

ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CAVIDAD ABSORBEDORA

RECEPTORA DE UN COLECTOR CILINDRICO PARABOLICO

Jorge Alberto Follari, Gregorio Constanza y Víctor Ronchietto
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas y Naturales
Universidad Nacional de San Luis

RESUMEN:

Se presenta el estudio de la distribución de energía radiante primaria punto a punto dentro de una cavidad absorbadora cilíndrica, en la que inciden los rayos solares provenientes de una parábola del mismo tipo. La cavidad receptora consta de una doble pared dentro de la cual circula el fluido a calentar, adoptando un perfil similar a una media luna. El análisis tiene en cuenta el ancho solar, y la sombra de la propia cavidad receptora entre otros aspectos. Se realiza un balance energético de la misma y se analiza su funcionamiento teórico con caudal prefijado y temperaturas de salida entre 100 °C y 140 °C (está diseñado para sistemas de bajas temperaturas, de uso en refrigeración, calefacción o aplicaciones industriales). Se compara su eficiencia con otros sistemas conocidos. (1)

ABSTRACT

In the present paper we obtain the distribution of the primary radiant energy on each point of the inner surface of a cylindrical absorbing cavity. The primary radiation comes from a "focusing concentrating parabola". The cavity is built up with a double wall, with a half-moon cross-section. The working fluid flows within the double wall. The analysis among other physical considerations, takes into account the solar angle and the shadow produced by the cavity and envelope on the parabolic reflecting surface, we study the energy balance and calculate the theoretical performance for preestablished fluid flow and output temperatures between 100 °C and 140 °C (since the cavity is designed for low temperature systems used for cooling, heating or other industrial applications).

Finally, we compare the performance of our system with that of other known systems (1).

- 1-"Performance analysis of a cylindrical parabolic focusing collector and comparison with experimental results", by Michael Edenburn - Sandia Laboratories - Albuquerque - New Mexico - July 1975.-

INDICE

Resumen

Abstract

Indice

Introducción

I) Descripción del sistema

II) Aspectos físicos tenidos en cuenta para el análisis

III) Obtención de la distribución de densidad de energía

IIIa) Obtención del arco $Ac(B)$

IIIb) Obtención de los límites de la integral

IIIc) Expresión final de la densidad de energía

IV) Balance energético del sistema

IVa) Términos del Balance energético

V) Análisis de los resultados y conclusiones.

Referencias

Apéndice I - Factores de vista

INTRODUCCION

A partir de la decisión de trabajar en concentradores de simetría cilíndricas por sus ventajas tecnológicas y económicas, este trabajo se fijó como meta el diseño y teoría de un receptor cilíndrico que es la parte de mayor interés físico del sistema.

Se optó por trabajar con cavidad absorbedora por sus ventajas ópticas y su mayor simplicidad constructiva.

La meta propuesta fue la de construir una cavidad que se asemeje lo mejor posible a un cuerpo negro. Para ello debe cumplir entonces las siguientes condiciones:

- Que la boca sea lo más pequeña posible.
- Que la superficie interna de la cavidad sea muy absorbente al visible y cercano infrarrojo, para mejorar su condición de cuerpo negro, y que a su vez, la parte externa del colector o cavidad tenga una baja emisividad a la temperatura de trabajo.
- Que la envoltura refleje la mayor cantidad de la radiación infrarroja que le llega de la cavidad.

Teniendo en cuenta estas condiciones se diseñó el sistema que se describe a continuación.

I - DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema consta de, (ver figura 1):

- 1) Una parábola cilíndrica o concentrador con una superficie reflectante la cual se supone que no deforma la imagen focal y con una reflectividad igual a 0,7.
- 2) Una envoltura de vidrio, plateada en la cara interior y

exterior (esta última con protección para intemperie), excepto una franja longitudinal por donde penetra la radiación que proviene de la parábola, constituyendo la ventana de la envoltura.

3) Una cavidad cilíndrica o absorbedor cuya boca coincide con el foco de la parábola, constituida por dos superficies unidas en la boca entre las cuales circula el fluido de trabajo. La cara interior está oxidada y posee una absorptividad muy próxima a 1, y la cara exterior se encuentra plateada. La cavidad y la envoltura de vidrio son concéntricas.

Nomenclatura y medidas del sistema

SIMBOLO	DESCRIPCION	MAGNITUD	UNIDADES
Parábola			
Xm	Abcisa máxima	0,50	m
Ym	Ordenada máxima	0,103	m
f	Distancia focal	0,607	m
Lc	Longitud del colector	1,0	m
Rp	Distancia genérica parábola-foco		
Absorvedor o colector			
Rc	Radio del colector	0,03	m
Re	Radio de la envoltura	0,035	m
Ra	Distancia del foco a un punto genérico sobre la superficie de la cavidad		
R	Distancia de O' a la superficie interna del colector	0,025	m
Ao	Distancia subtendida por un haz sobre la superficie interna de la cavidad.		
Aa	Ancho de la boca	0,015	m
PI	Número PI	3,1416	radianes
Gs	Constante solar(valor adoptado)	835.9	J/m ² seg.
$\alpha/2$	Mitad del ángulo subtendido por el sol	16	minutos
ρ_p	Reflectividad de la parábola	0.7	
ρ_w	Reflectividad de la ventana a la radiación solar	0.21	

SIMBOLO	DESCRIPCION	MAGNITUD UNIDADES
τ_{vn}	Trasmisividad de la ventana a la radiación solar	0.72
ρ_{vi}	Reflectividad de la ventana a la radiación infrarroja	0,1
ρ_{ei}	Reflectividad de la envoltura a la radiación infrarroja	0.9
ρ_{ci}	Reflectividad del colector (excepto la boca) a la radiación infrarroja	0.9
ρ_{eie}	Reflectividad de la envoltura a la radiación infrarroja en su superficie externa	0.8

Ao, Ac y Aa en el texto se denominan arcos.

El fluido utilizado es ethilen-glicol

II - ASPECTOS FISICOS TENIDOS EN CUENTA PARA EL ANALISIS

- 1) Amplitud del ángulo que subtiende el sol
Se consideran aquí los rayos solares tal como llegan del del sol, o sea no paralelos, formando un cono de un ángulo de 32 minutos. No se tiene en cuenta la inhomogeneidad de la temperatura del disco solar.
- 2) Sombra producida por el colector sobre la parábola.
En este caso particular en el cual se realizaron los cálculos, la sombra producida por el colector, (absorbedor y envoltura) no es despreciable, ya que subtiende un ángulo de aproximadamente 8 grados desde el foco O (cerca del 10% del área de concentración). Esta sombra es tenida en cuenta en el cálculo de la distribución de la densidad de energía dentro de la cavidad.
- 3) Magnitud variable de la energía colectada por la parábola en función del ángulo B.
Que la parábola no contribuye uniformemente en todos los puntos de su superficie se visualiza en la siguiente fórmula, que se obtendrá en el punto III

$$dQ(B) = p \cdot G_s \cdot L \cdot R_p(B) dB = p \cdot G_s \cdot L \cdot (2F / (1 + \cos B)) dB$$

expresión que disminuye al decrecer B. O sea, que la cantidad de energía colectada aumenta desde el centro al borde de la parábola.

- 4) Estudio de la trasmisividad de la ventana.

ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CAVIDAD ABSORBEDORA

RECEPTORA DE UN COLECTOR CILINDRICO PARABOLICO

Jorge Alberto Follari, Gregorio Constanza y Víctor Ronchietto
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas y Naturales
Universidad Nacional de San Luis

RESUMEN:

Se presenta el estudio de la distribución de energía radiante primaria punto a punto dentro de una cavidad absorbadora cilíndrica, en la que inciden los rayos solares provenientes de una parábola del mismo tipo. La cavidad receptora consta de una doble pared dentro de la cual circula el fluido a calentar, adoptando un perfil similar a una media luna. El análisis tiene en cuenta el ancho solar, y la sombra de la propia cavidad receptora entre otros aspectos. Se realiza un balance energético de la misma y se analiza su funcionamiento teórico con caudal prefijado y temperaturas de salida entre 100 °C y 140 °C (está diseñado para sistemas de bajas temperaturas, de uso en refrigeración, calefacción o aplicaciones industriales). Se compara su eficiencia con otros sistemas conocidos. (1)

ABSTRACT

In the present paper we obtain the distribution of the primary radiant energy on each point of the inner surface of a cylindrical absorbing cavity. The primary radiation comes from a "focusing concentrating parabola". The cavity is built up with a double wall, with a half-moon cross-section. The working fluid flows within the double wall. The analysis among other physical considerations, takes into account the solar angle and the shadow produced by the cavity and envelope on the parabolic reflecting surface, we study the energy balance and calculate the theoretical performance for preestablished fluid flow and output temperatures between 100 °C and 140 °C (since the cavity is designed for low temperature systems used for cooling, heating or other industrial applications).

Finally, we compare the performance of our system with that of other known systems (1).

- 1-"Performance analysis of a cylindrical parabolic focusing collector and comparison with experimental results", by Michael Edenburn - Sandia Laboratories - Albuquerque - New Mexico - July 1975.-

INDICE

Resumen

Abstract

Indice

Introducción

I) Descripción del sistema

II) Aspectos físicos tenidos en cuenta para el análisis

III) Obtención de la distribución de densidad de energía

IIIa) Obtención del arco $Ac(B)$

IIIb) Obtención de los límites de la integral

IIIc) Expresión final de la densidad de energía

IV) Balance energético del sistema

IVa) Términos del Balance energético

V) Análisis de los resultados y conclusiones.

Referencias

Apéndice I - Factores de vista

INTRODUCCION

A partir de la decisión de trabajar en concentradores de simetría cilíndricas por sus ventajas tecnológicas y económicas, este trabajo se fijó como meta el diseño y teoría de un receptor cilíndrico que es la parte de mayor interés físico del sistema.

Se optó por trabajar con cavidad absorbedora por sus ventajas ópticas y su mayor simplicidad constructiva.

La meta propuesta fue la de construir una cavidad que se asemeje lo mejor posible a un cuerpo negro. Para ello debe cumplir entonces las siguientes condiciones:

- Que la boca sea lo más pequeña posible.
- Que la superficie interna de la cavidad sea muy absorbente al visible y cercano infrarrojo, para mejorar su condición de cuerpo negro, y que a su vez, la parte externa del colector o cavidad tenga una baja emisividad a la temperatura de trabajo.
- Que la envoltura refleje la mayor cantidad de la radiación infrarroja que le llega de la cavidad.

Teniendo en cuenta estas condiciones se diseñó el sistema que se describe a continuación.

I - DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema consta de, (ver figura 1):

- 1) Una parábola cilíndrica o concentrador con una superficie reflectante la cual se supone que no deforma la imagen focal y con una reflectividad igual a 0,7.
- 2) Una envoltura de vidrio, plateada en la cara interior y

exterior (esta última con protección para intemperie), excepto una franja longitudinal por donde penetra la radiación que proviene de la parábola, constituyendo la ventana de la envoltura.

3) Una cavidad cilíndrica o absorbedor cuya boca coincide con el foco de la parábola, constituida por dos superficies unidas en la boca entre las cuales circula el fluido de trabajo. La cara interior está oxidada y posee una absorptividad muy próxima a 1, y la cara exterior se encuentra plateada. La cavidad y la envoltura de vidrio son concéntricas.

Nomenclatura y medidas del sistema

SIMBOLO	DESCRIPCION	MAGNITUD	UNIDADES
Parábola			
Xm	Abcisa máxima	0,50	m
Ym	Ordenada máxima	0,103	m
f	Distancia focal	0,607	m
Lc	Longitud del colector	1,0	m
Rp	Distancia genérica parábola-foco		
Absorvedor o colector			
Rc	Radio del colector	0,03	m
Re	Radio de la envoltura	0,035	m
Ra	Distancia del foco a un punto genérico sobre la superficie de la cavidad		
R	Distancia de O' a la superficie interna del colector	0,025	m
Ao	Distancia subtendida por un haz sobre la superficie interna de la cavidad.		
Aa	Ancho de la boca	0,015	m
PI	Número PI	3,1416	radianes
Gs	Constante solar(valor adoptado)	835.9	J/m ² seg.
$\alpha/2$	Mitad del ángulo subtendido por el sol	16	minutos
ρ_p	Reflectividad de la parábola	0.7	
ρ_w	Reflectividad de la ventana a la radiación solar	0.21	

SIMBOLO	DESCRIPCION	MAGNITUD UNIDADES
τ_{vn}	Trasmisividad de la ventana a la radiación solar	0.72
ρ_{vi}	Reflectividad de la ventana a la radiación infrarroja	0,1
ρ_{ei}	Reflectividad de la envoltura a la radiación infrarroja	0.9
ρ_{ci}	Reflectividad del colector (excepto la boca) a la radiación infrarroja	0.9
ρ_{eie}	Reflectividad de la envoltura a la radiación infrarroja en su superficie externa	0.8

A_o , A_c y A_a en el texto se denominan arcos.

El fluido utilizado es ethilen-glicol

II - ASPECTOS FISICOS TENIDOS EN CUENTA PARA EL ANALISIS

- 1) Amplitud del ángulo que subtiende el sol
Se consideran aquí los rayos solares tal como llegan del del sol, o sea no paralelos, formando un cono de un ángulo de 32 minutos. No se tiene en cuenta la inhomogeneidad de la temperatura del disco solar.
- 2) Sombra producida por el colector sobre la parábola.
En este caso particular en el cual se realizaron los cálculos, la sombra producida por el colector, (absorbedor y envoltura) no es despreciable, ya que subtiende un ángulo de aproximadamente 8 grados desde el foco O (cerca del 10% del área de concentración). Esta sombra es tenida en cuenta en el cálculo de la distribución de la densidad de energía dentro de la cavidad.
- 3) Magnitud variable de la energía colectada por la parábola en función del ángulo B.
Que la parábola no contribuye uniformemente en todos los puntos de su superficie se visualiza en la siguiente fórmula, que se obtendrá en el punto III

$$dQ(B) = \rho \cdot G_s \cdot L \cdot R_p(B) dB = \rho \cdot G_s \cdot L \cdot (2F / (1 + \cos B)) dB$$

expresión que disminuye al decrecer B. O sea, que la cantidad de energía colectada aumenta desde el centro al borde de la parábola.

- 4) Estudio de la trasmisividad de la ventana.

Se hizo el estudio experimental de la trasmisividad, a fin de basarse en datos reales, con un espectrógrafo de transmisión sobre una muestra de vidrio pirex y para distintos ángulos de incidencia se obtuvo la trasmisividad media en función de B. Ella toma valores máximos para 50° ($T=0,83$) y valor mínimo en 45° ($T=0,59$), con una media de 0,72, o sea que decrece monótona y suavemente en función de B.

- 5) Se considera que en un corte del colector y envoltura de una longitud D, tienen temperaturas respectivas uniformes para todos los ángulos B.
- 6) A los efectos del balance radiativo se consideran los cuerpos como grises y difusos. Esta suposición conserva su validez para superficies reflectantes especulares debido a la simetría del sistema.
- 7) Para el cálculo de los factores de vista se aplica el teorema de la línea mínima. Sus hipótesis son válidas ya que las superficies anterior y posterior entre colector y envoltura del segmento considerado, tienen un aporte radiativo prácticamente nulo.
- 8) Las condiciones ambientales como temperatura, viento, radiación e inclinación del colector (que dependen de la época y día particular), así como también la temperatura inicial del fluido y su régimen (variables en general) se les asigna valores particulares a los fines del cálculo.
- 9) No se efectúa vacío en torno al colector, debido a que se trabaja dentro de un número de Gr Pr menor o igual que 10^6 . Por ello la convección es despreciable y no tiene sentido por lo tanto efectuar vacíos moderados. Para vacíos altos se encuentran dificultades de tipo técnico.

