

COMBUSTION CICLONICA

Ing. Livio Dante PORTA

Buenos Aires - 1966

RESUMEN.

La combustión ciclónica combinada con parrillas.

Se desarrolla la teoría que permite manejar cuantitativamente los fenómenos que se dan en el hogar, condición para el diseño.

Si bien el desarrollo está cronológicamente originado por la necesidad de resolver problemas que se presentan en la locomotora de vapor, ahora ya no más alimentada con los clásicos combustibles de selección, los conceptos son extensibles a las calderas fijas que queman bagazo, aserrín u otros combustibles que no son lo suficientemente subdivididos como para que el tiempo de combustión de la partícula sea compatible con el tiempo de estadía de los gases en un hogar de alta intensidad de combustión, ni tampoco suficientemente grandes como para permanecer en una grilla. El sistema salva, pues, la gama de granulometría que queda entre el combustible pulverizado y los finos difíciles de quemar en parrilla sin un excesivo "carry over".

La teoría permite valuar con razonable exactitud el precio a pagar en forma de energía necesaria para producir la circulación ciclónica de los gases en una cámara de alta intensidad de combustión. También posibilita la realización de correlaciones del tipo experimental, de modo que las experiencias en modelos no sean un ciego tanteo sino un control de la teoría.

En un hogar de locomotora (1) se dispone una bóveda (2) con un agujero (3) colocado aproximadamente en el centro de la misma. Por debajo de la bóveda (2) y por encima del nivel de trabajo del lecho de brasas (4) se disponen entradas de aire secundario (5) en forma tal que sus ejes sean aproximadamente tangentes a un círculo imaginario (6).

Bajo la acción del tiro (inducido o forzado) el aire secundario penetra por las toberas (5) generando un movimiento rotatorio ciclónico que impide a los granos y partículas de combustible, que se desprenden del lecho de fuego por la violencia del tiro, ser arrastrados hacia los tubos (7).

La acción ciclónica de la corriente de aire secundario puede ser complementada por chorros de vapor provenientes de una o más toberas (8) y dispuestos en forma de acentuar el efecto de giro, o bien directamente generarlo si es que no se trabaja con aire secundario. Un chorro adicional de vapor (9) dirigido hacia el centro del agujero (3) impide el arrastre de partículas provenientes de la zona del lecho de combustible inmediatamente debajo del mencionado agujero. Este chorro también puede ser complementado por la acción de una tobera de aire secundario (10), protegida o no en su exterior con refractarios,

tubos de agua o cualquier otro medio refrigerante.

El sistema puede ser empleado también en el caso de utilizarse combustibles líquidos en cualquiera de sus formas, interesando particularmente su aplicación en el caso de mecheros o quemadores de imperfecta pulverización o en el caso intencionalmente previsto en el que las gotas o sus residuos carbonosos sean lo suficientemente grandes como para que su retención dentro del hogar sea posible gracias al campo centrifugo generado por la acción del aire secundario y/o del vapor proveniente de las toberas (8).

En el caso en que el hogar es de forma alargada, como ocurre generalmente cuando se lo dispone entre los largueros del bastidor de la locomotora, la disposición puede comportar dos o más agujeros (3a) y toberas (5a) dispuestos de modo que los giros ciclónicos de la corriente se complementen en su rotación por ser de sentido contrario y adyacentes (6a).

En una caldera de hogar acuotubular (11), la bóveda está soportada por tubos de agua (12) y comportar o no una porción reentrente (13), disposición que eventualmente puede también emplearse en las locomotoras si así conviniere.

Si la disposición del hogar, en el caso de adaptación a un diseño existente, es aproximadamente cuadrada, pueden incorporarse mamparos adicionales de refractario (14) o de tubos de agua (15) en forma de disminuir choques a la corriente ciclónica.

La combustión de las partículas en suspensión es la que dá el nombre al sistema objeto de la presente patente.

El sistema se considera de especial aplicación a combustibles cuya granulometría es fina, o cuyo índice de cokización es pobre, o que sufren procesos de degradación granulométrica bajo la acción del calor, tales como ciertos carbones minerales, lignitos, turba seca o húmeda, carbones no coquizantes, finos de carbón mineral, estériles carbonáceos de mina, leña, finos de carbón de leña, bagazo, etc.

