

EL USO DE COLECTORES SOLARES DE PLASTICO PARA LA ANHIDRACION DE
SULFATO DE SODIO

Daniel Galli
Universidad Nacional de Jujuy
4600 Jujuy

Y

Graciela Lesino y Luis Sárvia*
INENCO#, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177, 4400 Salta

RESUMEN

En este trabajo se plantea un estudio de las distintas alternativas para lograr la anhidración del sulfato de sodio decahidratado mediante el uso de energía solar.

El método más directo consiste en el secado de los cristales mediante el pasaje de una corriente de aire caliente producido por colectores solares calentadores de aire. Esta posibilidad tiene requerimientos térmicos elevados debido al alto valor del calor de vaporización de agua.

Otro método plantea el calentamiento de los cristales de sulfato decahidratado para producir un cambio de fase a los 32,4°C. Ello produce una precipitación de cristales de sulfato anhidro los que se pueden separar para obtener el producto deseado. El resto de la solución saturada se recicla para aprovechar el sulfato disuelto. Dado que el calor de cambio de fase del sulfato es mucho menor que el del agua, esta alternativa presenta claras ventajas térmicas. Se propone realizar la operación en un colector horizontal con cubierta de plástico, analizando las secuencias de operación y rendimientos esperables. Se han realizado ensayos a nivel de prototipo.

1. INTRODUCCION

En un trabajo anterior (1) se ha planteado la producción de sulfato de sodio decahidratado industrial mediante pozas solares a partir de un mineral proveniente de salinas en la Puna. Los procesos desarrollados han sido ensayados con éxito y actualmente funciona una planta industrial que utiliza el sistema con una producción del orden de las 120 Toneladas por mes.

* Investigador del CNIE

‡ Instituto UNSa - CONICET

La anhidración del sulfato decahidratado es un proceso complementario del anterior que resulta de interés por dos razones:

- a) el precio de transporte es un factor importante en el costo de producción del sulfato, el que puede ser reducido drásticamente si el proceso industrial se instala en las cercanías de las salinas y se procede al secado de los cristales. Es de indicar que por cada kilo de sulfato anhidro un cristal de decahidrato posee 1.27 kg de agua,
- b) existen algunos procesos industriales que requieren sulfato anhidro y en este momento se tiene un buen mercado internacional para el producto.

Dado los requerimientos energéticos del proceso, la disponibilidad de energía solar en la zona de la Puna y la dificultad de acceso para los combustibles tradicionales, resulta factible plantear la anhidración con uso de la radiación solar.

En las secciones que siguen se analizan dos posibles alternativas y se plantea un diseño de sistema de anhidración, el que se encuentra en ensayo a nivel de prototipo.

2. LA ANHIDRACION POR SECADO

En este método de secado los cristales de sulfato decahidratado avanzan en un cierto sentido dentro de una cámara de secado, ya sea mediante cintas móviles o por intermedio de un horno rotativo, mientras que el aire calentado por vía solar lo hace en sentido contrario. La superficie de los cristales se seca y el sulfato anhidro que se forma se va desprendiendo formando pequeñas escamas que son arrastradas por la corriente de aire. Un ciclón a la salida de

EL USO DE COLECTORES SOLARES DE PLASTICO PARA LA ANHIDRACION DE
SULFATO DE SODIO

Daniel Galli
Universidad Nacional de Jujuy
4600 Jujuy

Y

Graciela Lesino y Luis Sárvia*
INENCO#, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177, 4400 Salta

RESUMEN

En este trabajo se plantea un estudio de las distintas alternativas para lograr la anhidración del sulfato de sodio decahidratado mediante el uso de energía solar.

El método más directo consiste en el secado de los cristales mediante el pasaje de una corriente de aire caliente producido por colectores solares calentadores de aire. Esta posibilidad tiene requerimientos térmicos elevados debido al alto valor del calor de vaporización de agua.

