedia. La regeneración con aire caliente tiene el inconveniente de que las pérdidas de calor sensible en el aire que deja el regenerador son importantes. Se ha propuesto (15) realizar directamente la regeneración en el colector solar según el esquema de la Fig. 15. La solución a regenerar corre sobre una chapa negra que se calienta con radiación solar. El aire que se calienta

La humedad se mueve por circulación natural.

En esta forma la radiación solar calienta directamente a la solución y no al aire.

Aunque el secado por deshumidificación no ha sido casi ensayado, presenta algunas ventajas potenciales que lo convierten en prometedor. El movimiento de solución, en vez de aire, presenta menos problemas y se realiza con poca potencia mecánica, especialmente si se pretende adoptar el secado a un conjunto simultáneo de varias estufas. La colocación del deshumidificador dentro de las estufas es muy sencilla, el acumulador es muy simple y de tamaño menor que el equivalente en piedras. La eficiencia de colección es razonable, y si se usa el colector descrito en segundo término, es de construcción muy simple. En lo que se refiere a posibles problemas, debe estudiarse en detalle la contaminación con sal de los productos a secar. La corrosión por la sal es un problema bastante estudiado en relación con las salmueras utilizadas en refrigeración.

6.- Agradecimientos.

Se agradece al Ing. Arias, del INTA, Cerrillos, por la información brindada, así como la ayuda brindada en distintas fases de este trabajo. Este trabajo ha sido financiado en parte por la SECYT, así como la Universidad Nacional de Salta.

7.- Referencias

- 1) Phase II Experiment Integration for Drying Applications, Solar energy Report R&D, March 10-1977- ERDA.
- 2) A Survey of Solar Agricultural Dryers. Technical report T-99 Brace Research Institute, Mc Gill University, Dec - 1975.
- 3) Read, W.R. y Czech, J. " Operating experience with a Solar Timber Kiln" Vol. 1. Int. Solar Energy Congress, July - 1975, Los Angeles.
- 4) Humphreys, B. " Solar heat cuts curing cost", Research and Farming, Vol. 33, N° 1 y 2, 1974, North Carolina Experimental Station.
- 5) Rojo, N. " Curación del Tabaco Virginia", Publicación Técnica N° 1, Estación Experimental Cerrillos, INTA.
- 6) Akehurst, B.C., " El Tabaco", Ed. Labor, 1975.
- 7) Read et al., " Use of RER systems in South Australia, Aus. Cond .and Heating, 1972, pp.20-27.
- 8) Saravia, L. and Alanis, E., " El diseño de acumuladores de piedras", Actas 2da, Reunión de Trabajo de ASADES, Salta Julio - 1976.
- 9) Saravia, L. Fabris, A., " Ensayo de un calentador de aire con matriz po

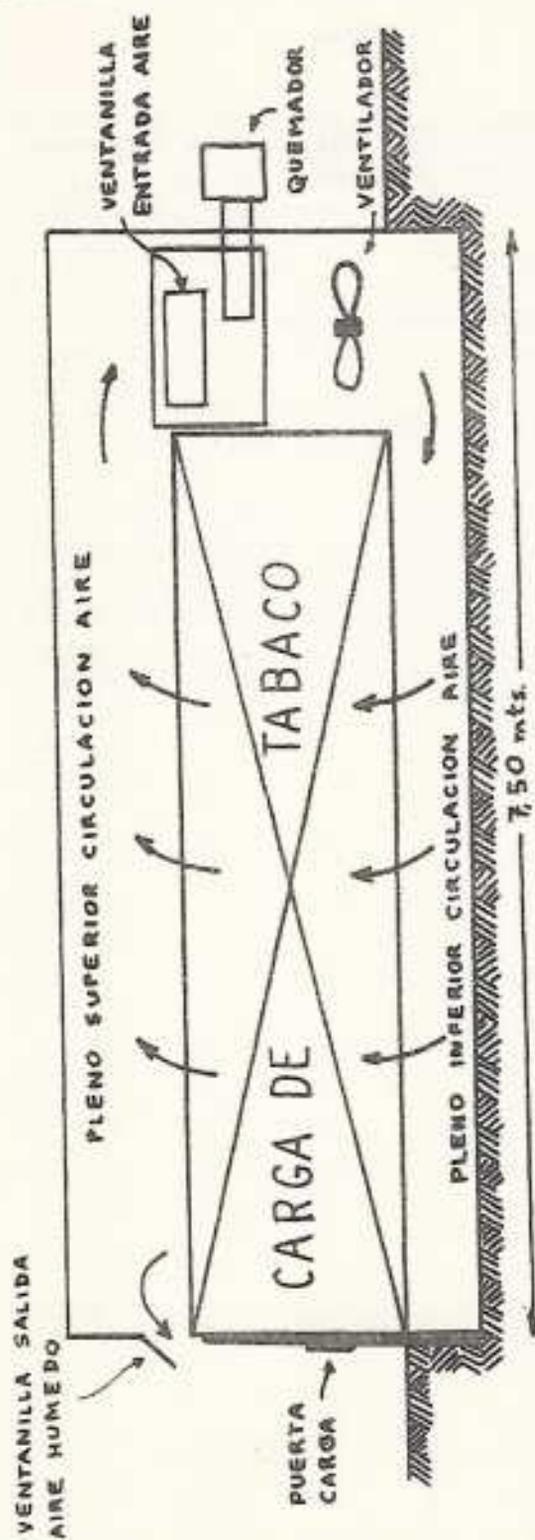
- rosa", 3ra. Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza, Agosto 1977.
- 10) Saravia, L. et al. " Simulación de Sistemas que Incluyen Acumuladores de Piedras" A presentar en la III Reunión de Trabajo de Energía Solar - ASADES - Mzo-oct /77.
 - 11) Close, D.J. and Pryor, T.L. " The Behavior of Adsorbent Energy Storage Beds " Solar Energy - Vol 18, pp.287,192 - 1976
 - 12) Saravia, L. et al " Diseños de Acumuladores Térmicos por Cambio de Fase" a presentar en III Reunión de Trabajo de Energía Solar - ASADES - Mza.,Oct/77.
 - 13) F. de Winter ed - Proc. of the 2nd. Workshop on the Use of Solar Energy For the Cooling of Building - Aug. 1975, ERDA Div. of Solar Energy'.
 - 14) Lof, G.O.G. " Horse Heating and Cooling With Solar Energy" Solar Energy Research - Madison, Univ. of Wisconsin Press 33-1955.
 - 15) Mullick, S.C. and Gupta, M.C. " A Simple Method for Description of Water by Solar Heating of the Absorbent Solutions Used for Desiccation of Room Air" - Paper EH100, UNESCO Symposium ; The Sun in the Service of Mankind - Paris Jul. 73.-

Tabla I

Peso del tabaco a lo largo del proceso de secado en por ciento del peso inicial.

