

# UN INSTRUMENTO PARA MEDIR LA ABSORBANCIA DE LA RADIACION SOLAR

A. Fasulo \* L. A. Odicino \* M. Torres \*

## 1. RESUMEN

Mostramos un instrumento de bajo costo y facil construcción que permite medir la absorbandia relativa global de superficies. Del análisis de los principios de funcionamiento, en que se basa, encontramos una nueva aplicación, esta es, la de medir la transmitancia global de la radiación solar de superficies transparentes. Se presentan tablas con las absorbandias de algunas superficies y pinturas a modo demostrativo de su aplicación.

## 2. INTRODUCCION

Uno de los objetivos que tiene el Laboratorio de Energia Solar de la Universidad Nacional de San Luis es desarrollar superficies selectivas destinadas al aprovechamiento de la energia solar en el rango de las temperaturas intermedias, consideradas estas entre los 100 C y los 300 C. Para ello se requiere el conocimiento de los valores de la absorbandia,  $\alpha_s$ , y emittancia,  $\epsilon_s$ , de las superficies logradas. Solo con este conocimiento es posible avanzar en el ajuste progresivo de los parámetros que tienen importancia en su construcción, tales como: temperatura del baño electrolitico, de la superficie, densidad de la corriente, etc.

Hasta el presente, el método seguido fué el de comparar entre si y con pintura negro mate [1], [2] los valores de la temperatura límite que alcanzan las muestras cuando son expuestas a la radiación solar, en igualdad de condiciones. Este procedimiento no nos permite conocer sus absorbandias, sólo nos dan una relación de mayor a menor entre los  $\alpha_s/\epsilon_s$  de las superficies que comparamos. Así seleccionamos algunas (las con mayores valores  $\alpha_s/\epsilon_s$ ) y entonces recurrimos a un laboratorio que posea un espectrómetro con esfera integradora (INTI ó INTEQ) el cual nos provee los valores de la reflectancia global espectral  $\rho(\lambda)$ . Con estos datos calculamos la absorbandia de la radiación solar

$$\alpha_s = \frac{\int_{0.2\mu m}^{2\mu m} (1 - \rho(\lambda)) H(\lambda) d\lambda}{\int_{0.2\mu m}^{2\mu m} H(\lambda) d\lambda} \quad -1-$$

donde  $H(\lambda)$  es la intensidad de la radiación solar tomada a 1 UMA.

Este procedimiento tiene los siguientes inconvenientes:

- 1)  $\rho(\lambda)$  es solo posible determinarla a temperatura ambiente.
- 2) Para nuestro laboratorio, en particular, la obtención de estos resultados nos lleva meses, cuando lo necesario para un desarrollo continuado es disponer de estos en forma inmediata.

\* Laboratorio de Energia Solar  
Universidad Nacional de San Luis  
Chacabuco y Pedernera - 5700 San Luis

3) La compra de un instrumento de esta naturaleza está fuera de nuestras posibilidades por su costo y no se justificaría para este solo uso. Otros instrumentos específicos presentan también el inconveniente de su alto costo, del orden de los US\$ 20.000,00 [3].

Por estas razones analizamos la posibilidad de construir un dispositivo que nos permite determinar  $\alpha$ .

### 3. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO

El instrumento que hemos estudiado permite la determinación relativa de la absorbancia, fué propuesto por TABOR [4] basado en un radiómetro ideado por GUILD [5].

Consiste de una cavidad de forma prismática rectangular, la cual tiene en sus caras opuestas mas alejadas dos ventanas protegidas por vidrio que permiten el ingreso de la radiación solar y mantienen, en su interior, la temperatura. Las ventanas poseen sendas tapas móviles que se pueden cerrar y abrir a voluntad. La cavidad se construye con un material de alto calor específico. En la parte media de su cara superior una abertura permite introducir una placa que contiene las superficies a medir. Esta quedara alojada paralela a las ventanas y dispuesta de forma tal que la radiación solar, colimada, que ingrese por una de ellas, incida solo sobre la placa.

La placa deberá ser de pequeño espesor y alta conductividad térmica, pues supondremos que la temperatura de esta es la misma en todos sus puntos y en cada instante. La superficie cuya absorbancia deseamos determinar es depositada sobre una de las caras. Sobre la otra se depositará una superficie de absorbancia conocida.