Otro método plantea el calentamiento de los cristales de sulfato decahidratado para producir un cambio de fase a los 32,4°C. Ello produce una precipitación de cristales de sulfato anhidro los que se pueden separar para obtener el producto deseado. El resto de la solución saturada se recicla para aprovechar el sulfato disuelto. Dado que el calor de cambio de fase del sulfato es mucho menor que el del agua, esta alternativa presenta claras ventajas térmicas. Se propone realizar la operación en un colector horizontal con cubierta de plástico, analizando las secuencias de operación y rendimientos esperables. Se han realizado ensayos a nivel de prototipo.

1. INTRODUCCION

En un trabajo anterior (1) se ha planteado la producción de sulfato de sodio decahidratado industrial mediante pozas solares a partir de un mineral proveniente de salinas en la Puna. Los procesos desarrollados han sido ensayados con éxito y actualmente funciona una planta industrial que utiliza el sistema con una producción del orden de las 120 Toneladas por mes.

* Investigador del CNIE

Instituto UNSa - CONICET

La anhidración del sulfato decahidratado es un proceso complementario del anterior que resulta de interés por dos razones:

- a) el precio de transporte es un factor importante en el costo de producción del sulfato, el que puede ser reducido drásticamente si el proceso industrial se instala en las cercanías de las salinas y se procede al secado de los cristales. Es de indicar que por cada kilo de sulfato anhidro un cristal de decahidrato posee 1.27 kg de agua,
- b) existen algunos procesos industriales que requieren sulfato anhidro y en este momento se tiene un buen mercado internacional para el producto.

Dado los requerimientos energéticos del proceso, la disponibilidad de energía solar en la zona de la Puna y la dificultad de acceso para los combustibles tradicionales, resulta factible plantear la anhidración con uso de la radiación solar.

En las secciones que siguen se analizan dos posibles alternativas y se plantea un diseño de sistema de anhidración, el que se encuentra en ensayo a nivel de prototipo.

2. LA ANHIDRACION POR SECADO

En este método de secado los cristales de sulfato decahidratado avanzan en un cierto sentido dentro de una cámara de secado, ya sea mediante cintas móviles o por intermedio de un horno rotativo, mientras que el aire calentado por vía solar lo hace en sentido contrario. La superficie de los cristales se seca y el sulfato anhidro que se forma se va desprendiendo formando pequeñas escamas que son arrastradas por la corriente de aire. Un ciclón a la salida de

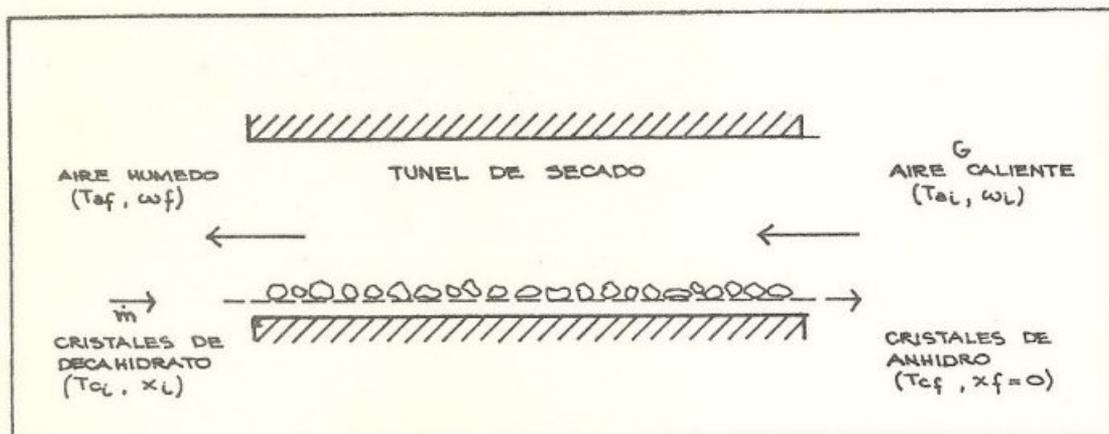


Fig. 1. Esquema del proceso de anhidración por secado

aire separa las escamas del aire terminando con el proceso.