Horas de secado	Peso
0	100
24	95
48	85
72	55
96	30
120	20
144	15

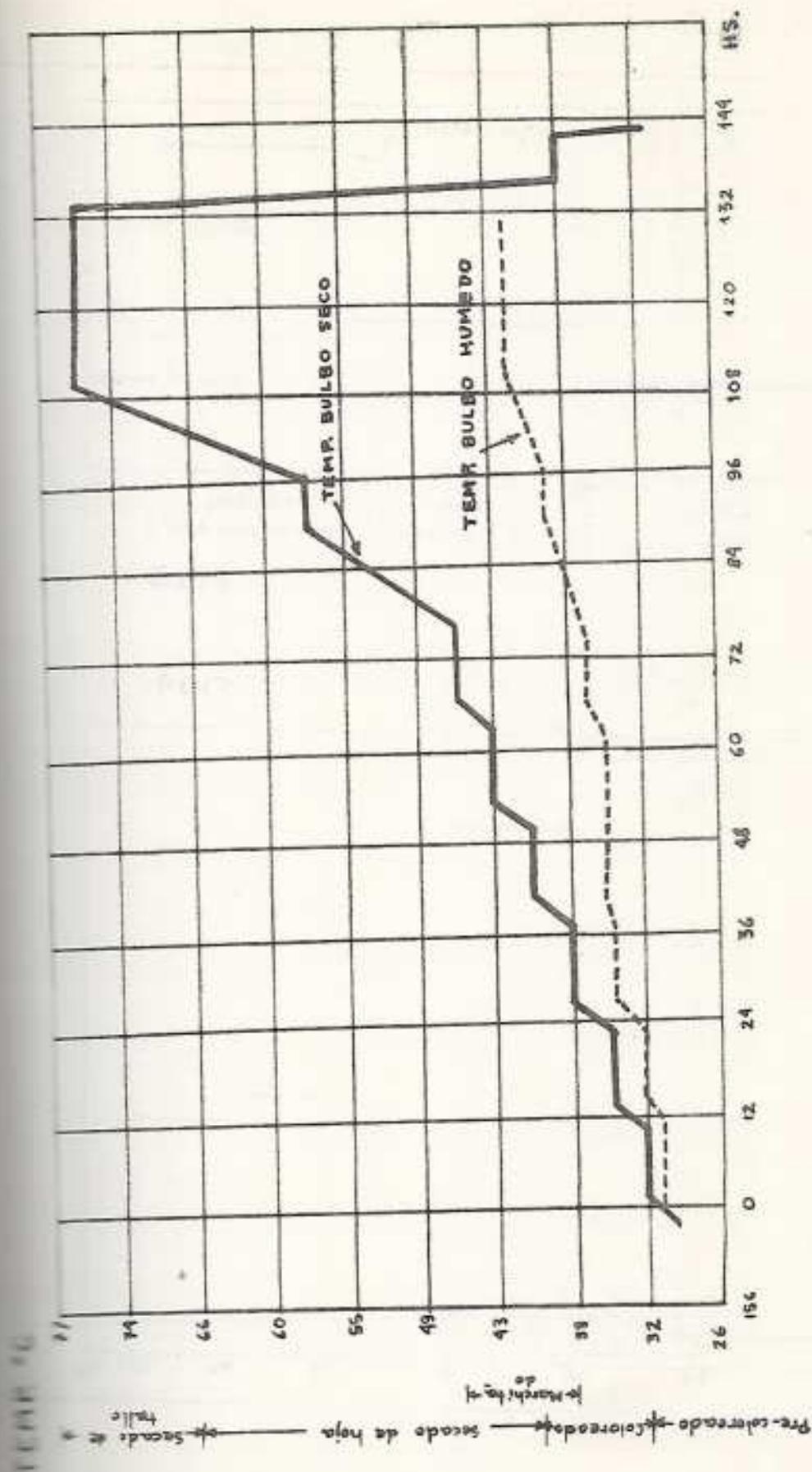
CORTE



ESTUFA DE TABACO PARA CURADO EN BULTO

FIG.1

FIG. 2



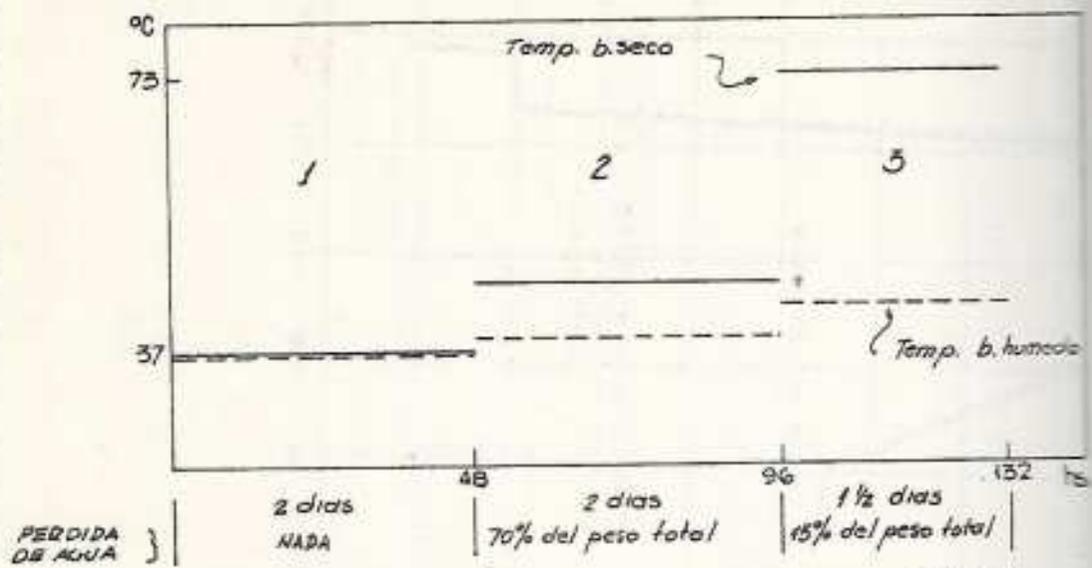


FIG 3.

FIG 4.