III - OBTENCION DE LA DISTRIBUCION DE DENSIDAD DE ENERGIA

La cantidad de energía solar $dQ(B)$ que incide por segundo en cada punto P' del paraboloide cilíndrico, (ver fig 2), va a distribuirse sobre el área $A_0(B) \cdot L$, donde $A_0(B)$ es el arco que subtende el haz de radiación sobre la superficie interna del absorvedor y L es la longitud normal al corte del sistema.

Por otro lado si G_s (constante solar) es la densidad de radiación solar que incide por unidad de área normal a los rayos del sol, dl es el diferencial de parábola y $dl \cdot \cos$

En realidad es una línea que de aquí en más se llamará punto, ya que por simetría se analiza un perfil del sistema.

$(B/2) \cdot L$ es el área infinitesimal (punto P') normal a la radiación solar; entonces, la cantidad de energía $dQ(B)$ que se refleja en el área $L \cdot dl$ de la parábola y va a distribuirse sobre un área $A_o(B) \cdot L$ de la cavidad absorbidora es:

$$dQ(B) = \rho \cdot G_s \cdot L \cdot \cos(B/2) \cdot dP = \rho \cdot G_s \cdot L \cdot R_p(B) \cdot dB \quad (1)$$

donde, $R_p(B) = 2 \cdot f / (1 + \cos B)$, es la distancia OP' de la figura 2.

Para obtener la densidad de energía sobre "punto genérico" P del absorbedor, proviene de "un punto genérico" P' del concentrador, se divide $dQ(B)$ por el área $A_o(B) \cdot L$, es decir, por definición de densidad de energía es:

$$dE(B) = dQ(B) / A_o(B) \cdot L \quad (2)$$

y reemplazado (1) en (2),

$$dE(B) = G_s \cdot \rho \cdot [R_p(B) / A_o(B)] \cdot dB \quad (3)$$

Obsérvese en la fig. 3 que sobre el punto P del absorbedor, debido a que hay un solapamiento de los haces, no solamente contribuye energéticamente el punto P' del concentrador, sino un conjunto de puntos a la derecha e izquierda de P' que se superponen y por lo tanto deben sumarse (integrarse) todos ellos. En otras palabras debe integrarse para todos los puntos comprendidos entre PO' y $p1'$ (ver fig.3) o lo que es equivalente entre BO y $B1$.

Es evidente que todos los otros puntos que están fuera del intervalo (PO' ; $p1'$) no contribuyen energéticamente en P .

Luego la densidad de energía en un punto genérico P sobre la superficie interna del absorbedor es:

$$E(B) = \int_{BO}^{B1} \frac{dQ(B)}{A_o(B) \cdot L} = G_s \cdot \rho \int_{BO}^{B1} \frac{2f}{(1 + \cos B) \cdot A_o(B)} \cdot dB \quad (4)$$

Para hallar la expresión analítica completa de $E(B)$ es necesario obtener previamente las expresiones analíticas de $A_o(B)$, BO y $B1$ cosa que se hará en los puntos siguientes.

IIIa) OBTENCION DEL ARCO $A_c(B)$

A los efectos de obtener $A_c(B)$ en función solamente de B , realizamos el siguiente análisis.

Por geometría elemental (ver fig. 4), se cumplen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} D1 &= M1 - 2B \\ D2 &= -(M2 - 2B) \end{aligned} \quad (5)$$

donde:

$$\begin{aligned} M1 &= P1 - Z1 \\ M2 &= P1 - Z2 \end{aligned} \quad (6)$$

y,

$$\begin{aligned} Z1 &= P1 - Z1' - Z1'' \\ Z2 &= P1 - Z2' - Z2'' \end{aligned} \quad (7)$$

a su vez,

$$\begin{aligned} Z1' &= B + (a/2) \\ Z2' &= B - (a/2) \end{aligned} \quad (8)$$

Por otro lado aplicando el teorema del seno en los tri (P1, O', P4) y tri (P3, O', P0) se tiene:

$$\frac{r + d0}{\sin(Z1'')} = \frac{r}{\sin(Z1')} \quad ; \quad \frac{d2}{\sin(Z2'')} = \frac{r}{\sin(Z2')} \quad (9)$$

donde d0 y d2 se hallan aplicando el teorema del seno a los tri (P3, O, P') y tri (O, P4, P')

$$\begin{aligned} \frac{d0}{\sin(a/2)} &= \frac{R_p}{\sin(P1 - Z1')} = \frac{R_p}{\sin(Z1')} \\ \frac{d1}{\sin(a/2)} &= \frac{R_p}{\sin(Z2')} \end{aligned} \quad (10)$$

$$d2 = r - d1 = r - \frac{R_p}{\sin(Z2')}$$

despejando de (10) d0 y d2, reemplazándolo en (9) y despejando de ésta Z1'' y Z2'', y usando (8) y (7), obtenemos reemplazando en (6) las expresiones:

$$M1 = B + (a/2) + \arccos \left[\sin(B + a/2) + \frac{2r \sin(a/2)}{r(1 + \cos B)} \right] \quad (11)$$

$$M2 = B - (\alpha/2) + \arcsin \left[\sin(B - \alpha/2) - \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right]$$

que reemplazándolas en las (5) se tiene:

$$D1 = -B + (\alpha/2) + \arcsin \left[\sin[B + (\alpha/2)] + \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] \quad (12)$$

$$D2 = B + (\alpha/2) - \arcsin \left[\sin[B - (\alpha/2)] - \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right]$$

Conociendo D1 y D2 los semiarcos A1 y A2 se pueden poner, previa transformación de los ángulos a radianes, como:

$$A1 = r D1 \quad 0,017453 \quad (13)$$

$$A2 = r D2 \quad 0,017453$$

y por lo tanto:

$$A_c(B) = r \cdot 0,017453 (D1 + D2) \quad (14)$$

reemplazando (12) en (14) :

$$A_c(B) = r \cdot 0,017453 \left\{ \alpha + \arcsin \left[\sin(B + \alpha/2) + \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] - \arcsin \left[\sin(B - \alpha/2) - \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] \right\} \quad (15)$$

III-b) OBTENCION DE LOS LIMITES DE LA INTEGRAL

Sea Po el punto sobre el absorvedor donde se desea calcular la densidad de energía y sea Bo el ángulo que forma la recta Po O con el eje y (ver Fig. 3). Se desea saber ¿cuáles son los ángulos B0 y B1 que deben formar el eje del haz que parte de PO' y Pl' respectivamente con el eje y, tal que el borde izquierdo del haz que parte de PO' y el borde derecho del haz que parte de Pl' coincidan con Po?. Evidentemente ésta es la condición que deben cumplir los haces límites para poder contribuir energéticamente al punto Po. La condición geométrica equivalente es:

$$M1 = M2 = 2 B_0 \quad (16)$$

Con estas condiciones no tenemos más que obtener una expresión analítica, (en función de B), de M1 y M2, y de éstas despejar B, obteniendo así B0 de M1(B) = 2B0 y B1 de M2(B) = 2 B0.

Los ángulos M1(B) y M2(B) ya se obtuvieron al deducir Ac(B) ecuación (11), luego:

$$2B_0 = B - (\alpha/2) + \arccos \left[\sin(B - \alpha/2) - \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] \quad (17)$$

y,

$$2B_0 = B + (\alpha/2) + \arccos \left[\sin(B + \alpha/2) + \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] \quad (18)$$

Despejar B de (17) y (18) para obtener B0 y B1 respectivamente conduce a ecuaciones de cuarto grado cuya solución es en extremo engorroso, por ello para los cálculos concretos se utilizan (17) y (18) con las cuales por medio de una subrutina de mínimos, se hallan las raíces numéricamente.