Se menciona como de especial interés la eliminación de chispas que pueden provocar incendios, eliminación que se consigue por la simple acción de control de las corrientes de gases sin la adición de ningún dispositivo mecánico.

Se reivindica para el sistema de combustión ciclónica:

- a) Una mejora en el rendimiento de la combustión como consecuencia de la casi total eliminación de las pérdidas por coque volante.
- b) La eliminación de chispas.
- c) La posibilidad de utilizar combustibles de granulometría fina, o de índice de coquización pobre, o que sufren procesos de de-

gradación granulométrica bajo la acción del calor de las operaciones de transporte, etc.

d) La combustión de los humos fuliginosos.

Buenos Aires, junio 21 de 1963.

Teoría
de la
COMBUSTION CICLONICA
en
hogares de locomotoras

Por el Ing. Livio Dante Porta

de C.I.P.U.E.C.

Buenos Aires, Agosto de 1963.

Indice.

- 1.- Objeto del estudio.
- 2.- Desarrollo de la teoría.
- 3.- Ejemplo de aplicación.
- 4.- Análisis crítico.
- 5.- Extensión del campo de aplicación.

Figuras.

- Fig. 1: Hogar con bóveda estudiada para separación de coke volante.
- Fig. 2: Disposición imaginada en 1955.
- Fig. 3: Hogar ciclónico "cuadrado" de locomotora. Nomenclatura.
- Fig. 4: Esquematzación de los caudales de gases en el ciclón.
- Fig. 5: Velocidad radial y tangencial.
- Fig. 6: Eficiencia en la separación de granos de distintos tamaños.
- Fig. 7: Ejemplo de aplicación a locomotora de maniobras tipo 0-6-0 para quemar residuos finos de carbón de leña.
- Fig. 8: Granulometría del combustible (ejemplo).
- Fig. 9: Tiro necesario sin adición de vapor.
- Fig. 10: Id. con adición de vapor.
- Fig. 11: Efecto de la adición de vapor sobre el valor del diámetro crítico x .
- Fig. 12: Ejemplo de caldera fija para quemar cascarilla de girasol.

NOMENCLATURA

F_0	m^2	Sección de entrada de aire secundario cuya energía se utiliza para producir la corriente ciclónica.
G_A	kg/s	Cantidad de aire secundario que pasa por F_0 .
C_A	m/s	Velocidad del aire secundario.
γ_L	kg/m ³	Peso específico del aire secundario.
G_R	kg/s	Cantidad de gas que emerge de la parrilla.
γ_L	kg/m ³	Peso específico del gas de combustión a la temperatura de combustión.
M	m ³ /s	Volúmen de gases desarrollado por la combustión = $\frac{G_R + G_A}{\gamma_L}$
u_m	m/s	Velocidad media de los gases en el ciclón a través de una sección F_e [m ²] (fig. 3).
r_l	m	Radio exterior de la cámara ciclónica equivalente al hogar cuadrado (fig. 3).
r_a	"	Radio del agujero de la bóveda.
r_i	"	Radio del lugar en el que se desarrolla la máxima velocidad en el agujero de la bóveda.
r_2	"	$r_2 \approx r_s + \frac{1}{4} r_b$
K	-	Coefficiente que exprese, como fracción de la presión dinámica de los gases animados de velocidad u_m , las pérdidas por rozamiento en el ciclón.
F_a	m ²	πr_a^2 , Sección del agujero de la bóveda.
l	m	Recorrido de la vena media de gas en el anillo.
t_s	s	Tiempo medio de estadía del gas en el anillo; $t_s = V_a/M$
h	m	Altura de la cámara ciclónica (fig. 3).
x	"	Diámetro límite inferior del grano arrastrado fuera del ciclón.
γ_s	kg/m ³	Peso específico del grano de coke.

w_r	m/s	Velocidad radial media.
G_d	kg/s	Vapor añadido para producir turbulencia que aumente la velocidad del remolino.
C_d	m/s	Velocidad del vapor G_d .
ΔP_e	kg/m ²	Pérdida de presión estática hasta la garganta del ciclón.
ΔP_b	"	Caída de presión a través de las toberas de aire secundario.

1.- Objeto de la teoría.