Con el fin de analizar el sistema desde el punto de vista térmico se plantea un modelo que se ilustra en la Fig. 1. G kg/s de aire proveniente del colector solar entran a una temp. T_{a_i} con un porcentaje muy pequeño de agua W_i dado en kg agua/kg aire seco. Por el otro lado \dot{m} kg/s de sulfato decahidratado entran a la cámara de secado. La temperatura de entrada de los cristales es T_{c_i} y tienen un porcentaje de agua igual a x_i kg agua/kg sulfato anhídrido. Si los cristales no llegan mojados será $x_i = 1.268$. Los cristales deben salir completamente secos, es decir $x_f = 0$. La temperatura de salida de los cristales dependerá de las dimensiones de la cámara de secado. A efectos de realizar un análisis global de los aspectos energéticos del sistema se supondrá que $T_{c_f} = T_{a_i}$ lo que en general está muy cerca de la realidad. Con esta hipótesis es posible deducir fácilmente el gasto G de aire necesario en función del flujo de cristales \dot{m} y calcular el rendimiento energético global del proceso. Finalmente, el aire saldrá con un contenido de agua W_f y temperatura T_{a_f} que deben ser calculadas.

El agua perdida por los cristales pasa al aire. Por tanto:

$$\dot{x}_i \dot{m} = (W_f - W_i)G$$

Por otro lado, el balance energético da:

$$(h_f - h_i) \cdot G = \dot{m} C_{pca} \cdot T_{c_f} - (1 + x_i) C_{pcd} T_{c_i}$$

donde h_f y h_i son las entalpías del aire a la entrada y salida mientras C_{pca} es el calor específico de los cristales y anhídrido y C_{pcd} el de los decahidratados. En estas dos ecuaciones se desconoce la temperatura T_{c_f} y contenido de agua W_f del aire a la salida, así como el gasto de aire G necesario para producir el secado. h_f es una función de T_{c_f} y C_{of} . Si se admite que el secado es lo bastante largo como para que el aire se sature completamente a la salida (100% de humedad relativa) las dos ecuaciones permiten determinar las otras variables. Para ello debe disponerse de una carta psicométrica que relaciona las distintas variables a la entrada y la salida.

La Tabla I muestra los valores adoptados para las diferentes constantes y valores iniciales de las variables con el fin de obtener una primera estimación del balance energético.

El cálculo se realiza sobre la base de una entrada de cristales equivalente a 1 kg/seg de anhídrido. Reemplazando los valores adoptados en las dos ecuaciones se obtiene:

$$(h_f - h_i)G = 1,6 \quad ; \quad (W_f - W_i) \cdot G = 1,23$$

Dada que $W_f - W_i$ se encuentra en el orden de 0.01, significa que

$$h_f - h_i = 0.01$$

lo cual es muy pequeño frente a h_i .

El proceso se realiza en el aire prácticamente a entalpia constante lo que permite determinar de inmediato el pun

Tabla I

Cálculo del balance energético para el proceso de anhidración por secado.

Constantes:

C_{pca}	=	1500 jul/kg°C
C_{pca}	=	960 jul/kg°C
Q cambio fase	=	215kjul/kg
anhidro	=	2700 kg/m ³
deca	=	1460 kg/m ³

VARIABLES INICIALES:

T_{ai}	=	60°C
W_i	=	.04 kg agua/kg aire seco
i	=	1268 kg agua/kg cristales anhidro
T_{ci}	=	10°C
\dot{m}	=	1 kg/s de anhidro

Resultados

W_f	=	0.011 kg agua/kg aire seco
G	=	90.0 kg aire/seg
\dot{Q}	=	1012 Cal/seg

to final del aire (humedad relativa 100%, $h_f = h_i$) en el diagrama psicométrico.