III-c) EXPRESION FINAL DE LA DENSIDAD DE ENERGIA

Reemplazando en Ao(B) y B0 y B1 de los puntos anteriores en la expresión de E(B) se tiene:

$$E(B_0) = \frac{G_s \cdot P}{r \cdot CS} \int_{B_0}^{B_1} \frac{2f}{(1 + \cos B)} \times \left\{ \frac{1}{\left[a + \arccos \left[\sin(B + \alpha/2) + \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] - \left[\arccos \left[\sin(B - \alpha/2) - \frac{2f \sin(\alpha/2)}{r(1 + \cos B)} \right] \right] \right\} \quad (19)$$

Utilizando un método numérico de cálculo para la resolución de la integral se obtienen los resultados que se observan en la gráfica 1. (figura 5).

La forma de la curva es suave, o sea que la densidad de energía en la zona de incidencia directa es a grandes rasgos homogénea. Como la transmisividad disminuye cuando B crece, la densidad de energía resultante que incide realmente en el interior de la cavidad decrece suavemente con el ángulo B entre un valor máximo de 8,4 para 7,5° y 7,3 para 40°. Es de esperar entonces que para bajas temperaturas no se produzcan puntos calientes, ya que la densidad de energía incidentes es prácticamente constante.

IV - BALANCE ENERGETICO DEL SISTEMA

Se obtuvo la distribución de energía solar concentrada incidente en la superficie interior de la cavidad y se vió que la densidad de radiación en la zona de incidencia directa oscila alrededor del valor 7,8 Gs., con máxima de 8,4 Gs.. Si se trabaja con temperaturas bajas ($\Delta T = 100^\circ C$) se puede suponer que la diferencia de densidad de energía incidente no provoca un elevamiento de la temperatura local, apreciable. Siendo así se puede suponer uniforme la temperatura de un corte delgado del sistema, y realizar entonces el balance.

Se comienza analizando la radiación solar, siempre por unidad de longitud del colector.

IV.a) - TERMINOS DEL BALANCE ENERGETICO

Los términos que consideran la radiación solar son:

1) Potencia solar que entra en el colector:

Si $X_i = X_m - X_s$ es el semiancho iluminado de la parábola, ρ su reflectividad y σ_{vn} es la transmisividad de la ventana, entonces:

$$\Phi_1 = 2 \cdot X_i \cdot G_s \cdot \rho \cdot \sigma_{vn} \quad (20)$$

es la potencia solar que entra en el colector

2) Potencia solar que absorbe la ventana de la envoltura:

Este término del balance es:

$$\Phi_2 = 2 \cdot X_i \cdot G_s \cdot \rho (1 - \sigma_{vn} - \rho_{vv}) \quad (21)$$

donde ρ_{vv} es la reflectividad de la ventana a la radiación solar.

Los términos que consideran la radiación infrarroja son:

3) Potencia de radiación infrarroja que intercambia la boca del colector con la envoltura:

Como las superficies del sistema son grises, radian difusamente y la temperatura en cada Δx puede considerarse constante, entonces (ver ref. 2):

$$\Phi_3 = \sigma \cdot A_b \cdot \epsilon \left[T_e^4 - \frac{1}{D} \sum_{i=1}^m D_{ji} T_i^4 \right] \quad j=3 \quad (22)$$

siendo T_c la temperatura del colector y los elementos de los determinantes D y D_{ij} son función de los factores de vista obtenidos en el apéndice I.

- 4) Potencia de intercambio de radiación infrarroja entre la cara externa del colector y la envoltura

Igualmente que el caso anterior, se tiene:

$$\Phi_4 = \sigma \cdot l \cdot \epsilon \left[T_c^4 - \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n D_{ji} T_i^4 \right] \quad j=4 \quad (23)$$

donde l es el perímetro de la parte exterior del colector sin considerar la boca.

- 5) Potencia perdida por la envoltura radiativamente al exterior:

Este último término se reduce a:

$$\Phi_5 = \epsilon \cdot \pi I \cdot 2R_e \cdot \sigma \left[T_E^4 - T_{EXT}^4 \right] \quad (24)$$

ϵ es la emisividad equivalente (promedio pesado)

Los términos que consideran la conducción y convección son:

- 6) Potencia transferida por conducción y convección del colector a la envoltura:

En este caso:

$$\Phi_6 = h_{CE} \cdot \pi I \cdot 2R_c \left[T_c - T_E \right] \quad (25)$$

donde: $h_{CE} = \left(2 \cdot \pi I \cdot K_e \right) / \left(\pi I \cdot 2 \cdot R_c \ln \left(R_e / R_c \right) \right)$

es el coeficiente de transferencia convectiva y $K_e = K$ es la conductividad del aire. Dado que la distancia entre colector y envoltura es pequeña y la diferencia de temperatura no es alta, la viscosidad del aire impide la convección y por ello el coeficiente de transferencia convectiva y conductiva, K_e , es igual a K .

- 7) Potencia transferida del colector al fluido (convección)

Tenemos que:

$$\Phi_7 = h_{CF} \cdot (\text{perímetro por contacto}) \cdot (T_c - \bar{T}_f) \quad (26)$$

donde Φ_7 es la potencia transferida por el colector al fluido, vale decir la potencia útil, el perímetro de contacto es en este diseño 0,31 m., y el diámetro equivalente $d_{eq} = (4 \cdot \text{área de circulación}) / (\text{perí. de contacto})$. Por otro lado h_c es el coeficiente de transferencia convectiva. Debido a que el número de Reynolds es aproximadamente igual a 100, el régimen es por mucho, laminar. Para este caso:

$$h_{cf} = 1,86 \cdot \frac{k'}{d_{eq}} \left[Re \cdot Pr \cdot d_{eq} \right]^{0,33} \quad (\text{ref. 1}) \quad (27)$$

siendo k' la conductividad del glicol y $Re = \frac{4 \cdot \dot{m} \cdot \text{densidad}}{\pi \cdot d_{eq} \cdot \mu}$ es el número de Reynolds, \dot{m} el volumen por unidad de tiempo, "dens" la densidad del fluido y μ la viscosidad. El número de Prandtl, $Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$ con C_p calor específico (por Kg.)

Para calcular este término, recordemos que:

$$\dot{m} (\text{dens}) C_p [T_0 - T_x] = \bar{h}_{cf} \cdot (\text{perímetro de contacto}) \Delta x (T_c - \bar{T}_f) \quad (28)$$

es el balance energético para un segmento de longitud $\Delta x = D$ $\Delta x = D$, donde T_0 es la temperatura inicial en el mismo y T_f es la temperatura media del fluido. O sea que vale la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{dT}{dx} = A [T_c - T_f] \quad \text{donde } A = \frac{\bar{h}_{cf} \cdot x (\text{perímetro de contacto})}{\dot{m} (\text{dens.}) C_p}$$

cuya solución para cada intervalo Δx es

$$T_0 = T_x e^{-A \Delta x} + T_c (1 - e^{-A \Delta x}) ; \quad \bar{T}_f = T_c + \frac{(T_0 - T_c) \cdot (1 - e^{-A \Delta x})}{A \Delta x}$$

es evidente que la solución será más exacta cuando Δx tienda a 0. Por ello se subdivide el colector en pequeños segmentos y se obtiene la solución para cada uno de ellos hasta obtener la solución final en forma iterativa.

8) Potencia transferida por la envoltura al exterior por convección:

Por último $\Phi_8 = h_{ext} \pi r_c [T_c - T_{ext}]$

donde $h_{E\text{ ext}}$ es el coeficiente de transferencia convectiva y vale

$$h_{E\text{ ext}} = 1,41 \left[(T_E - T_{\text{ext}}) / (L_E \sin \beta + 2 h_{E\text{ ext}}) \right]^{0,25} \quad (\text{ref. 1})$$

siendo L_E la longitud de la envoltura, que vale 1,2 m. y β es el ángulo de inclinación del receptor con la horizontal.