Es conocida la limitación de las calderas de locomotora en cuanto a la máxima producción de vapor posible: el límite de parrilla "grate limit" fija un tope fundamentalmente determinado por la imposibilidad de la parrilla de mantener, a los máximos regímenes todavía compatibles con una eficiente transmisión de calor en el hogar y en el haz tubular, un lecho de brasas no exageradamente perturbado por la intensidad de un tiro que crece con el cuadrado de la vaporización.

Este límite, que depende de muchos factores, entre los cuales la "calidad" (propiedades coquizantes) del combustible y su granulometría son preponderantes, no solamente tiene importancia práctica en orden a un máximo de vaporización de un tipo de caldera cuya potencia en relación a su masa interesa elevar en todo lo posible, por tratarse de una unidad en cuyos costos de operación se deben incluir los de su propio transporte, sino también por el hecho de que, aún en el rango usual y relativamente moderado utilizado en el servicio corriente, se dan pérdidas importantes por coke volante que incrementan los consumos de combustible en el servicio en 10% a 15%; obligan a un mayor trabajo del foguista, exigen un tender más grande, etc.

La general tendencia mundial a utilizar para la generación de vapor combustibles de características cada vez más inferiores o degradados por la acción de la mecanización de mina, reservando los más seleccionados para aquellos usos en que no es posible otra alternativa (altos hornos, usos domésticos, fabricación de coque, etc), situación a la que las locomotoras no son ajenas con particular referencia al empleo del carbón de Río Turbio, hace que el problema del coke volante se presente con agudeza cada vez mayor. De resolverse este problema, cabría, por otra parte, agregar la posibilidad de utilizar combustibles de fina granulometría, la integral y racional solución del problema de las chispas.

Las posibilidades de efectuar una separación de sólidos arras-

trados por la violencia de las corrientes gaseosas en el hogar de las locomotoras mediante dispositivos constructivos, data desde los orígenes del desarrollo del ferrocarril: las clásicas bóvedas, parafuegos, hervidores, etc., son ejemplos.

La forma de éstos nunca fué objeto de investigación profunda alguna en el sentido que preconizamos, salvo en nuestras realizaciones en que se los estudió en forma especial con mirada con la aplicación de la combustión "a la gasógena", si bien nada cuantitativo estaba aún al alcance de la mano como para hacer un pronóstico de performance. Había de contentarse con retoques realizados en base a simples observaciones. Una tal bóveda (fig. 1) dá una separación relativamente eficiente de los sólidos, separación que se manifiesta prácticamente cuando se confronta, con respecto a la disposición habitual, el tamaño de las carbonillas arrastradas a la caja de humos. Cabe señalar sin embargo, que la aplicación del sistema de combustión a la gasógena tiene mucho que ver en esto, ya que en él el lecho de fuego no está agitado por una corriente de aire tan intensa como la que se dá en una combustión normal.

La idea de efectuar una separación de partículas dentro del hogar, aprovechando los posibles cambios de dirección de la corriente de gas dentro de las muy constreñidas posibilidades del hogar de una locomotora, ha tropezado siempre con serias dificultades.

Esto vale particularmente si se trata no de un diseño nuevo con las libertades que le son inherentes, sino de uno existente. Además ha existido siempre la incógnita de no conocer las reales pérdidas de tiro a que tales o cuales disposiciones de bóveda pueden dar lugar, y de no conocerlas en forma cuantitativa como para poder fijar reglas de diseño sin necesidad de recurrir a ensayos de posibilidades (hasta hoy, pero no en un futuro cercano) remotas en nuestro país. Tales ideas databan ya de 1945.

La aparición del combustor ciclónico en el campo de las calderas fijas abrió evidentemente una nueva fuente de inspiración, pero hasta muy poco ha, habían sido infructuosos los esfuerzos de imaginación para incorporar esa forma de separación de partículas al hogar clásico, amén de la presencia de la parrilla, cuya eficiencia y bondad en otros órdenes, especialmente el constructivo, está fuera de toda duda.

Hacia 1955 habíase concebido la disposición que muestra la figura 2, aplicable sólo a hogares de forma relativamente cuadrada, pero no era posible, dentro de las facilidades de ejecución disponible, incorporarla a diseño alguno por causa de que su performance no era predecible ni siquiera con un grosero grado de aproximación.