Si el aire entra al colector calentador a temperatura T_{ao} , la cantidad de calor \dot{Q} gastada en el proceso de secado es:

$$\dot{Q} = C_{p\text{aire}} \cdot G \cdot (T_{ai} - T_{ao})$$

Es decir que se precisan 1012 Cal por cada kilogramo de anhidro producido. Parte de esta energía se consume en el proceso de vaporización del agua, alrededor de 685 Cal/kg anhidro, y el resto se consume en forma de aire caliente saturado de agua que sale del secadero, 327 Cal/kg anhidro. \dot{Q} recibe el nombre de rendimiento $evap.$ del proceso. Este valor deberá ser dividido por el rendimiento del colector para determinar la cantidad de energía solar necesaria. El valor es bastante alto debido al consumo producido por la vaporización del agua.

3. ANHIDRACION POR CAMBIO DE FASE

Si se eleva la temperatura de los cristales de decahidratado por sobre 32.4°C se produce un cambio de fase

dando lugar a la aparición de solución saturada de sulfato y precipitación de anhidro. Teniendo en cuenta que la solución saturada a 32.4°C contiene .320 kg de anhidro por kg de solución se de termina que el cambio de fase produce 0.18 kg de anhidro y 0.82 kg de solución a partir de 1 kg de decahidrato. Si la temperatura inicial del decahidrato es T_i y el calor necesario para el cambio de fase vale Q_{cf} Cal/kg decahidrato, el rendimiento cf del proceso en calorías consumida por kilo de anhidro vale:

$$cf = \frac{C_{pca} \cdot (32.4 - T_i) \cdot Q_{cf}}{.18}$$

Para $T_i = 10^\circ\text{C}$ se obtiene $P_{cf} = 421$ Cal/kg anhidro.

Es de observar que $cf/Q_{evap} = 0.42$ indicando que este proceso tiene ventajas térmicas claras.

Esta operación tiene la desventaja de que una buena parte del sulfato queda en forma de solución. A fin de evitar su pérdida la solución se recicla, volviendo a enfriarla por la noche para que se precipiten los cristales de sulfato decahidratado que volverán a ser fundidos al día siguiente en conjunto con nuevos cristales de la poza para producir más anhidro. La Fig. 2 ilustra este ciclo. Se puede calcular

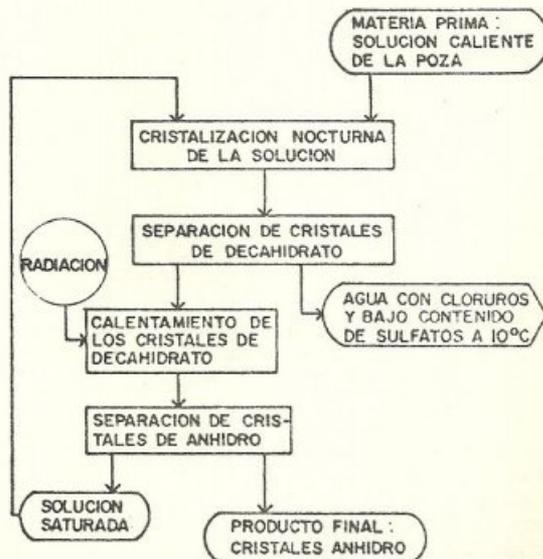


Fig. 2. Esquema del proceso de anhidración por cambio de fase.