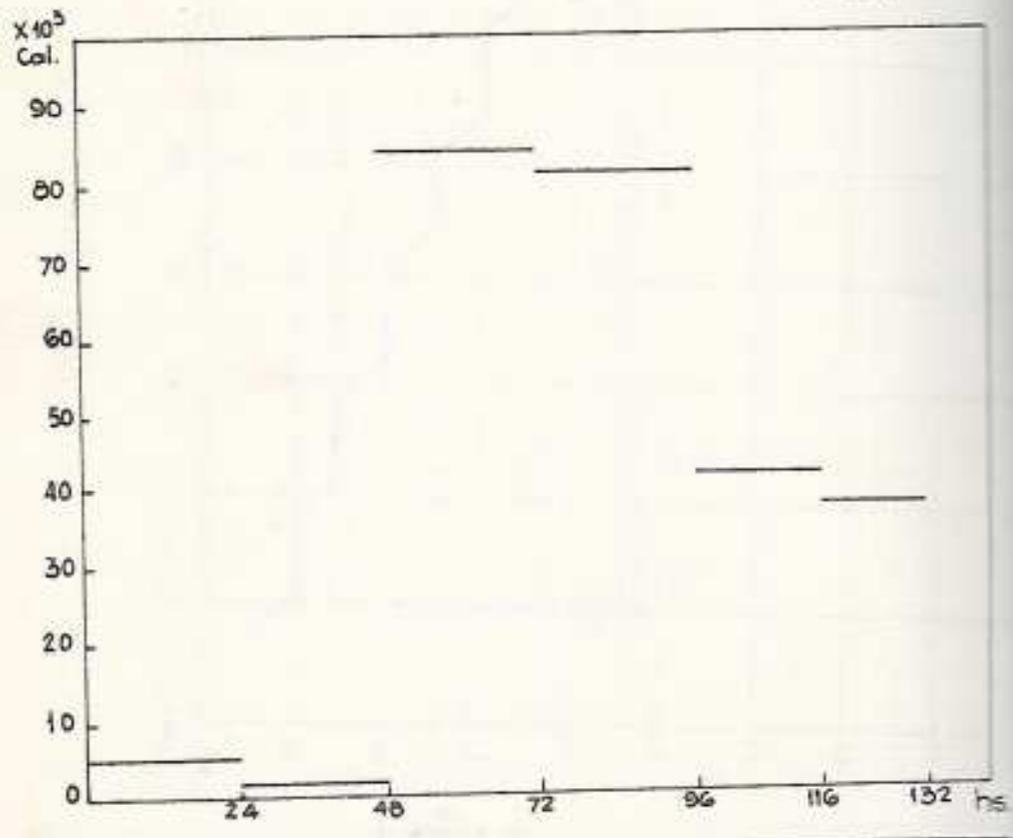


FIG. 5

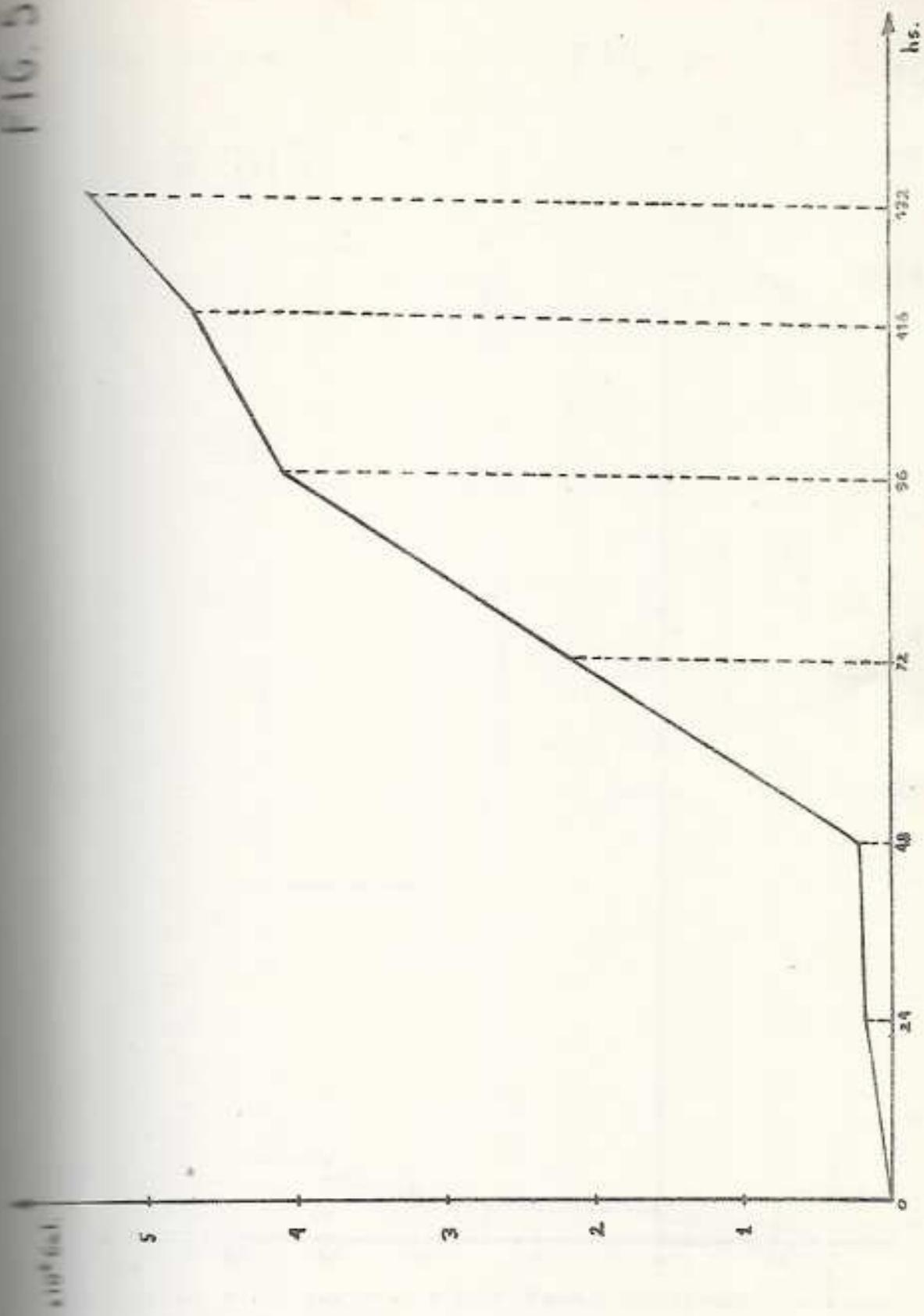