La teoría de la combustión ciclónica aplicada a las calderas de carbón pulverizado en plantas fijas, sin duda objeto de cuidadosos

estudios por parte de los grandes constructores, no ha sido, sin embargo y a estar a la información obrante en nuestro poder, publicada. Llegando a nuestro contacto el trabajo del profeso Ledinegg (Ledinegg, Theorie der Zyklonfeuerung, ZVDI 94 (1952), p.921.) desarrollado con miras a su aplicación a las calderas fijas, hemos podido hacer la complementación y extensión que es del caso para la aplicación a hogares de locomotoras y cuya exposición es objeto de la presente comunicación.

Son objetos de la teoría:

- a) Determinar, en un ciclón de diseño dado, las pérdidas de carga de los gases en la cámara del hogar para ver si son compatibles con las posibilidades de producción de tiro de los aparatos de caja de humos.
- b) Definir la performance de separación de coque volante.
- c) Mostrar, en forma cuantitativa, la influencia de los factores que afectan los fenómenos que se desarrollan en el hogar en forma de orientar el diseño y posibilitar la interpretación de datos experimentales.

Es posible así materializar un "approach" compatible con una aceptable separación de partículas y una contrapresión razonable en el escape para producir el tiro, el que, se descarta, no puede sino producirse mediante dispositivos de la máxima eficiencia, tales como son el Kylchap, Kylpor, Giesel, PIM o Nord.

2. Desarrollo de la teoría:

En su forma elemental, ha sido tratada para el caso de un hogar "cuadrado", como lo muestra la fig. 3. En cada uno de los rincones están dispuestas las entradas de aire secundario en forma de producir un intenso remolino debajo de la bóveda en lo que llamaremos cámara ciclónica; la energía para producir el remolino es obtenida de la velocidad del aire secundario (eventualmente complementada con chorros de vapor) que se supone es proporción importante del total dado que se estudia el caso suponiendo la aplicación de la combustión "a la gasógena". Este aire secundario es aspirado por el equipo de tiro inducido con una intensidad relativamente importante que justamente es la que se desea calcular.

El aire secundario genera un ciclón encima de la superficie del lecho de brasas, girando en el anillo que ocupa el volumen V_a [m³] con una velocidad media u_m [m/s]. Un volumen elemental de gases recorre, en la cámara ciclónica, un camino l [m].

La hipótesis es de una combustión completa en la cámara ciclónica, lo que no está lejos de la realidad al menos como primera aproxima-

mación.

Los gases escapan, según Ledinegg, en forma de anillo hueco (Prinzip der rotierenden hohlwelle, l.c. pág. 924) con una distribución hiperbólica de la componente axial de la velocidad, y a los efectos de la pérdida de carga, puede calcularse ésta como si toda la masa de gases debiera pasar por el agujero de salida a la velocidad u_i . Esto no figura explícitamente en el trabajo de Ledinegg, pero puede deducirse de él.

Es objeto de la teoría de Ledinegg la determinación de esta velocidad u_i en función de los distintos parámetros que definan el funcionamiento del ciclón. Desarrollando el flujo de gases a lo largo de su recorrido correspondiente al radio medio r_e [m], se tiene la representación esquemática de la fig. 4 en la que se indican los caudales de circulación a través de la sección F_e [m²] con velocidad media u_m m/s sobre un recorrido l antes de escapar por el agujero de la bóveda.

La caída de presión estática hasta el agujero de la bóveda es:

$$\Delta p_e = \frac{C_A^2 \gamma}{2g} + \frac{u_m^2 \gamma l}{2g} - \frac{u_m^2 \gamma l}{2g} + \frac{u_m^2 \gamma l}{2g} K \quad [\text{kg/m}^2] \quad (1)$$

En la expresión (1), el primer término del segundo miembro es la presión diferencial necesaria para acelerar la corriente de aire a través de las toberas de aire secundario.

El segundo y tercer términos, la variación de presión estática necesaria para acelerar los gases hasta la velocidad u_i , suponiendo, con Ledinegg, que así se tiene en cuenta el hecho de que los gases no atraviesan el agujero de la bóveda a velocidad uniforme con respecto a la sección y que tampoco el vector velocidad tiene una dirección puramente axial.