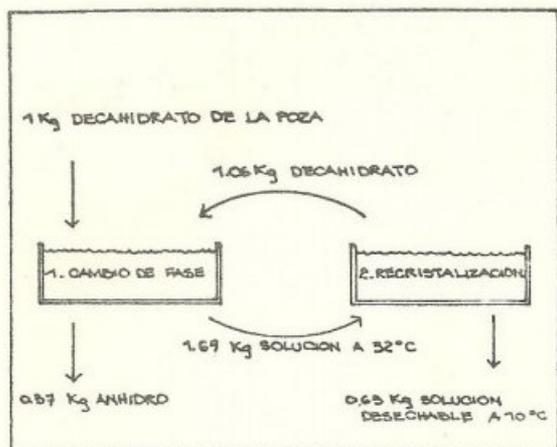


Fig. 3. Balance del proceso de anhidración por cambio de fase

cuánto sulfato se pierde al realizar este reciclaje. A esos efectos supon^{gase} que la cristalización nocturna del decahidrato se realiza a 10°C por lo que la solución saturada que se devuelve tendrá 0,1 kg anhídrido/kg solución. De allí es inmediato determinar que 1 kg solución saturada a 32°C da lugar a .65 de decahidrato y .35 kg de solución a desechar. La Fig. 3 ilustra los balances de masa que se obtienen al aplicar estos datos.

En el recipiente 1 se realizan el cambio de fase para producir sulfato anhídrido mientras que en el 2 se lleva a cabo la recristalización de la solución para recuperar decahidrato. Por cada kg de decahidrato que se incorpora al ciclo, el que contiene 0.44 kg de anhídrido, se producen 0.37 kg de anhídrido y se pierden los 0.07 en la solución a 10°C. Por tanto, el rendimiento de producción es de 84%.

4. SISTEMA SOLAR DE ANHIDRACION

Sobre la base del proceso de anhidración por cambio de fase se ha diseñado un equipo solar para lograr el objetivo.

Con ese fin, los cristales de decahidrato se colocan en un recipiente horizontal que haría las veces de colector calentando los cristales hasta producir un cambio de fase. Un corte del recipiente se muestra en la Fig. 4. Dos vigas de hormigón definen una bodega que se impermeabiliza mediante polietileno negro. En el fondo se colo-

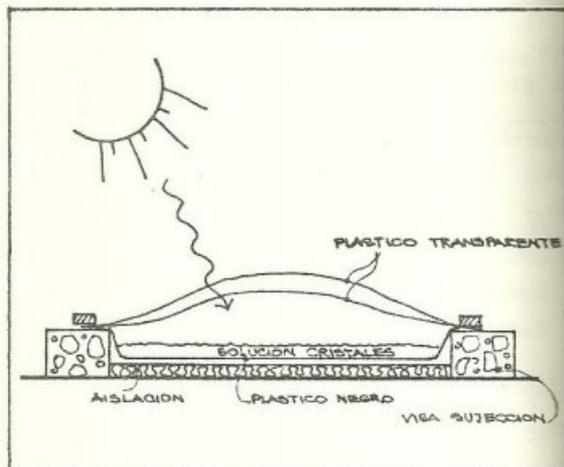


Fig. 4. Esquema del colector-cristalizador calentado por vía solar

ca aislación de poliestireno expandido para disminuir las pérdidas térmicas hacia el suelo. La bodega se cubre con dos plásticos transparentes que se mantienen en lugar levantando la presión con un ventilador. No es necesario que se circule aire ya que según hemos visto el mejor aprovechamiento del calor se obtiene produciendo el cambio de fase y no evaporando agua de los cristales.

Los cristales se colocan en el colector a la mañana, con un espesor tal que al final del día se ha producido el cambio de fase en todos los cristales dando lugar a la precipitación del anhídrido y la formación de una solución saturada. A esa hora deben retirarse los cristales de anhídrido ya que si se dejan, durante la noche se enfriará la solución volviendo a formar decahidrato. Se puede realizar una estimación primaria de los kilogramos de decahidrato M a colocar por m² de colector para que este proceso se realice en un día. Si η es el rendimiento del colector e I la radiación incidente, por cada m² se cumple:

$$I = M \cdot Q_{cf} + C_{pcd} \cdot (T_f - T_i)$$

donde T_i y T_f son la temperatura al empezar y terminar el día, Q_{cf} el calor de cambio de fase y C_{pcd} el calor específico de los cristales. Si se estima $\eta = 0.4$ y se toma $I = 6000 \text{ kcal/m}^2$ día (zona de Puna), se obtiene $M = 41 \text{ kg cristal/m}^2$ colector. Si los cristales ocupan una altura h, con un factor de huecos $f = 0.42$, el valor de h será