El dispositivo es montado sobre un soporte que posee dos ejes perpendiculares entre si, uno de ellos, el vertical permite seguir la trayectoria del sol y rotarlo 180 grados. El eje horizontal complementa la función del anterior. La figura 1 muestra un corte esquemático del instrumento.

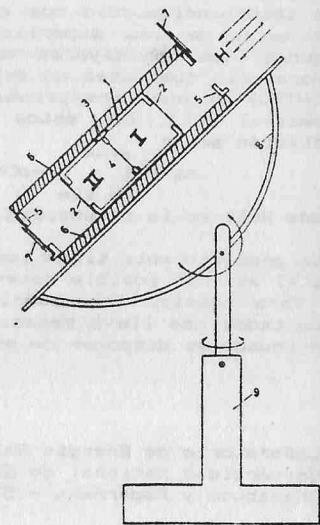


FIGURA -1-  
Corte longitudinal del instrumento construido:  
I-cavidad 1, II-cavidad 2.  
1-Paredes de Grillon.  
2-Placas de vidrio.  
3-Soporte de la muestra.  
4-Placa metálica con muestras.  
5-Ventanas exteriores.  
6-Cubierta de poliestireno expandido.  
7-Tapas deslizantes.  
8-Soporte plano giratorio.  
9-Pie.

### 4. MODO DE OPERACION

El instrumento lo operamos cerca del mediodía procurando asegurar una radiación aproximadamente constante. Apuntamos una de sus ventanas hacia la radiación solar la cual ingresa, por ejemplo, a I durante  $\Delta t$  segundos (período de calentamiento) luego la cortamos bajandola tapa correspondiente (7-I), ver figura 1. Durante los  $\Delta t$  segundos siguientes permanecen ambas ventanas cerradas (período de enfriamiento) rotamos el instrumento 180 grados y lo acomodamos de manera que la radiación incida perpendicularmente a la tapa (7-II). Cumplido el período  $\Delta t$  de enfriamiento retiramos la tapa y la radiación calienta la cara II de la muestra durante  $\Delta t$  segundos, cerramos la ventana y rotamos nuevamente el dispositivo 180 Grados y esperamos  $\Delta t$  segundos de enfriamiento, hemos descrito así un ciclo. Se continúa de esta manera hasta que la temperatura de la muestra e interior de la cavidad fluctuan entre valores máximos y mínimos aproximadamente estables. Entonces se inicia el período de recolección de datos. En estas condiciones, y teniendo, por ejemplo en ambas caras superficies de alta absorbancia las temperaturas de las placas fluctuan entre los valores de 30 C y 40 C para una radiación de 1 Kw/m<sup>2</sup> e intervalos de calentamientos y enfriamientos de 135 seg. Con una temperatura media de las paredes de la cavidad de aproximadamente 26 C. En la figura 2 representamos una secuencia típica de la evolución de la temperatura de la placa en función del tiempo. Hemos supuesto que la absorbancia de la cara I es levemente mayor que la de la cara II, así, la temperatura alcanzada por la placa al final en el período de calentamiento de la cara I, es levemente superior a su similar de la cara II.

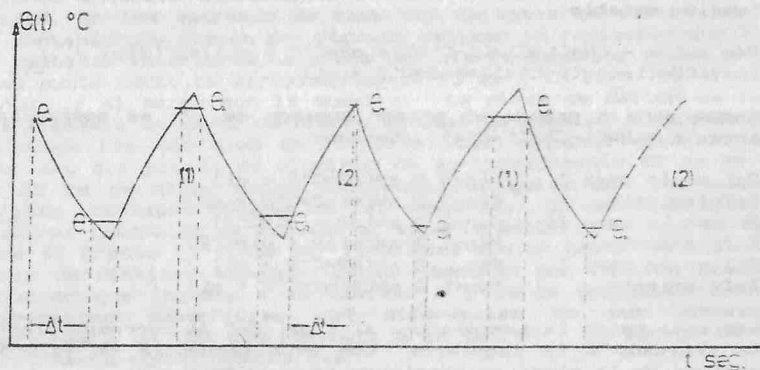


figura -2-  
Curva típica de temperatura en función del tiempo de una placa metálica con superficies absorbentes en cada cara. Tomada una vez establecida la fluctuación estable.