El cuarto término tiene en cuenta los rozamientos en el ciclón.

Por el teorema de los momentos es:

$$\frac{G_d C_d}{g} + \frac{G_A C_A}{g} + \frac{G_R 0}{g} = \frac{(G_R + G_A) u_m}{g} + \frac{(G_R + G_A) u_m}{2g} K$$

$$G_d C_d + G_A C_A = (G_R + G_A) u_m \left(1 + \frac{K}{2}\right) \quad (2)$$

Se puede poner: $\frac{u_i^2 \gamma_L}{2g} = \left(\frac{M}{F_a}\right)^2 \frac{\gamma_L}{2g} \frac{1}{Z}$

y $Z = \left(\frac{F_e}{\pi r_e r_a}\right) = f \frac{F_e}{\pi r_2^2} \approx 0,27 \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{u_m} r_2} \approx Z$

$\therefore \frac{u_i^2 \gamma_L}{2g} = \frac{\gamma_L r_2 M^{1,5} \sqrt{u_m}}{0,27 \cdot 2g \cdot F_a^2}$

con lo que la ecuación (1) queda:

$$\Delta_{Pe} \frac{C_A \gamma_e}{2g} + \frac{\gamma_L r_2 M^{1,5} \sqrt{u_m}}{0,27 \cdot 2g \cdot F_a^2} = \frac{u_m^2 \gamma_L}{2g} + \frac{K}{2} \quad (1')$$

$$G_d C_d + G_A C_A = (G_R + G_A) u_m + \frac{K}{2} \quad (2')$$

$$F_e \frac{M}{u_m} \therefore \frac{F_e}{\pi r_e r_a} = \frac{M}{\pi r_2^2 u_m}$$

$$Z \approx 0,48 \sqrt{\frac{M}{\pi r_2^2 u_m}} = \frac{0,48}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{M}}{r_2 \sqrt{u_m}} \approx 0,27 \frac{\sqrt{M}}{r_2 \sqrt{u_m}} \quad (\text{Ver apéndice 1})$$

Grano límite de diámetro x.

Se define como el que permanece en equilibrio indiferente en el círculo de radio r_a m y en cual se equilibra la fuerza centrífuga con la de fricción de Stokes. (fig. 5).

$$\frac{x^2 \gamma_s u_m^2}{6g r_a} = \frac{3\sqrt{\gamma_L} w_r}{g} \quad (3)$$

f. centrif. Fza. Stokes.

Fig. 5. Velocidad radia y tangencial.

Si se pone: $w_r = u_m \frac{s}{r}$

queda:
$$\frac{x^2 \gamma_s u_m^2}{18 r_a} = \frac{\sqrt{\gamma_L} u_m s}{r}$$

$$\therefore x = \sqrt{\frac{18 \sqrt{\gamma_s} (r_1 - r_a) r_a}{\gamma_s u_m r}}$$

$$x = \sqrt{\frac{18 \sqrt{\gamma_L} s r_a}{\gamma_s u_m r}} = \sqrt{\frac{18 \sqrt{\gamma_L} s r_a M}{\gamma_s u_m^2 V_a}} \quad (3a)$$

pero $r = t_s \cdot u_m = \frac{V_a}{M} \cdot u_m$

$$\therefore x = \frac{1}{u_m} \sqrt{\frac{18 \gamma_s r_a}{V_a}}$$

También es:

$$u_m = \frac{1}{(1 + \frac{K}{2})} \frac{G_d C_d + G_A C_A}{(G_R + G_A)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K}{2}} \frac{G_A}{G_R + G_A} \frac{G_d C_d + C_A}{G_A}$$

$$\therefore x = 1 + \frac{K}{2} \frac{1}{G_A + G_R} \cdot \frac{1}{G_d C_d + C_A} \sqrt{\frac{18 \sqrt{\gamma_L} s r_a M}{\gamma_s V_a}} =$$

$$x = 1 + \frac{K}{2} \cdot \frac{1}{\frac{G_A}{G_A + G_R}} \cdot \frac{1}{(G_d C_d + C_A)} \sqrt{18 \sqrt{\gamma_L}} \cdot \sqrt{\frac{S r_a}{V_a}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma_s}} \cdot \sqrt{M}$$