Definidos ya los términos del balance (despreciando el efecto de los extremos), éste queda formulado así:

Balance del colector

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_4 - \Phi_5 = 0$$

Balance de la envoltura

$$\Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 - \Phi_6 - \Phi_7 = 0$$

Resolviendo estas dos ecuaciones de cuarto grado simultáneas, se obtienen las temperaturas T_f , T_c , T_e y la eficiencia $W = \frac{\text{m (dens.) } C_p (T_o - T_{\text{in}})}{6s}$

Ver páginas siguientes

V - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como el método de cálculo es iterativo, la precisión depende del número de ellas. Para 1.000 iteraciones, la eficiencia calculada es 42,5 %. Para 100 iteraciones da 39,5 %. Podemos estimar luego, teniendo a la vista los valores obtenidos para 11 intervalos tomados cada 10 cms., que la eficiencia está próxima al 44%. Se observa que las pérdidas radiativas del colector a la envoltura no alcanzan al 0,5%, lo que nos dice en este sentido el sistema se comporta muy bien. Las pérdidas convectivas del colector a la envoltura son de alrededor del 2% en valor medio y crecen proporcionalmente a la diferencia de temperatura entre colector y envoltura. Este aspecto podría mejorarse parcialmente. Las pérdidas radiativas de la envoltura son del orden del 1,7%, crecen suavemente y no pueden reducirse. Las pérdidas convectivas de la envoltura crecen rápidamente y llegan hasta valores del 7,8% con una media aproximada del 4,5%. Este aspecto puede mejorarse parcialmente como proponen Treadwell y otros (ref.3), con una aislación de la envoltura en su parte superior. Es de notar que la energía solar que llega a la parábola se distribuye de la siguiente manera. De cada 100 watts que inciden en 1 m², 7 inciden directamente sobre la envoltura, que proyecta su sombra sobre la parábola. A ésta llegan enton-

ces 93 y refleja hacia la envoltura 65,1. Esta es la energía disponible en el receptor y se distribuye así: 13,67 son reflejados por la envoltura y 4,5 son absorbidos por ella. Al colector llegan 46,87 W., de los cuales 44 son transferidos al fluido y constituyen la energía útil. El resto (2,8) se pierde por convección, conducción y radiación. Esto muestra a las claras el funcionamiento del sistema. Pueden no obstante disminuirse la pérdida por reflexión de la ventana de la envoltura, haciendo incidirlas en forma perpendicular (aproximadamente) a la misma y colocando un vidrio de mayor transmisividad. Es de notar que si se suprime la envoltura en las condiciones de trabajo dadas, la eficiencia aumenta a más del 50%. Esto es así porque se supuso velocidad del viento 0. Cuando éste empieza a jugar la eficiencia decae y se veía evidente la ventaja de una envoltura adecuada. Para el caso de aplicar este receptor a parábolas de Winston, los resultados del análisis pueden extenderse teniendo en cuenta los siguientes aspectos.

a) Que dada la baja concentración de estas parábolas y su temperatura resultante, aunque la distribución de la densidad de energía dentro de la cavidad es diferente, los picos de radiación no sobrepasan los supuestos en el presente estudio.

Por ello son de aplicación las mismas hipótesis.

b) Que en este caso la reflexión puede ser en primera superficie (ya que las parábolas están dentro de una caja hermética) y por lo tanto su reflectividad es del orden del 0,9.

c) Que la cubierta del vidrio refleja y absorbe parte de la radiación incidente y debería calcularse la integral de la transmisividad a lo largo de las horas del funcionamiento del sistema, para saber cuanta energía llega a las parábolas.

d) Que el receptor puede aislarse, salvo en la boca.

e) Que no hay viento dentro de la caja (solo la convección natural).

En este caso aparece como recomendable no usar envoltura, y suponiendo una transmisividad promedio del 85%, pueda esperarse una eficiencia entre el 60% y 68% aproximadamente para temperaturas de salida de hasta 120°C.

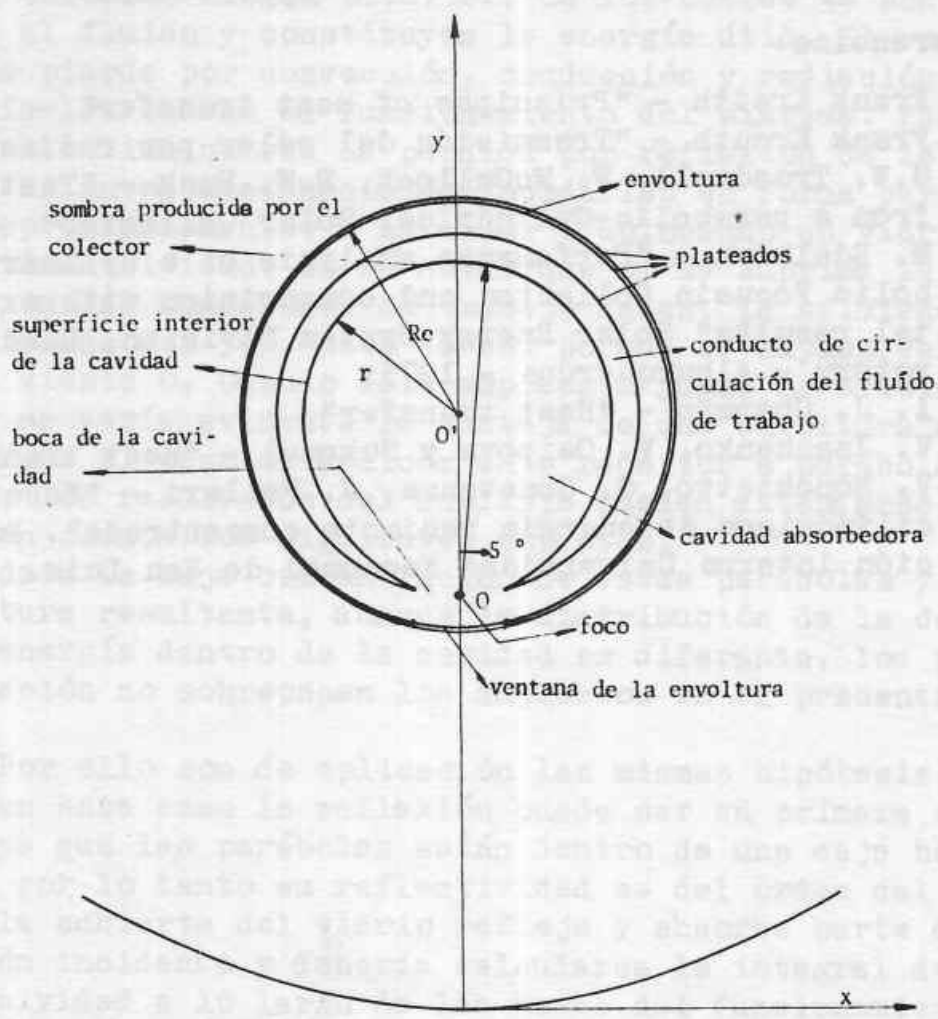
Volviendo al sistema diseñado y con las modificaciones propuestas para la envoltura, podría mejorarse la eficiencia en un 13%, o sea llevarla a un 57% que es un valor muy bueno.

Recordemos que el análisis realizado es válido para bajas temperaturas, por lo que las conclusiones tienen esa limitación. Esto se tuvo en cuenta en la elección del caudal de trabajo.