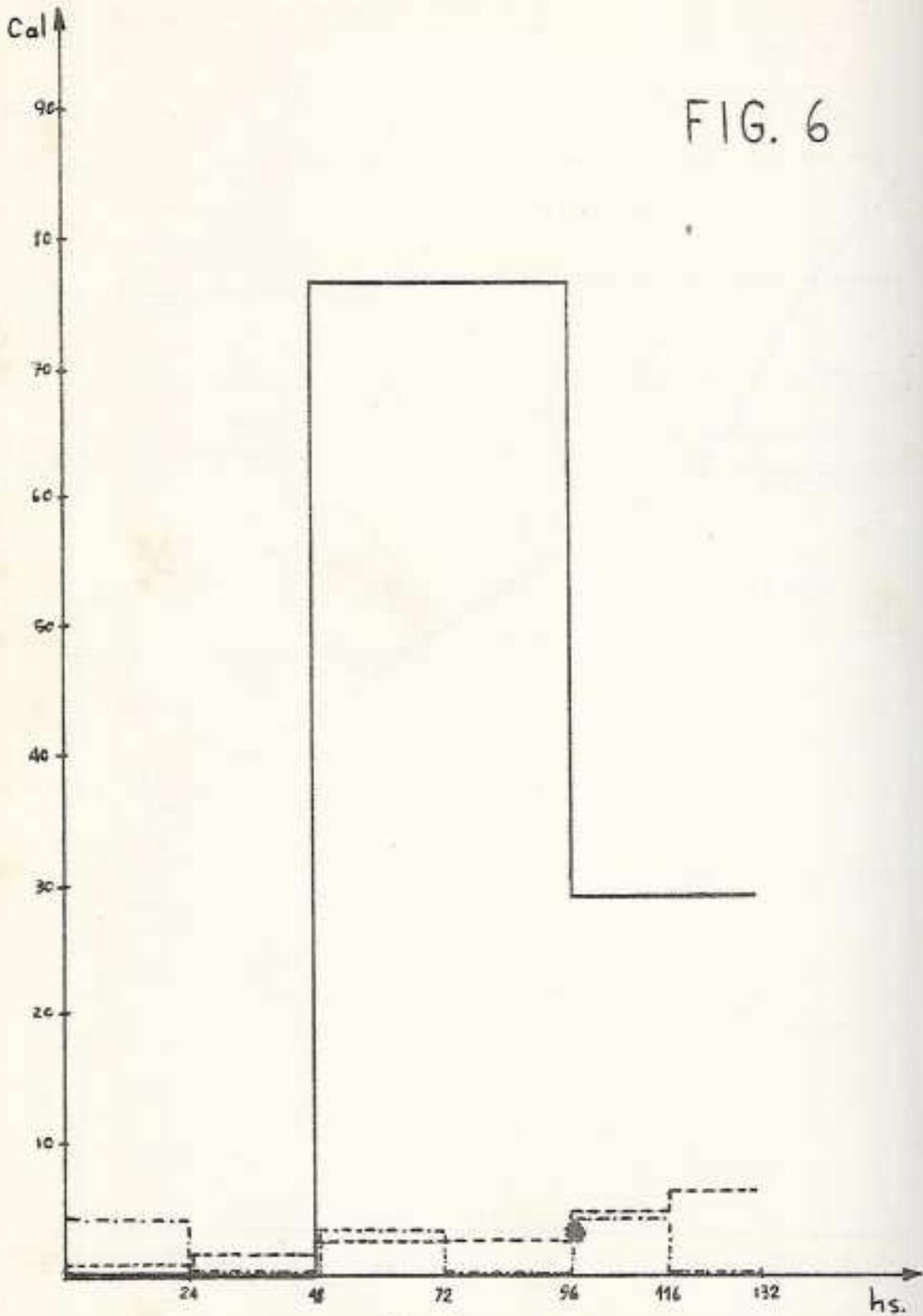
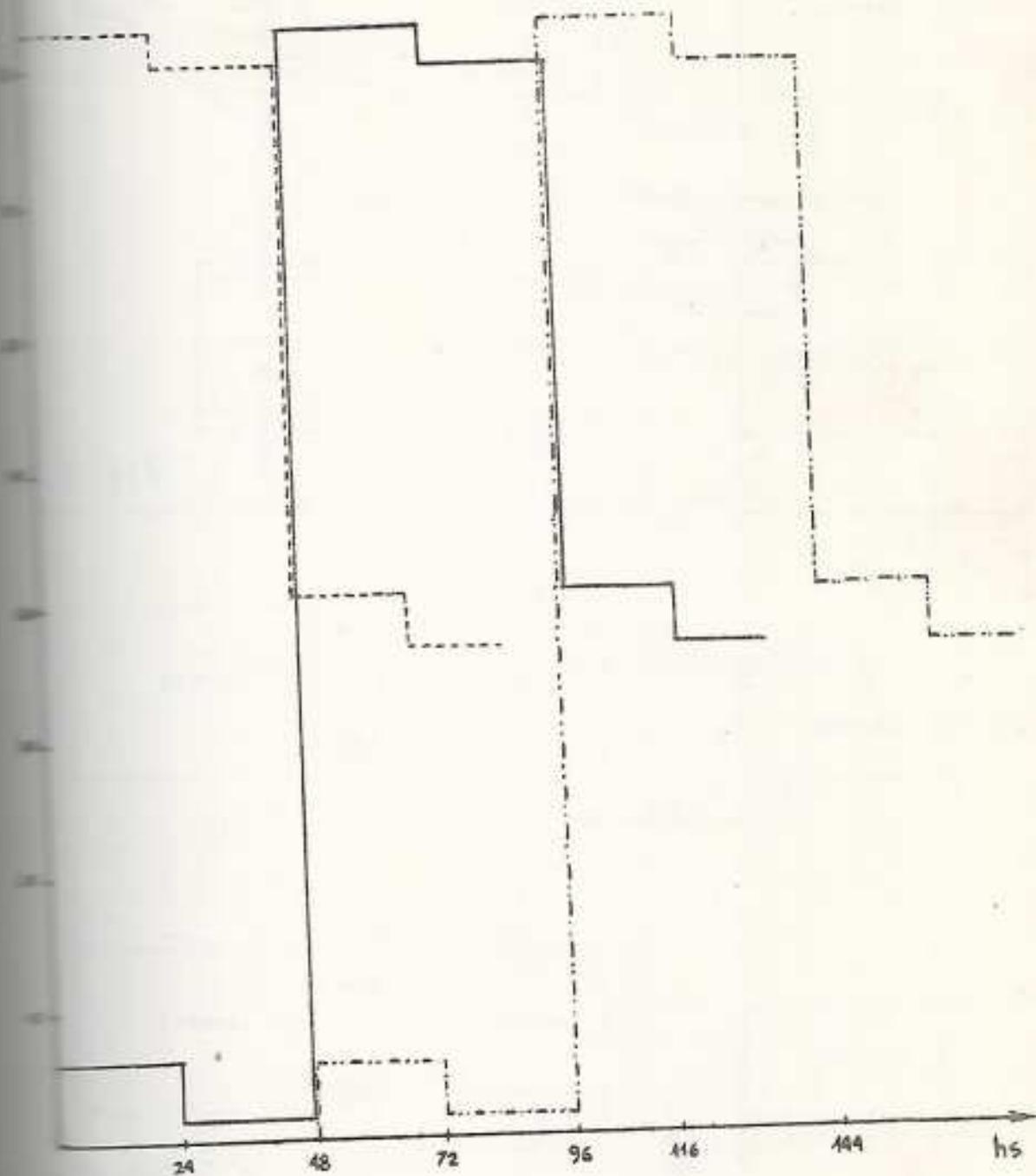