### 5. DESARROLLO ANALITICO

Procuraremos ahora, siguiendo a GUILD [5] establecer una relación de  $\alpha_2$  de la cara II con respecto a  $\alpha_1$  de la cara I a través de las diferencias de temperaturas respectivas. Como  $\theta_2$  y  $\theta_4$  dependen respectivamente de las temperaturas  $\theta_1$  y  $\theta_3$  a partir de las cuales se inició el proceso, de  $\Delta t$  segundos, de calentamiento y estas a su vez de  $\theta_0$  y  $\theta_2$  temperaturas de partida del intervalo, de  $\Delta t$  segundos, de enfriamiento del semi-ciclo anterior, podemos establecer una relación entre estos valores de manera que contenga  $\alpha_1/\alpha_2$ .

Como las pérdidas térmicas que sufre la placa metálica son predominantemente por convección y conducción. Los ciclos de calentamiento-enfriamiento, están gobernados por la ecuación:

$$d\theta/dt = \beta(\alpha H - \theta(t)) \quad -3-$$

donde:  $\theta(t)$  es la temperatura de la placa en función del tiempo  $t$ .  $\beta$  es el coeficiente de enfriamiento de la placa.  $\alpha$  la absorbancia de la cara expuesta a la radiación  $H$  que suponemos constante. La solución de -3- es:

$$\theta(t) = K \exp(-\beta t) + \alpha H \quad -4-$$

si la condición inicial es:  $\theta(0) = \theta_0$  (figura 2) resulta:

$$\theta_1 = \theta_0 \exp(-\beta \Delta t) \quad -5-$$

De donde se deduce  $\exp(-\beta \Delta t) = \theta_1/\theta_0 = C$ .  $C$  es un número menor que la unidad y es tomado como una constante de la experiencia. En los semi-ciclos siguientes las temperaturas están dadas por:

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \theta_0 C^2 + \alpha_2 H (1-C) \\ \theta_3 &= \theta_0 C^3 + \alpha_2 H (1-C) C \\ \theta_4 &= \theta_0 C^4 + \alpha_2 H (1-C) C^2 + \alpha_1 \rho (1-C) \\ \theta_5 &= \theta_0 C^5 + \alpha_2 H (1-C) C^3 + \alpha_1 \rho (1-C) C \end{aligned} \quad -6-$$

Luego de  $n$  ciclos tras los cuales se han alcanzado condiciones de fluctuación estable:

$$\theta_{4n} = [\theta_0 - (H \alpha_1 (1-C)/(1-C^4))] * [\alpha_2 C^2 + \alpha_1] * C^{4n} + (H \alpha_1 (1-C)/(1-C^4)) * [\alpha_2 C^2 + \alpha_1] \quad -7-$$

Vemos que para  $n$  grande el primer sumando de -7- es despreciable, llamando:  $a = H \alpha_1 (1-C)/(1-C^4)$ , tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Sol en la cara I : } \theta_{4n-4} &\approx a [\alpha_2 C^2 + \alpha_1] \\ \text{Enfriamiento : } \theta_{4n-3} &\approx a C [\alpha_2 C^2 + \alpha_1] \\ \text{Sol en la cara II: } \theta_{4n-2} &\approx a [\alpha_2 + \alpha_1 C^2] \\ \text{Enfriamiento : } \theta_{4n-1} &\approx a C [\alpha_2 + \alpha_1 C^2] \\ \text{Sol en la cara I : } \theta_{4n} &\approx a [\alpha_2 C^2 + \alpha_1] \\ \text{Enfriamiento : } \theta_{4n+1} &\approx a C [\alpha_2 C^2 + \alpha_1] \end{aligned} \quad -8-$$

En cada caso se da la temperatura al final del  $\Delta t$  correspondiente al evento indicado a la izquierda. Con esta secuencia de valores de temperatura de la placa se construye la siguiente -9-:

$$R_n = \frac{[\theta(4n-4) - \theta(4n-3)] + 2[\theta(4n-2) - \theta(4n-3)] + [\theta(4n-2) - \theta(4n-1)]}{[\theta(4n-2) - \theta(4n-1)] + 2[\theta(4n) - \theta(4n-1)] + [\theta(4n) - \theta(4n+1)]} \quad -9-$$

que es la mas conveniente que es puede establecer entre  $\alpha_1$  con respecto a  $\alpha_2$ . En efecto, reemplazando -8- en -9- obtenemos:

$$R_n = \frac{(\alpha_2 (3-C+C^2-3C^3) + \alpha_1 (1-3C+3C^2-C^3))}{\alpha_1 (3-C+C^2-3C^3) + \alpha_2 (1-3C+3C^2-C^3)} \quad -10-$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{((3-C+C^2-3C^3) * R_n - (1-3C+3C^2-C^3))}{((3-C+C^2-3C^3) - (1-3C+3C^2-C^3) * R_n)} \quad -11-$$