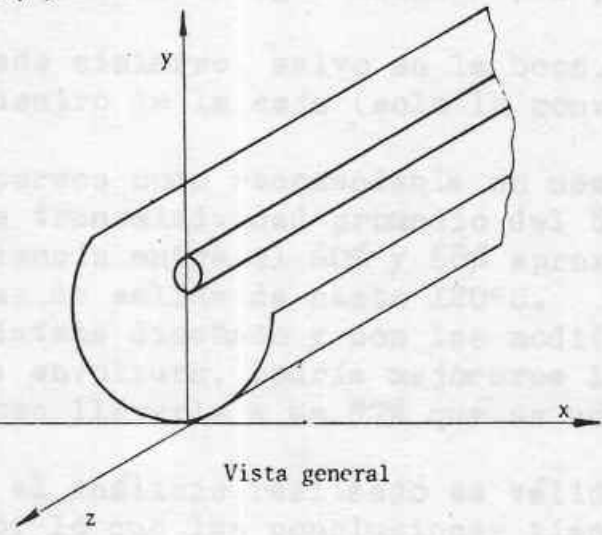
Concluimos finalmente el sistema de cavidad desarrollado, presenta un comportamiento similar a los sistemas con buenas superficies selectivas, y tienen la ventaja de su fácil construcción y su estabilidad en el tiempo.

Referencias:

- 1 - Frank Kreith - "Principes of heat transfer" - 1965
- 2 - Frank Kreuth - "Trasmisión del calor por radiación"
- 3 - G.W. Treadwell, W. McCulloch, R.W. Rusk - "Test results from a parabolic-Cylindrical Solar Collector" - 1975.
- 4 - M. Edelburn - "Perfomance analysis of a Cylindrical Parabolic Focusin Collector and comparision with ~~w~~xperimantal results" Solar Energy System Division, Dandia Laboratory - Alburquerque - 1975.
- 5 - A. J. Chapman - "Heat transfer"
- 6 - V. Isachenko, V. Osipova y Sukomel - "Heat transfer"
- 7 - V. Ronchietto, G. Constanza, J. Follari - "Receptores cilíndricos de energía radiante concentrada". Publicación interna Universidad Nacional de San Luis.



Vista (x y)