4.8 cm. La producción diaria de anhídrido será de 7.3 kg/m² de colección durante el verano.

Uno de los aspectos dificultosos del sistema desde un punto de vista operacional es el de retirar los cristales de anhídrido del colector al terminar el día. Una forma que requiere poca mano de obra y perjudica menos al plástico consiste en el uso de una bomba que absorba solución y cristales para enviarlos a un separador donde se retiran los cristales. En ese caso es probable que se necesite recircular parte del líquido para arrastrar los cristales.

El colector aquí descrito es muy similar a los cristalizadores usados para obtener el decahidrato a partir de la solución por enfriamiento durante la noche, al punto de que podría ser usado para ambas funciones. En este caso conviene estimular la circulación de aire externo mediante el ventilador ya que al evaporarse agua se enfriaría la solución hasta la temperatura de bulbo húmedo. Esta dualidad permitiría producir los cristales de decahidrato durante la noche para luego inducir el cambio de fase durante las horas de sol en el mismo recipiente llevando al mínimo las operaciones de movimiento de material.

Por combinarse los dos procesos, las etapas a cumplir para producir el sulfato anhídrido a partir de la solución caliente de la poza serían:

- 1) se vierte solución caliente proveniente de la poza en el colector al atardecer
- 2) durante la noche la solución se enfría provocando la precipitación de los cristales de sulfato decahidratado. Durante esta etapa el ventilador estará en marcha acelerando el enfriamiento
- 3) a la mañana se retira la solución que contiene las impurezas provenientes de la poza (principalmente cloruro de sodio) dejando los cristales
- 4) durante el resto del día la radiación solar calienta los cristales provocando su cambio de fase. En esta etapa el ventilador solamente infla el plástico de la cubierta. Al fin del día se dispone de cristales de anhídrido y solución saturada
- 5) al atardecer se separan los cristales de anhídrido bombeando la mezcla

hasta un separador. La solución retorna al colector

- 6) se agrega solución caliente de la poza al colector volviendo a la etapa 1
- 7) los cristales del separador se terminan de secar.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de ensayar el sistema cristizador-colector descrito se ha diseñado un prototipo de ancho normal, 1.60 m, y longitud reducida: 2,40 m. Los bordes fueron construidos en ladrillo, la aislación de fondo tiene 4 cm de espesor y se coloca un pequeño ventilador axial a efectos de inflar los plásticos.

Las primeras experiencias realizadas mostraron que la utilización de un plástico doble como cubierta trae problemas por condensación de agua entre las dos capas. Por otro lado el cambio de fase controla el aumento de temperatura del colector, la que no sobrepasa los 40°C, por lo que las pérdidas por la cubierta no son grandes. Por tales razones se decidió eliminar una de las capas.

La segunda observación es de que los cristales que se forman, al estar húmedos, permiten pasar la luz con facilidad, por lo que la absorción de la radiación en el plástico negro del colector es buena y no es necesario tomar precauciones especiales.

La experiencia se realizó en el campo universitario de la UNSa. en Salta donde se dispone de solución caliente de sulfato de sodio proveniente de la poza de 600 m² allí construida. Las condiciones climáticas no son tan favorables como las de la Puna por lo que se realizaron los ensayos a principios de junio para tener bajas temperaturas nocturnas, trabajándose en días despejados para tener buena radiación. No obstante el nivel de radiación es más bajo que en la zona andina por lo que los rendimientos esperables son menores.