Si tomamos el caso del ejemplo anterior en el cual la temperatura de

la placa fluctúa entre 30 C y 40 C, tenemos que  $C = 0.75$ , según -9- tendremos que  $R_n = 1$  y con la corrección dada por -11- resulta que  $\alpha_2/\alpha_1 = 1$ , si en cambio  $R_n = 0.9$  es  $\alpha_2/\alpha_1 = 0.999$  en consecuencia esto nos muestra que en la practica podemos usar directamente la relación -9- para el cálculo de  $\alpha_2/\alpha_1$ .

Por otra parte la deducción de -9- supone que la constante de enfriamiento es única, tanto para la cara I como para la cara II y esto es consistente con un  $R_n \approx 1$ . Sin embargo si nos deslizásemos hacia un  $R_n \approx 0.9$  el error que cometeríamos al emplear -9- será inferior al 1%.

## 6. CONSTRUCCION

Para la construcción de la cavidad y soporte de la muestra empleamos una plancha de 8 mm de espesor de un compuesto a base de poliamida, que se comercializa, con el nombre de GRILON, este posee un calor específico de aproximadamente 0.4 Kcal/Kg. K.

Superponiendo cuatro placas de GRILON de 12 cm x 12 cm les practicamos en una operación, una ventana de aproximadamente 59 mm X 59 mm. Dos de estas fueron ligadas por medio de resinas a las paredes laterales (de 12 cm de alto por 24 cm. de largo). Dos placas de vidrio de 1 mm de espesor son adheridas a las ventanas. Dos placas (de 12 cm de ancho por 42 cm de largo) son adosadas al conjunto anterior conformando el cierre superior e inferior de la cavidad. En los extremos de cada una de estas se ubican las otras dos ventanas que tienen por función colimar la radiación que llega a las ventanas interiores. La placa del cierre superior posee un corte en su punto medio, de aproximadamente 15 mm X 12 cm, a los efectos de introducir el marco con la muestra. La placa de GRILON de la base está ligada a un marco de hierro el cual se ajusta al pie metálico, que posee los dos ejes de rotación. Las ventanas externas llevan adheridas dos placas de aluminio de aproximadamente 22 cm de ancho por 22 cm de alto. Estas contienen las guías por las cuales se deslizan las tapas móviles de las ventanas. Un marco de madera con caladuras laterales es adosado al soporte metálico el que se dispone sobre el frente I) tiene por finalidad alojar hasta seis placas de vidrio de distinto espesor. Estas tendrán por función atenuar la radiación que ingresa a la cavidad I y serán empleadas cuando se experimenten superficies con diferencias en sus absorbancias superiores a un 10% con respecto a la patrón. Se agregarán tantas placas hasta que se cumpla que:

$$H_1 * \alpha_1 \approx H * \alpha_2 \quad -12-$$

donde  $H_1$  es la radiación solar que llega a la superficie I luego de atravesar las  $n$  placas de vidrio.

## 7. CONSTRUCCION DE LAS MUESTRAS

Nos propusimos determinar la absorbancia de un conjunto de superficies que consideramos de interes. Para ello cortamos placas de 6cm por 6cm de bronce de 0.7 mm de espesor. EN su centro efectuamos una cavidad, sin llegar a perforarla y en ella alojamos la cabeza de una termocupla de cobre-constantan confeccionada con alambre de 0.2 mm de espesor. Esta la fijamos a la placa mediante una gota de estaño. Aplicamos luego la pintura, controlando la masa de las películas depositadas, procurando que todas fueran aproximadamente iguales.

## 8. CALIBRADO DEL INSTRUMENTO

Para calibrar el aparato, controlar su funcionamiento y determinar el modo adecuado de operarlo empleamos dos muestras, una de

ellas, contiene en cada cara una termocupla y pintura negro mate. Una de las termocuplas la conectamos a un registrador potenciométrico de trazo continuo y la otra al termómetro digital que nos arroja un dato cada seis segundos, encontramos la relación  $Rn_{21} = 0.99$ , con un error relativo del 3%. En lo que sigue colocaremos la superficie de referencia hacia la cavidad I y la incógnita hacia la cavidad II.