Vista general

Figura 1 - General

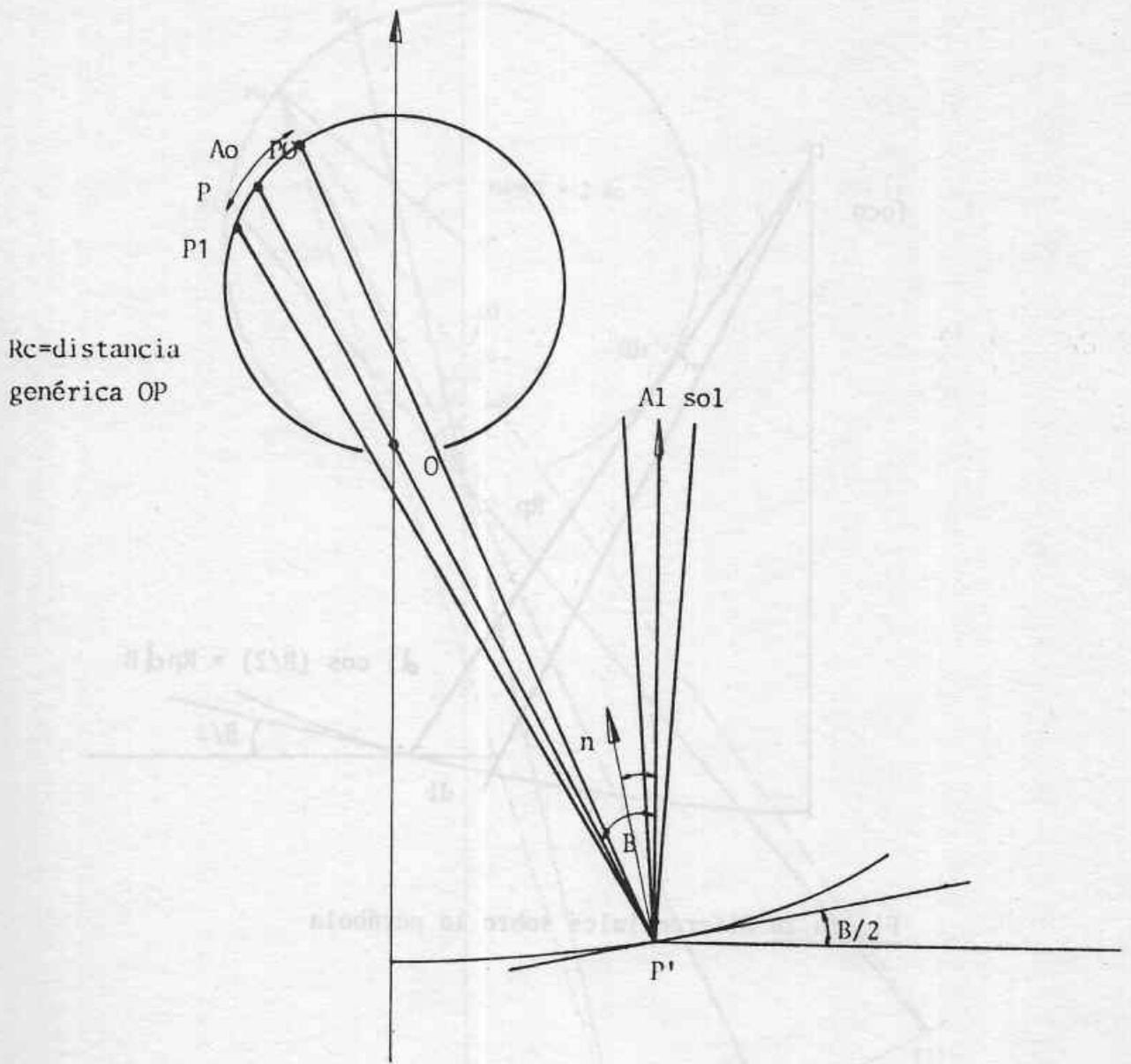


Figura 2a

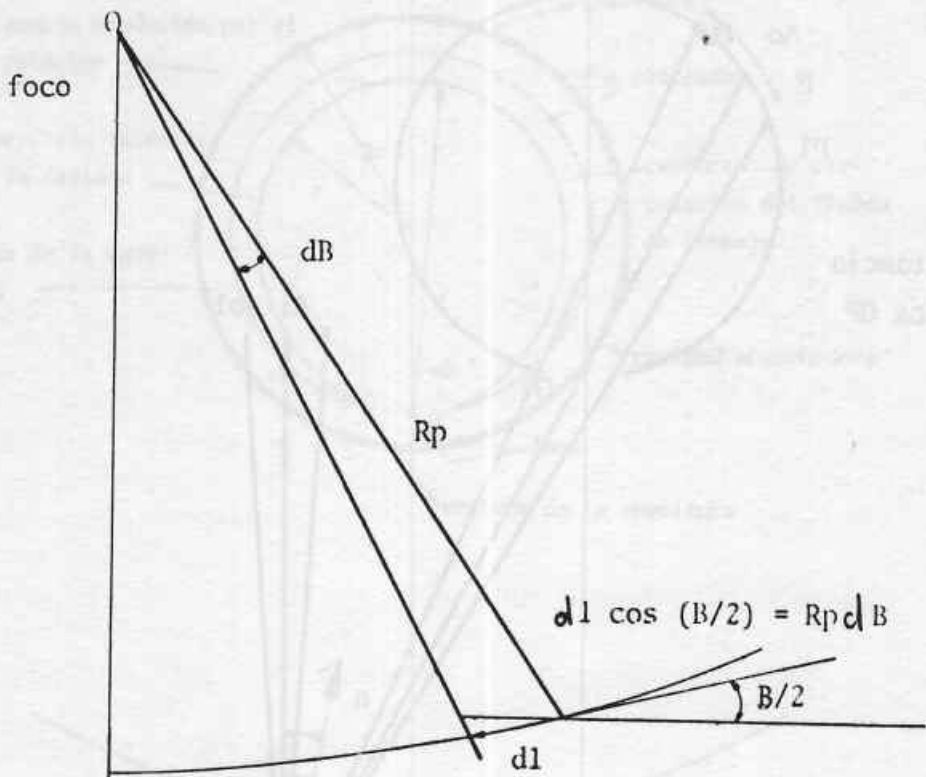


Figura 2b Diferenciales sobre la parábola

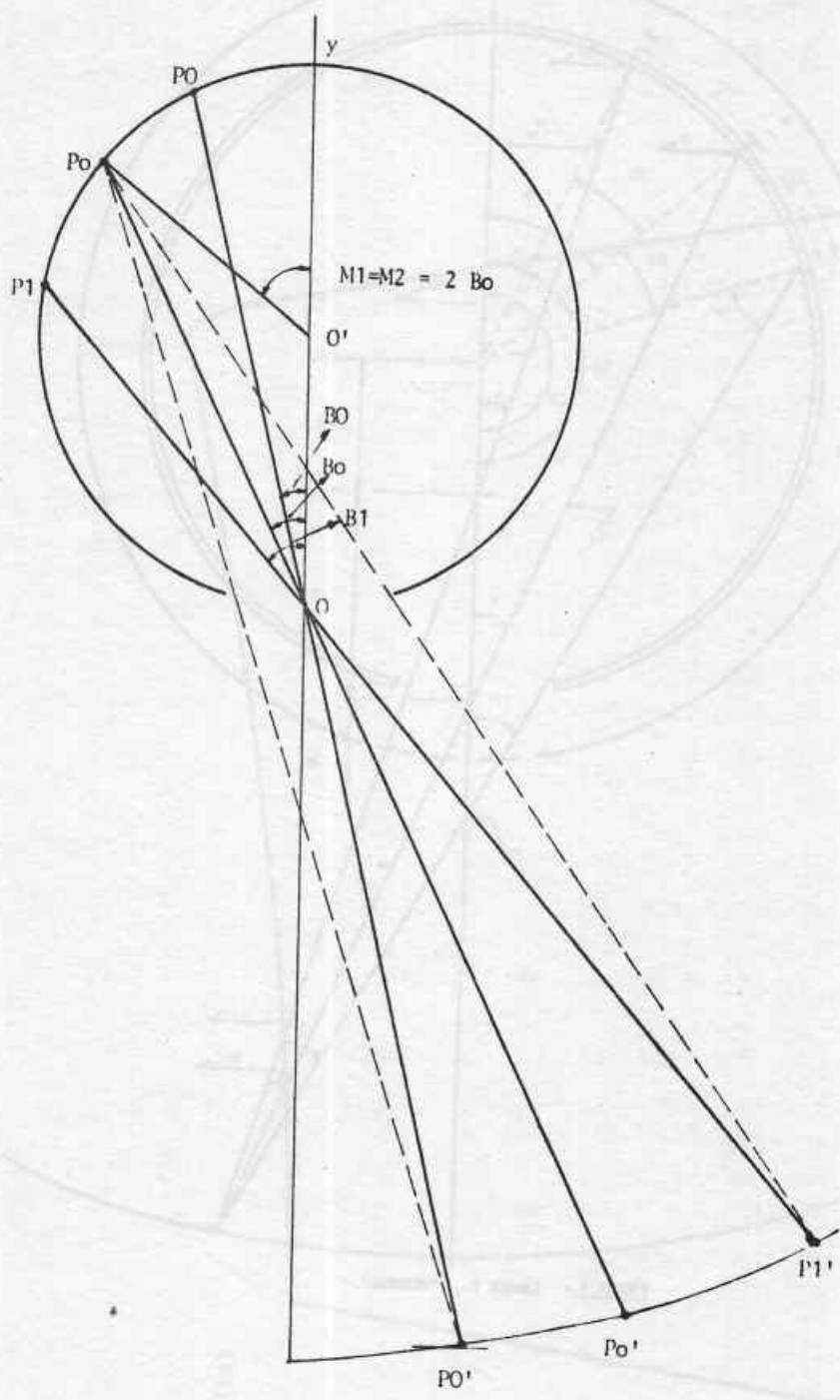


Figura 3 - Límites

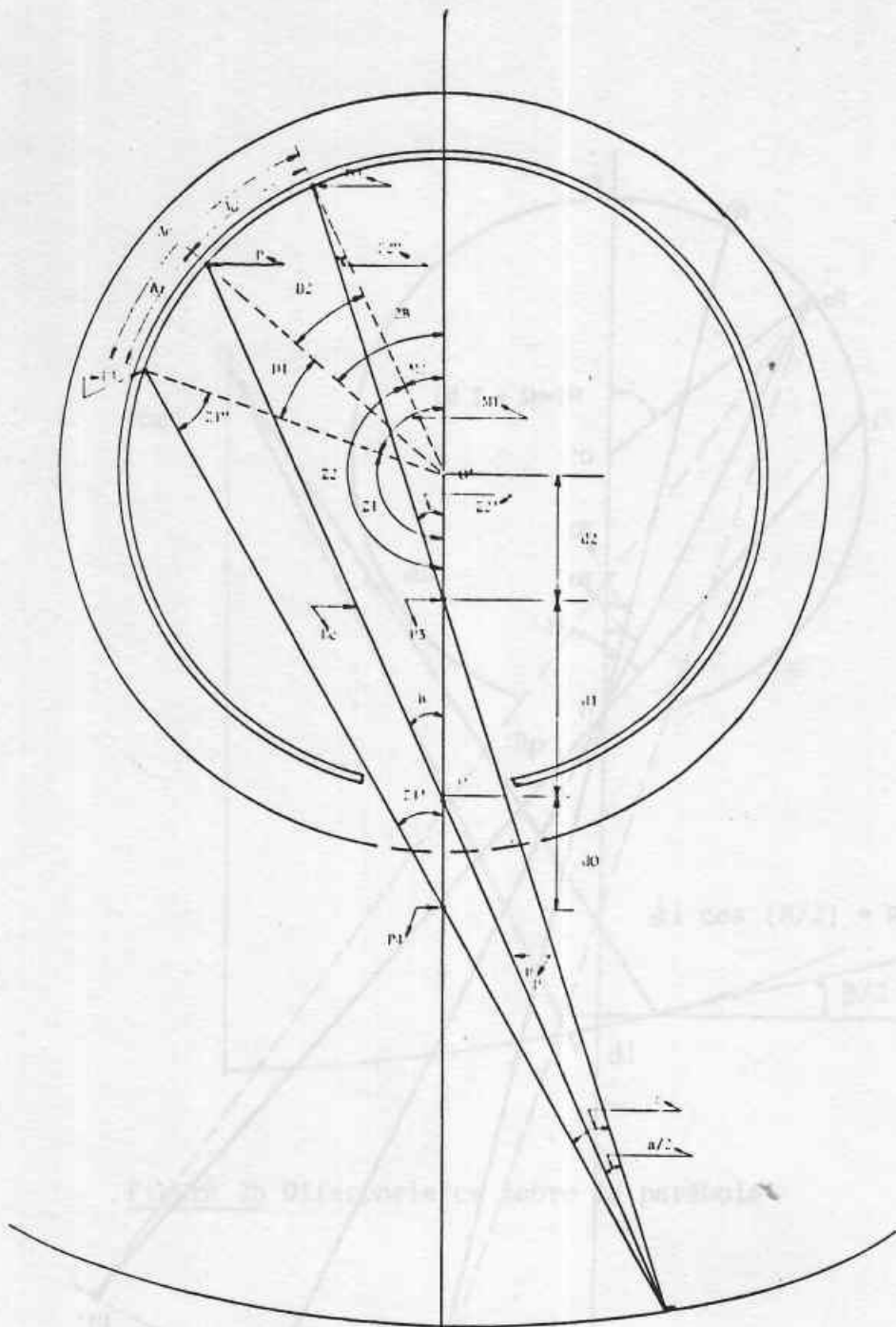