La carga de solución de la poza utilizada ocupó alrededor de 2 cm de altura en el colector. La densidad de la solución era 1.26, lo que es bastante elevado. El enfriamiento durante la noche fue bueno, ya que la temperatura de los cristales era alrededor de 0°C a las 8 horas. La cristalización del sulfato decahidratado fue excelente. los cristales formaron una masa compacta

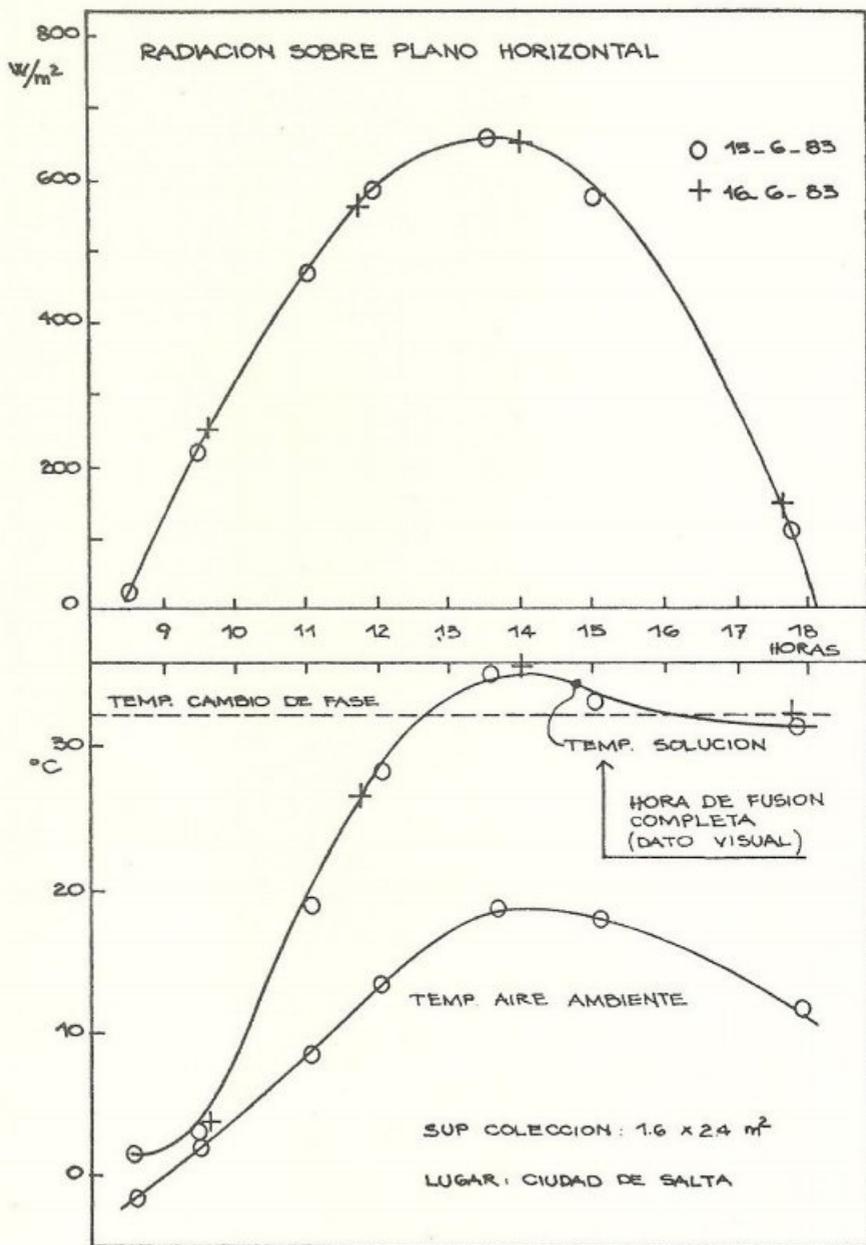


Fig. 5. Resultados de la experiencia de anhidraci3n por cambio de fase

ta no apreciándose huecos como los su-
puestos en los cálculos iniciales. La
soluci3n restante, con muy poco sul-
fato, fue extraída con una bomba pe-
queña, dando cierto trabajo por no ha-
berse previsto inclinaci3n para drenaje
y un pequeño pozo dentro del colec-
tor para colocar el chup3n de la bom-
ba. De cualquier manera deben preveer-
se varios lugares de extracci3n de la
soluci3n ya que ésta debe filtrar a