Por otra parte mediante termocuplas, introducidas a través de perforaciones en cada una de las paredes de cada cavidad, controlamos y comparamos la evolución de la temperatura en el interior del instrumento. Encontramos, una vez que éste alcanzó su estado de fluctuación estable, que las temperaturas fluctúan entre 0.1 C a 0.3 C, siguiendo los semiciclos de operación del instrumento y mostrando una buena simetría del mismo.

En una segunda parte determinamos la absorbancia de la superficie que tomaremos como referencia: NEGRO MATE. Para ello empleamos una superficie de cromo negro de la cual conocemos su absorbancia [1], encontramos así que la absorbancia de la pintura de referencia es de:  $0.95 \pm 0.03$ .

Como las superficies desplegadas, en este caso, en las caras I y II poseen emittancias extremas:  $\epsilon I \approx 0.98$  y  $\epsilon II \approx 0.25$  a los efectos de ver si esto afecta la simetría térmica del aparato, analizamos la evolución de las temperaturas promedio en cada cavidad, encontrando que el efecto de mayor emittancia presente hacia la cavidad I no afecta significativamente la temperatura media en el interior de ésta con relación a la cavidad II, gráfica 1. En la misma gráfica podemos ver como luego de 45 minutos de trabajo las temperaturas en ambas cavidades tienden a permanecer constantes en el tiempo. Consideraremos en lo sucesivo este lapso, de 45 minutos, como el tiempo mínimo para que el instrumento alcance su estado térmico de fluctuación estable.

Finalmente procedimos a calibrar las placas de vidrio que emplearemos para atenuar la radiación que ingresa a la cavidad I. Para ello retiramos el vidrio de la ventana de la cavidad II e introducimos por ella a su interior un solarímetro KIPP-ZONEN. Manteniendo el instrumento apuntado al sol fuimos poniendo en el marco correspondiente cada una de las placas de vidrio y la combinación de estas tomadas de a dos, tres y cuatro, obteniendo mediante lecturas en el solarímetro los factores de atenuación correspondiente a cada una o conjunto de ellas.

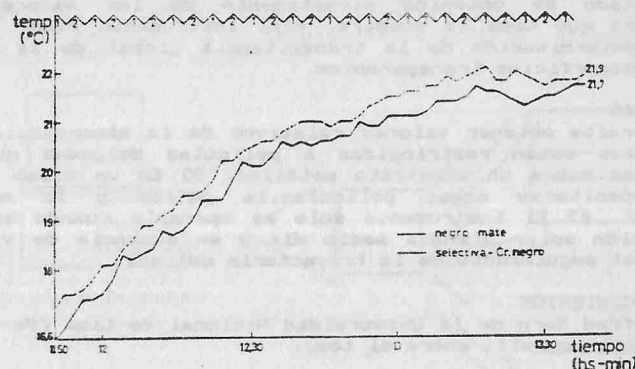
Dejando el instrumento con la cavidad I hacia el sol, procedemos a ciclarlo contrastando la evolución de la temperatura de la placa cuando llega a la superficie I la radiación solar sin atenuación con respecto a la atenuada. Puesto que los desarrollos teóricos contenidos en las experiencias -8- a -11- se mantienen, con solo cambiar en ellos los  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  por H1 y H2 respectivamente, encontramos, si la atenuación no es muy grande, total acuerdo con los valores de atenuación medidos con el solarímetro. Hemos encontrado así una nueva aplicación para este dispositivo: EL DE MEDIR LA TRANSMITANCIA GLOBAL DE LA RADIACION SOLAR DE SUPERFICIES TRANSPARENTES.

#### 9. APLICACIONES

Finalmente empleamos el instrumento para determinar la absorbancia de la radiación solar de superficies que consideramos de interés. En la tabla 1 mostramos los resultados obtenidos para pinturas diversas. Para la determinación de las mismas partimos de la absorbancia de la pintura negro mate, 0.95, como ya se especificó en 7. A esta la usamos entonces como superficie de referencia para

determinar las absorbancias de las otras, en las experiencias N° 2, 3, 4, 5 y 6. El verde lo usamos a su vez como referencia en las experiencias N° 7 y 8, el amarillo en la N° 9 y el blanco en la N° 10. En las experiencias 5 y 9 determinamos la absorbancia del esmalte sintético blanco, en la primera a partir del negro mate y en la otra a partir del amarillo, verificando así la coherencia de los resultados dentro de errores de cada experiencia. Cada resultado presentado en la tabla es obtenido desde el valor promedio de los  $Rn$  de 5 a 10 ciclos.