FIG. 6



— CONSUMO CALOR POR EVAPORACION Y CALOR SENSIBLE
- - - CONSUMO CALOR POR PERDIDAS DE PARED.
- · - · - CONSUMO CALOR POR CALENTAMIENTO DE LA MASA



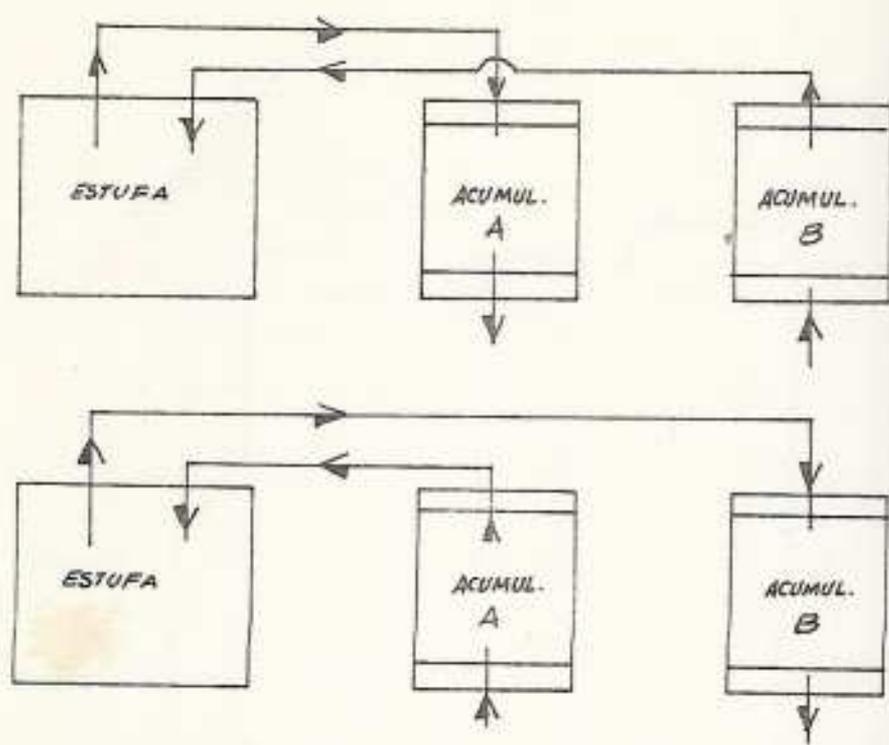


FIG 8

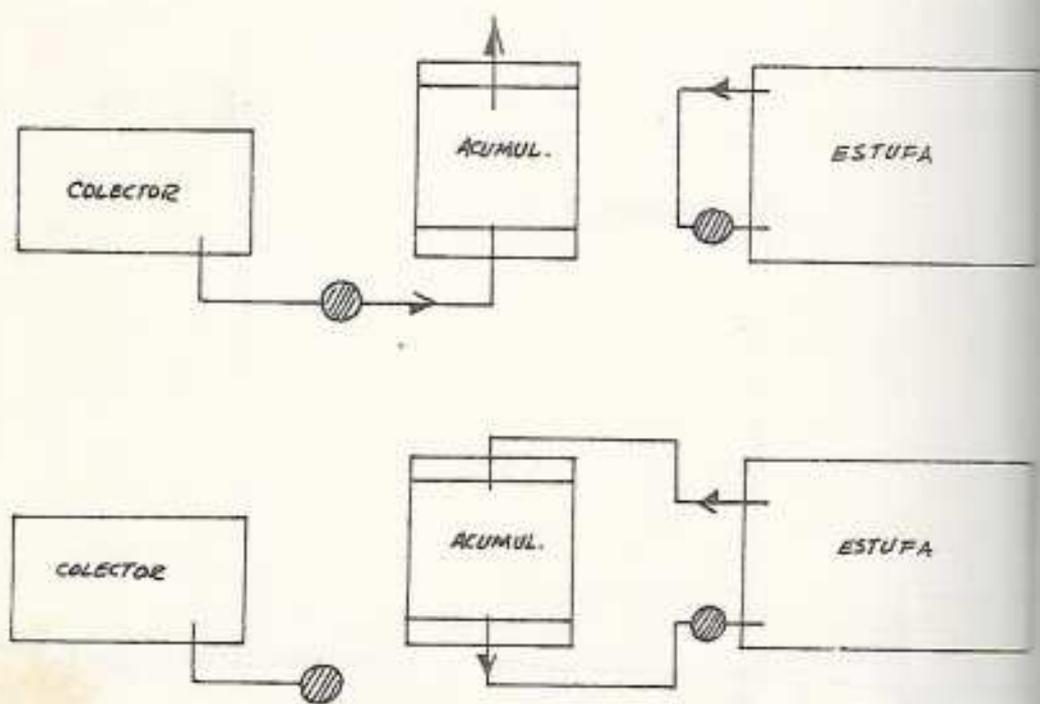


FIG 10

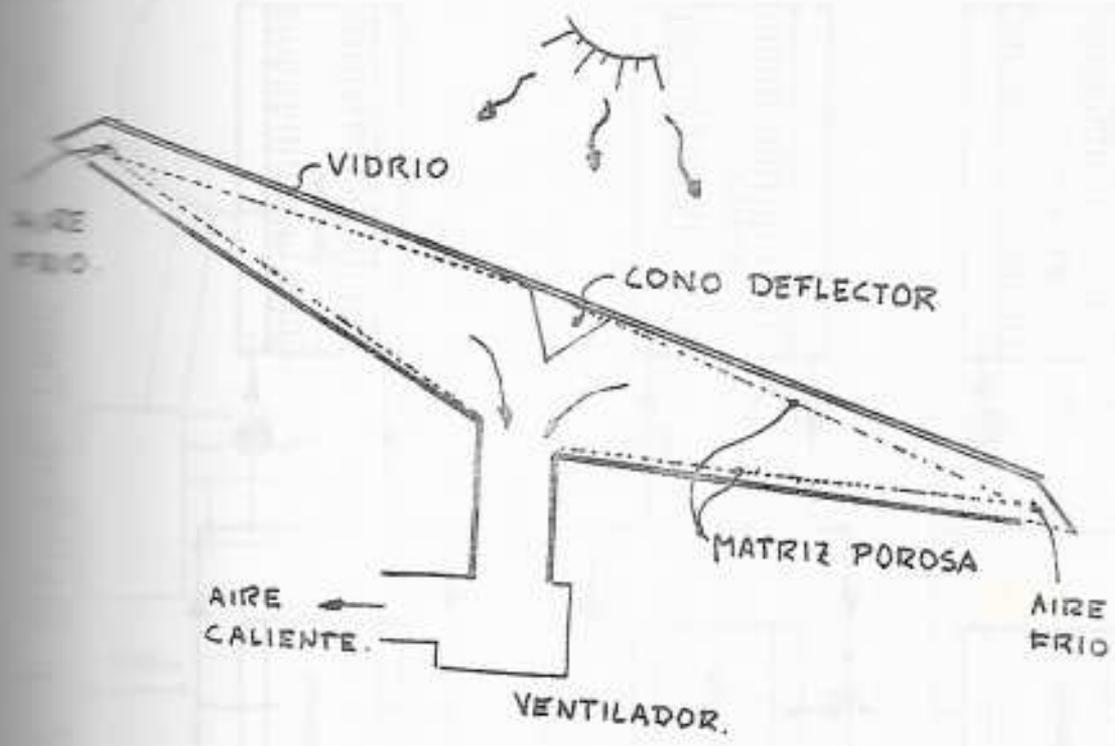
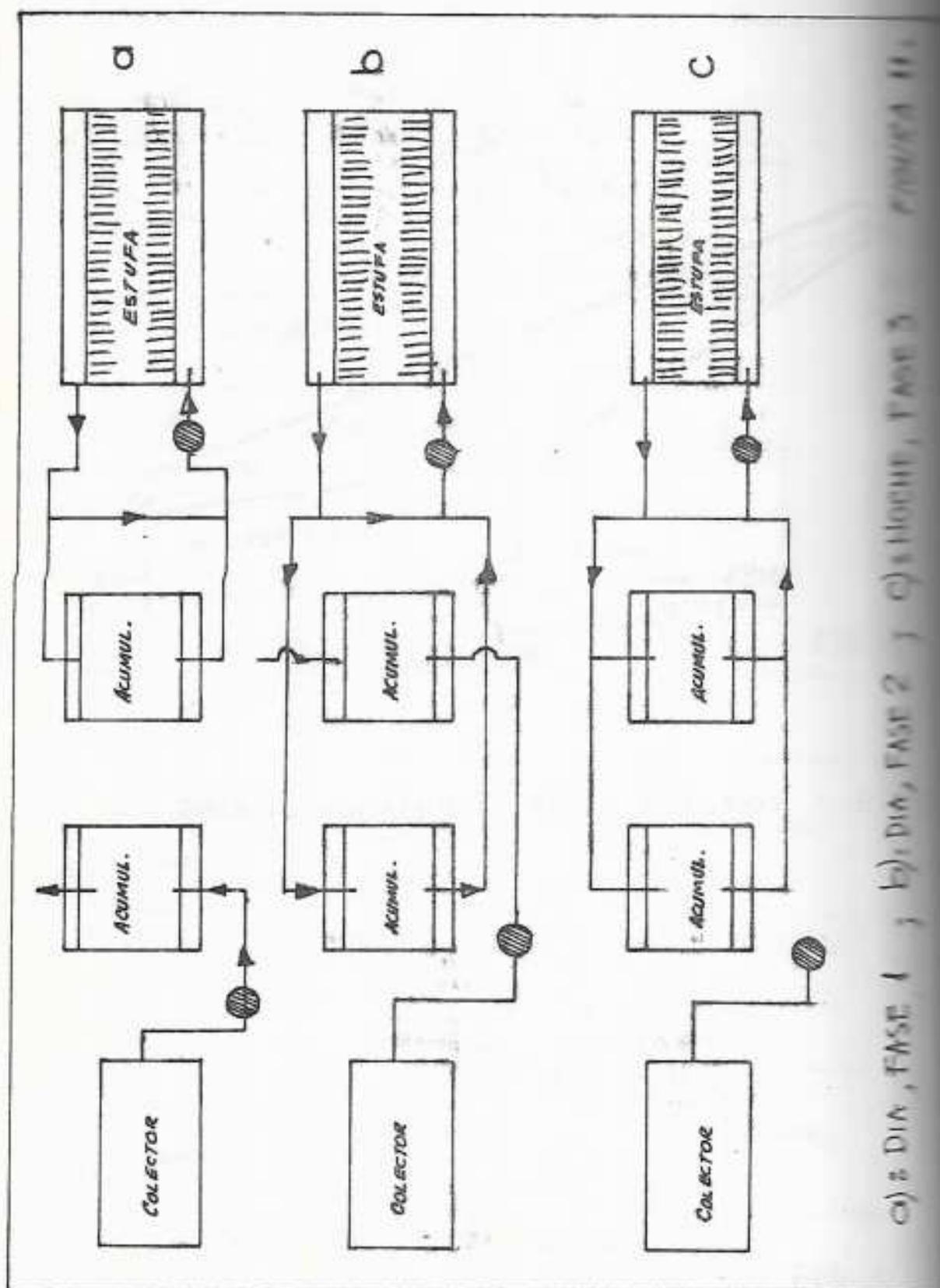