También es:
$$\sqrt{\frac{S r_a}{V_a}} = \frac{1}{\sqrt{r} \sqrt{h} \left(2 + \frac{S}{r_a} \right)}$$

y
$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{(G_R + G_A)}}{\sqrt{\gamma_L}}$$

$$\therefore x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{K}{2} \cdot \frac{1}{\frac{G_A}{G_R + G_A}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{G_d}{G_A} C_d + C_A \right)} \sqrt{18 \sqrt{\gamma_L}} \sqrt{(G_R + G_A)} \cdot \frac{1}{\sqrt{h \sqrt{2 + \frac{S}{r_a}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma_s}} \right) \quad (5)$$

En la (5) debe interpretarse el valor de K como la fracción de presión dinámica consumida por la corriente animada de velocidad u_m en el recorrido 1. Para los hogares cuadrados de las locomotoras, puede tomarse:

$$K = 1,2 \frac{\rho}{\frac{1}{4} \pi^2 r_e}$$

donde el coeficiente 1,2 corresponde a las pérdidas que se dan en codos a 90°.

En los casos especiales en los que se dan distintas formas de hogar (redondo, octogonal, rugoso, etc.) y con miras a la extensión de la teoría a otros ciclones, caben otras consideraciones respecto del modo de elegir K.

La adición de chorros de vapor en forma tangencial permitiría, llegado el caso, trabajar con una combustión casi sin aire secundario. Esta adición también probablemente sea beneficiosa en el sentido de disminuir el tiro necesario para producir tanto una combustión suficientemente completa en una cámara de reducidas dimensiones cuanto para producir un remolino más enérgico y en consecuencia una mejor separación. También ofrece interesantes posibilidades para la aplicación a hornos industriales y gasógenos que trabajen con combustibles muy pulverulentos y altos regímenes de combustión.

El diámetro x debe ser interpretado como un valor teórico. En la práctica, todo ciclón se desempeña con una eficiencia variable en función de distintos diámetros de partícula (Zenz y Othmer, Fluidization and fluid particle systems, New York 1960, pág. 407.) Esto significa que de los distintos tamaños de granos ofrecidos al ciclón (es decir emergentes del lecho de combustible y arrastrados por la corriente de gases), serán separados si están por encima del diámetro x calculado con la (5), pero ello no ocurrirá sino con una fracción del conjunto de granos. Una parte del mismo, de diámetro inferior a x , será separada y otra parte superior al diámetro x será arrastrada.

Por analogía con ciclones similares destinados a la separación de polvos, la fig.6 da una probable curva de eficiencia en la separación que puede servir de base para estudios más avanzados en la cuestión.

Datos constructivos y de operación.

Alternativas			I	II
Sección de aire secundario	F_0	m^2	0,0300	0,0500
Peso específico del aire a 15°C	γ_0	kg/m^3		1,22

Combustible: residuos finos de carbón de leña.

Análisis inmediato:

Humedad		%	28
Materias volátiles		"	13,9
Carbono fijo		"	51
Cenizas		"	7,1
			100,1
Poder calorífico inferior		cal/kg	4293
" " superior		"	4685
2º Punto de fusión de cenizas (Leitz)		°C	1370
2º Punto de licuación de cenizas (Leitz)		"	1380
Peso específico del carbón	γ_s	kg/m^3	250
Peso específico de los gases	γ_L	"	0,225
Coefficiente de exceso de aire		-	1,25
Viscosidad de los gases		m^2/s	$230 \cdot 10^{-6}$
K (tentativamente)		-	1,2