Los colores mencionados en la tabla 1 corresponden a los siguientes productos comerciales: Convertidor óxido es Ferro Bett, de Cintoplom. Verde N° 39 de Albalux. Negro Mate N° 0. Blanco N° 1 y Amarillo Cromo N° 14, son de Vitrolux. Aluminio N° 80 de Colorin.



Gráfica 1  
Temperaturas medias, sobre las paredes, en el interior de las cavidades I y II

Exp.	Cara I	Cara II	$Rn$	Atenuación %	Error % $Rn$	Absorb. $\alpha_2$
1	negro mate	negro mate	0.99	---	3	---
2	negro mate	conv. óxido	0.86	---	3	0.82
3	negro mate	Cr. negro 1	0.99	---	3	0.94
4	negro mate	verde N° 39	1.01	28	5	0.69
5	negro mate	blanco N° 1	1.07	69	7	0.31
6	negro mate	Cr. negro 2	0.98	--	2	0.93
7	verde N° 39	Zn, pulido	0.94	14	6	0.56
8	verde N° 39	amarillo	1.01	95	5	0.60
9	amarillo	blanco N° 1	0.86	51	14	0.26
10	blanco N° 1	pint. Al.	1.01	--	10	0.32

TABLA I

Resultados experimentales de las absorbancias (determinadas a partir de la del negro mate) de las superficies depositadas en la cara II.

## 10. MEJORAS

El instrumento es factible de ser perfeccionado. Por una parte reduciendo una de las fuentes de errores, producido en la operación de seguimiento del sol. Esto se lograría dejando un mayor margen entre los tamaños de las muestras y las ventanas. Por otra parte si hacemos el vacío en el interior de la cavidad podríamos trabajar con las muestras a mayor temperatura.

## 11. CONCLUSIONES

Disponemos un aparato que será un gran auxiliar para el desarrollo de superficies selectivas que encara nuestro laboratorio. Por otra parte también podría emplearse para la selección del color de materiales, como por ejemplo, en arquitectura solar.

## VENTAJAS

1) Bajo costo y fácil construcción. 2) Opera directamente con radiación solar y a la temperatura de trabajo (si esta es baja). 3) El resultado es obtenido directamente de los valores de la temperatura que toma la muestra. 4) El instrumento puede ser usado para la determinación de la transmitancia global de la radiación solar de superficies transparentes.

## DESVENTAJAS

1) Solo permite obtener valores relativos de la absorbancia. 2) Las evaluaciones están restringidas a películas delgadas que puedan depositarse sobre un sustrato metálico. 3) En un mismo sustrato deben depositarse ambas películas, la patrón y la muestra a determinar. 4) El instrumento solo es operable cuando se dispone de radiación solar plena, a medio día y en ausencia de viento. 5) Requiere el seguimiento de la trayectoria del sol.

## 12. RECONOCIMIENTOS

Al Dr Manfred Horn de la Universidad Nacional de Lima (Peru) que nos facilitó bibliografía sobre el tema.

## 13. BIBLIOGRAFIA

[1] DEPOSITOS ELECTROLITICOS DE NIQUEL Y CROMO NEGRO.

A. Fasulo , D. Perelló y R. Becerra

Actas de la 7ma. Reunion de Trabajo de ASADES.

[2] SUPERFICIES SELECTIVAS DE CROMO NEGRO

A. Fasulo y D. Perelló. XII Reunion de Trabajo de ASADES

[3] PORTABLE INSTRUMENTATIONS FOR SOLAR ABSORPTANCE AND EMITANCE MEASUREMENTS.

R. B. Pettit and I. T. Steinberger

Comunicación personal - Sandia National Laboratories (USA).

[4] AN INSTRUMENT FOR MEASURING ABSORPTIVITIES FOR SOLAR RADIATIONS

H. Tabor and I. T. Steinberger

Journal of Scientific Instruments. Vol. 33 , 1956

[5] INVESTIGATIONS IN ABSOLUTE RADIOMETRY.

J. Guild. Proceeding Royal Society. A-161 , 1937