FIG. 9 - COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE.



a) e DIA, FASE 1 ; b) DIA, FASE 2 ; c) FLOQUE, FASE 3 FASE 11.

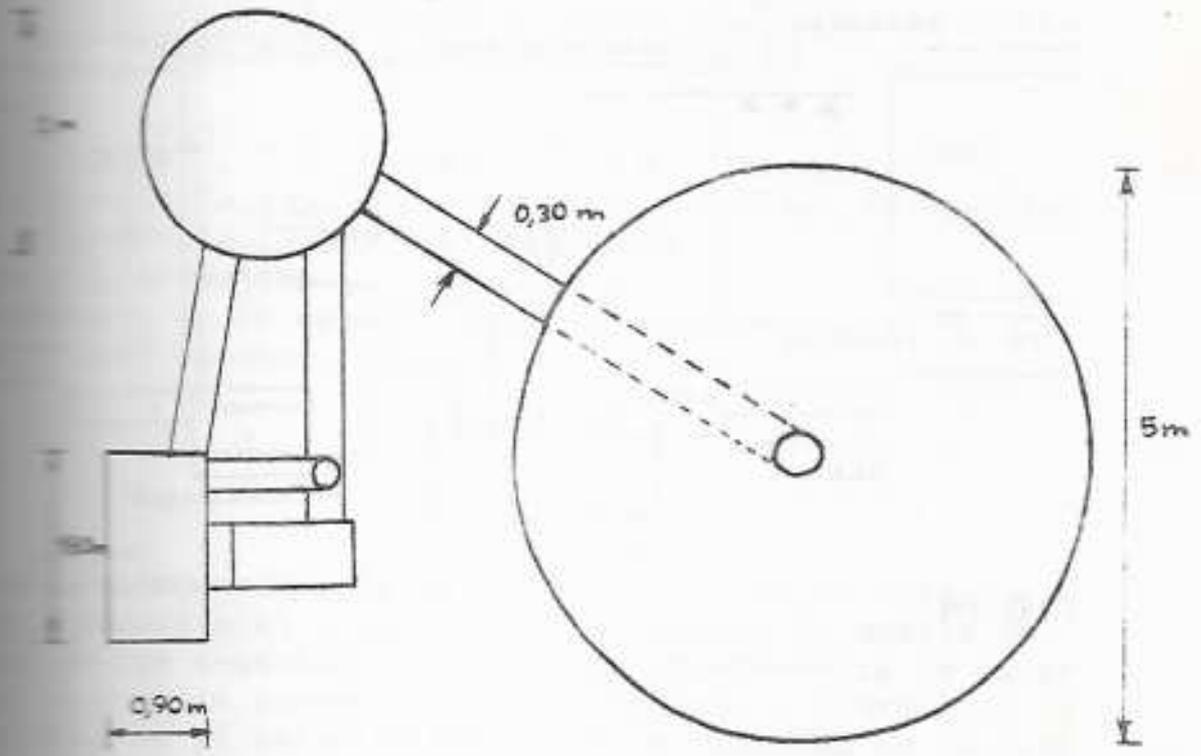
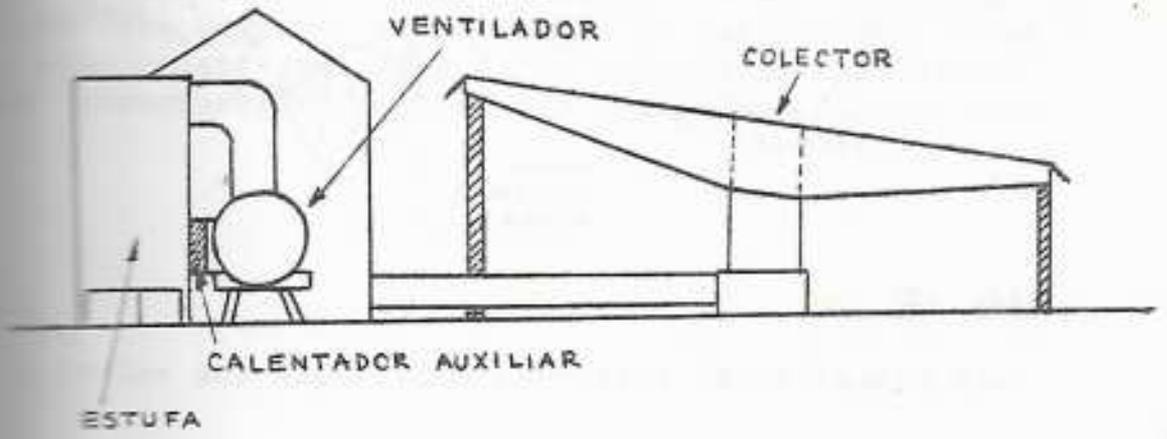