través de de masa lo que es un proceso
lento.

El calentamiento a lo largo del día fue
medido. Las curvas de radiaci3n sobre
superficie horizontal, temperatura am-
biente y temperatura de los cristales
se muestran en la Fig. 5. Alrededor de
las 14^h los cristales habían cambiado
completamente de fase observándose los
cristales de anhidro, finamente dividi-

dos, en el fondo del colector. Cerca de las 17^h se comenzaron a formar nuevamente los cristales de decahidrato en el fondo del colector, los que se fueron agrandando al pasar el tiempo mientras la solución se mantenía cerca de los 32°C. No se han realizado aún experiencias de extracción de los cristales de anhídrido.

Se puede realizar un balance térmico del proceso sobre la base de los datos recogidos, el que se muestra en la Tabla II. Se estimó en un 15% la pérdida de radiación en la cubierta y por reflexión. El espesor de cristales de sulfato decahidratado era de 2 cm.

Tabla II

Balance térmico del experimento de anhidración por cambio de fase.

Balance global

Radiación total en el día:	14.0 Mjul/m ²
Calor consumido en calentamiento solución y cambio de fase :	7.3 Mjul/m ²
Rendimiento global :	52%

Balance detallado

Hasta el momento de fusión total a las 15 h.

Radiación incidente total:	10.6 Mjul/m ² =	
	= 100	
Radiación absorbida por cubierta :	1.6 Mjul/m ² =	
	= 15%	
Calor consumido en calentamiento y cambio de fase:	7.3	= 69%
Pérdidas por el fondo (calculadas con h=1 vatio/m ² °C):	.6	5.7%
Pérdidas por la cubierta (calculada con h=4.5 vatio/m ² °C) :	1.1	10.3%

6. DISCUSION

Las experiencias realizadas muestran que el método de anhidración solar por cambio de fase es factible, no habiéndose tenido problemas que obstaculicen la puesta a punto del proceso. El balance térmico da resultados razonables mostrando que el rendimiento del uso de la energía para lograr el cambio de fase en el colector es mejor (54%) que el esperado inicialmente. Ello es debido a que todo el proceso se realiza a bajas temperaturas lo que disminuye significativamente

la pérdida por el suelo y cubierta. La cantidad de solución a agregar no ha sido aún optimizada por lo que el rendimiento puede mejorar.

Se han recogido varias observaciones útiles en los aspectos constructivos tales como la colocación de una sola capa de plástico y la colocación de varios pozos para extracción de solución.

El hecho de que los cristales de decahidrato quedan algo mojados disminuye el rendimiento del proceso ya que esa solución diluida va a disolver parte del anhídrido que precipita. Por tal razón puede ser útil usar un proceso combinado de evaporación de agua y cambio de fase de manera que la disolución de anhídrido disminuya. Se deberá optimizar la proporción requerida de cada operación.

7. AGRADECIMIENTO

Este proyecto está parcialmente financiado por la Subsecretaría de Ciencia y Tecnología de la Secretaría de Planeamiento de la Nación.

8. BIBLIOGRAFIA

1. G. Lesino, L. Saravia, et al. "Construcción y Operación de la Poza de Sulfato de Sodio de Sociedad Minera Pompeya S.A.". Actas de la 7a. Reunión de ASADES, Rosario, p. 69, 1981.