Alternativas:		I		II		Ia		IIa	
S/Rosin-Fehling, cantidad de gas por kg de carbón quemado:	Nm ³ /kg	6,7 con 25 % de exceso de aire.							
Id. de aire.	"			6,1					
Entalpía de gas:	Cal/Nm ³			641					
Cantidad de gas por hora	Nm ³ /h	10910	5455	10910	5455	10910	5455	10910	5455
Id. de aire.	"	9940	4970	9940	4970	9940	4970	9940	4970
Calor liberado en el hogar:	10 ⁶ cal/h	7	3,5	7	3,5	7	3,5	7	3,5
Gas por segundo G _A + G _R	kg/s	3,94	1,97	3,94	1,97	3,94	1,97	3,94	1,97
Aire por segundo	"	3,56	1,78	3,56	1,78	3,56	1,78	3,56	1,78
Cantidad de vapor vivo C _d	"	0,02				Sin vapor.			
Proporción de aire secundario	%	50, en todas las alternativas.							
Aire secundario por segundo	kg/s	1,78	0,89	1,78	0,89	1,78	0,89	1,78	0,89
Gases combustibles emergentes del em- parrillado G _R	"	2,16	1,08	2,16	1,08	2,16	1,08	2,16	1,08
Velocidad del vapor C _d	m/s	900 empleando vapor.				No se emplea vapor.			
Velocidad del aire secundario C _A G _A /F _O %	"	48,6	24,3	28,2	14,1	48,6	24,3	28,2	14,1
Presión diferencial del aire secundario	kg/m ²	147,2	36,8	53,0	13,3	147,2	36,8	53,0	13,3
Volumen d/gas de com- bust. M=(G _A +G _R)/γ _L	m ³ /s	17,5	8,75	17,5	8,75	17,5	8,75	17,5	8,75

Tiempo de estadía en el anillo
 $t_s = V_a / M$ s. 10^{-2} 5,54 11,1 5,54 11,1 5,54 11,1 5,54 11,1

Velocidad media en el anillo ciclónico
 m/s 16,6 9,7 9,4 6,1 13,7 6,9 6,6 3,3

Recorrido medio de la vena de gas en el anillo
 m 0,92 1,08 0,52 0,68 0,76 0,76 0,36 0,36

Observación: Los valores bajos de 1 tienen menor exactitud que los otros por apartarse el caso de la teoría presente que ha considerado a los fenómenos como planos. No obstante indican con toda claridad las tendencias del fenómeno de separación y el valor de las pérdidas de tiro y por ello se los incluye en la presente tabla.

Diámetro x (equac. 3a) x = mm 0,18 0,23 0,33 0,35 0,22 0,32 0,47 0,66

Presión diferencial a través de las toberas de aire secund.
 kg/m² 147 37 53 13 147 37 53 13

Tiro en la garganta del ciclón (eq. 1') Δp_e " 182 46 71 21 179 45 76 19

Relación $\beta = \frac{\Delta p_e}{\rho p_o}$ 1,24 1,25 1,34 1,55 1,22 1,21 1,43 1,40

4.- Análisis crítico.

La expresión (5) muestra la influencia relativa de los distintos parámetros que intervienen en la definición del diámetro x. Es posible así jugar con los distintos grados de libertad que permite el diseño y, lo que se considera de suma importancia, poder correlacionar los datos experimentales. En la misma aparece en toda su importancia la conveniencia de aerodinamizar la cámara ciclónica a fin de disminuir el valor de K; la de aumentar en todo lo posible la proporción de aire secundario con respecto a la masa total de gases y la conveniencia de agregar vapor a fin de incrementar la intensidad de giro en el ciclón.

Parece, a estar a la mejor información disponible, que esta adición de vapor, que tendría también un efecto favorable sobre la combustión en el sentido de alcanzar una mezcla satisfactoria de los gases con el aire secundario, permite asimismo disminuir la importancia del tiro necesario para lograr el proceso de mezcla y para alcanzar suficiente energía de remolino como para efectuar una eficiente separación de partículas.

La influencia del régimen ($G_r + G_a$) y de la velocidad C_A deben ser tratadas en conjunto, por cuanto C_A es a la vez función de elementos constructivos y del régimen. En primera aproximación, para una construcción dada, x es

- inversamente proporcional a $\sqrt{(G_r + G_a)}$. Para un régimen dado también x es
- inversamente proporcional a $\sqrt{\Delta p_e}$

La influencia de las dimensiones de la cámara ciclónica depende prácticamente de h ya que es muy pequeña la posible variación en s/r_a .

La influencia del peso específico del grano de combustible es decisiva.

Al ser x inversamente proporcional a $\sqrt{G_r + G_a}$ (en primera aproximación) cabe pensar que, correspondientemente a los regímenes bajos, el valor del diámetro x crece mucho. Afortunadamente a estos regímenes la cantidad de coque volante emergente de la parrilla es muy baja y el tamaño de los granos, menor. Si se adiciona vapor al ciclón, x tendrá todavía un valor finito.