FIG. 13

FIG. 12



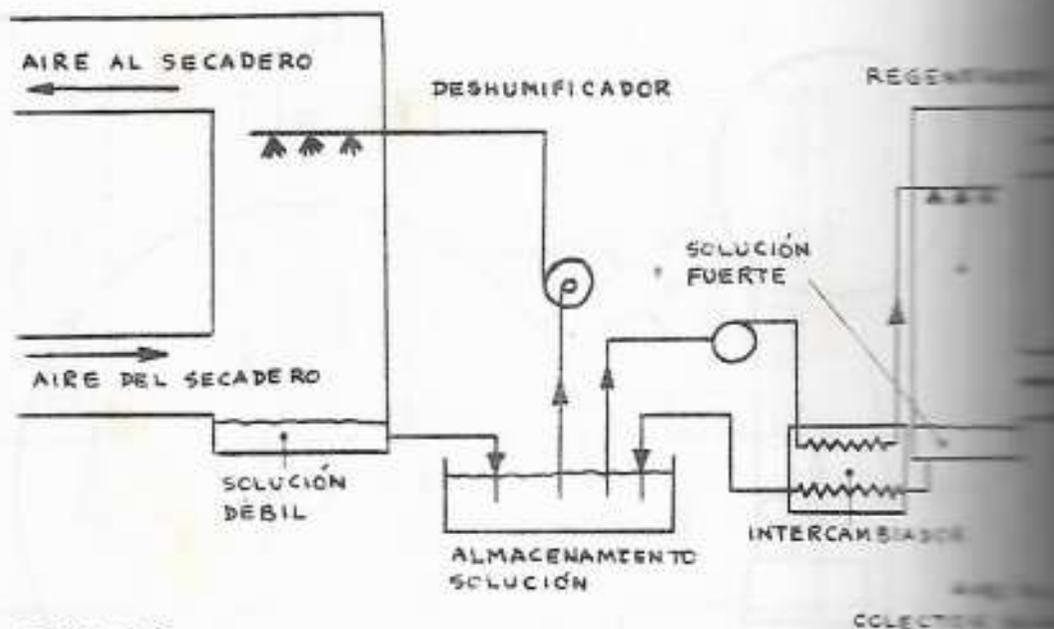


FIG 14.

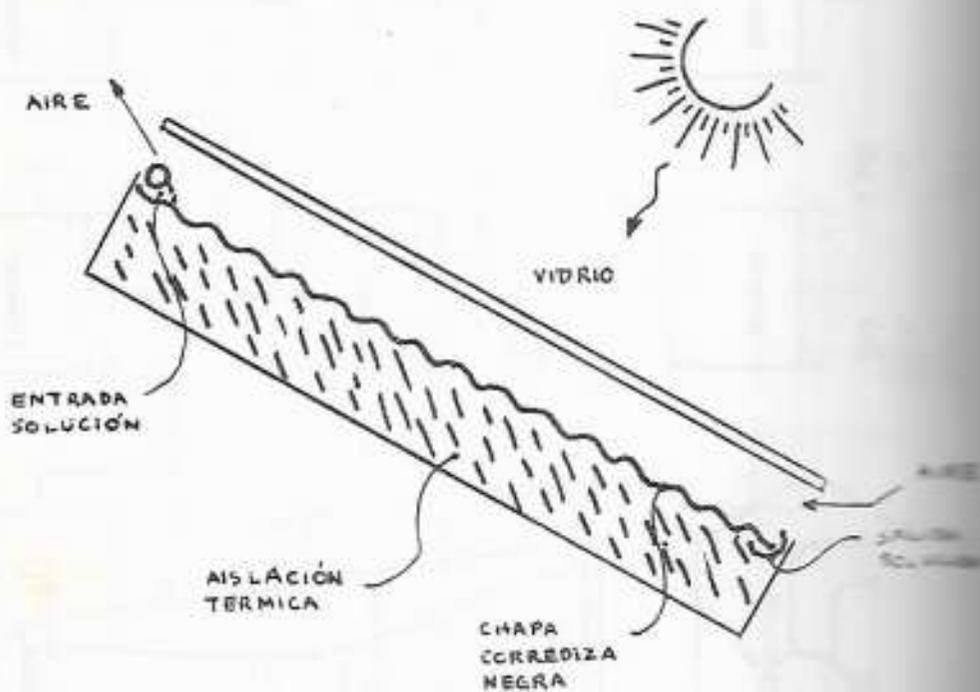


FIG. 15