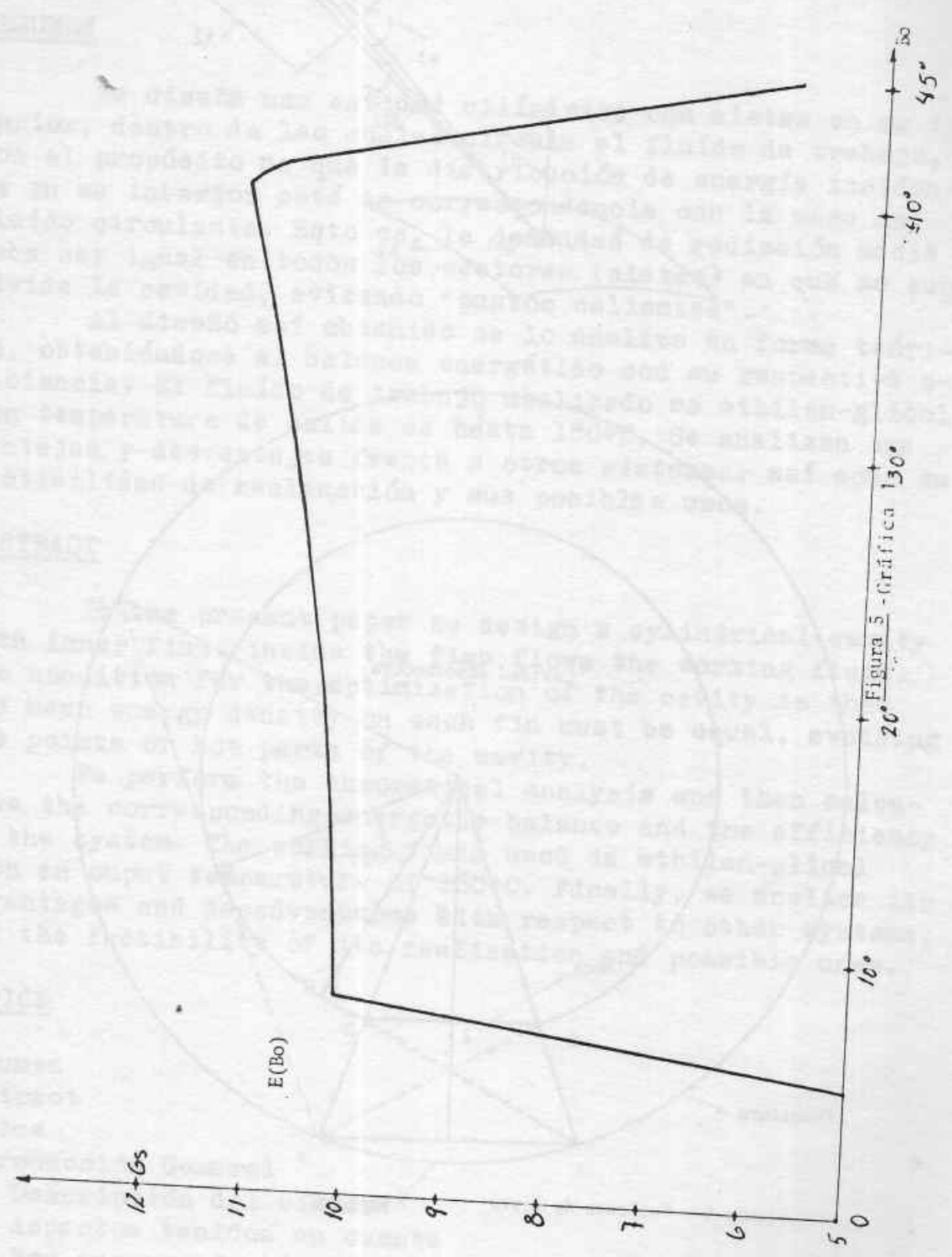


FIGURA 4 - LAMINA 1. - "GENERAL". -

Jorge Alberto Páez, Gregorio Jordán y Víctor...
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Instituto de Física y Matemáticas



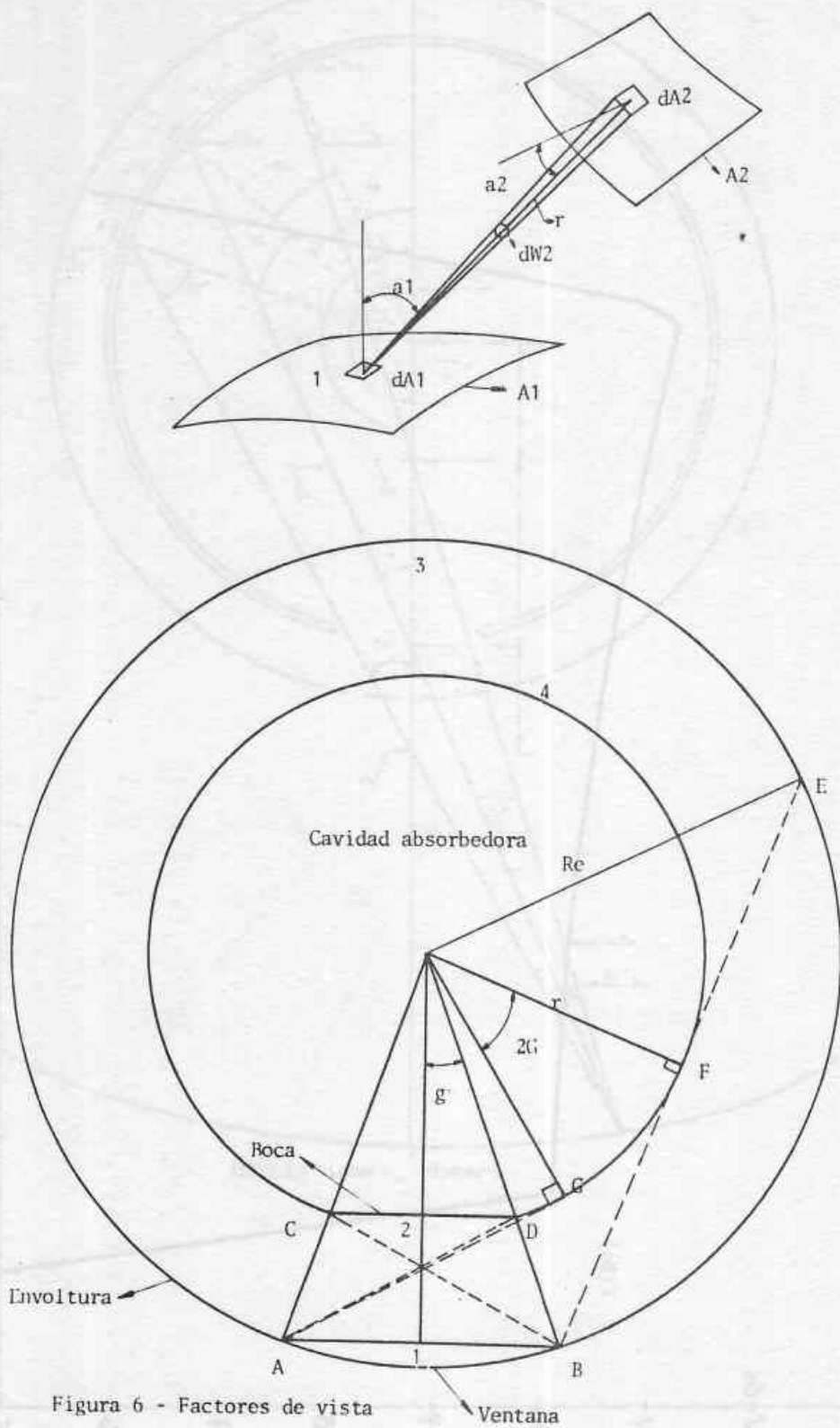


Figura 6 - Factores de vista