Es obvio que un diseño final debe ser objeto de tanteos sucesivos en base a cálculos como los expuestos y por supuesto una exploración en laboratorio.

Cabe notar que el ciclón no desempeña aquí el papel de combustor, forma en la que se lo emplea en las calderas fijas, y si bien las partículas en suspensión en la atmósfera del hogar sufrirán un proceso de combustión, este no será el proceso principal de gasificación, que en cambio se desarrolla en la parrilla.

5.- Extensión del campo de aplicación.

La razón de haberse desarrollado la presente teoría para su aplicación a los hogares de locomotora es simplemente cronológico y en modo alguno limitativa. El arrastre de coque volante en las calderas fijas es digno de tenerse en cuenta, especialmente en el caso de empleo de combustibles pulverulentos, como ser cascarrilla de girasol, desechos vegetales diversos, aserrín, residuos de carbón de leña, schlamms, etc.

Utilizada conjuntamente con la combustión a la gasógena, la combustión ciclónica puede ofrecer aspectos interesantes en tanto que la turbulencia generada por el aire secundario, ahora proporción importante del total, puede ser ventajosamente utilizada para lograr retener las partículas de otro modo arrastradas por la corriente de gases, amén de ofrecer una oportunidad adicional a las mismas

para quemar en suspensión, ya que gracias a la acción del campo centrífugo generado expresamente, el tiempo de estadía de esas partículas dentro del hogar puede ser mucho mayor que t_s , que es el tiempo de estadía de los gases.

Puede así combinarse la combustión sobre parrillas con la combustión ciclónica en un modo diferente del ciclón puro y, a diferencia de éste, no exigiendo granulometría alguna para un correcto funcionamiento: los finos, quemarían en suspensión; los gruesos, sobre la parrilla, incluso bajo un régimen de lecho fluidizado.

En esos casos, la retención de cenizas y su eliminación por el hogar, preocupación determinada en no poca medida por la necesidad de contar con humos limpios para evitar la contaminación atmosférica, puede hacerse ya en gran parte sobre la parrilla y del resto, una fracción importante también por la parrilla, como resultado de la separación centrífuga, apelmazamiento parcial de las partículas y retorno al lecho de fuego.

Desaparecería la necesidad de adoptar grandes cámaras de combustión para realizar la condición de bajas velocidades de gases. Las combustiones tendrían así las intensidades correspondientes al empleo de los combustibles líquidos o gaseosos.

La utilización de spreader stokers, en general seriamente afectados por el "carry over" podría extender su campo de aplicabilidad y beneficiarse con posibles fuertes incrementos en las intensidades de liberación de calor por unidad de volumen. Aplicados conjuntamente con la combustión a la gasógena, desaparecería la necesidad de una perfecta repartición del combustible en toda la extensión de la grilla, condición esta sumamente difícil de lograr en ciertos casos (bagazo). Es más: cabría pensar en el empleo de stokers desprovistos de medios mecánicos de distribución, es decir limitados sólo a una distribución neumática o por vapor sin mayor preocupación por la eficiencia en cuanto a la regularidad de la misma, ya que la inyección del combustible se podría hacer en el ciclón mismo.

Las posibilidades podrían variar al infinito. A título de ejemplo la fig. 12 detalla una previsión para la combustión de cáscara de girasol en el hogar de una caldera acuotubular del tipo Babcock & Wilcox.

Apéndice I.

Según Ledinegg es:

$$z = \sqrt{1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2} - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2 e_n \left[\frac{r_a}{r_i} + \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \quad (A)$$

Ecuación que se representa graficamente en la fig. A.

También Ledinegg puede ponerse, siguiendo a Feifel (Zyklonenstaubung, die ideale wirbelsenke und ihre Näherung. Forsch. Ing. Wes. Bd. 10 (1939. p. 212/19)

(Zyklonenstauber. Arch. Wermewirtscj. Bd 20 (1939) p.15).

(Zyklonenstaubung. Masch.-Bau. u. Wärme-wirtsch Bd 1 (1946). p. 36/41)

Zyklonenstaubung. Forsch. Ing. Wes. Bd. 9 (1938).p.68)

$$\frac{F_e}{r_e} = \pi r_a \frac{r_a}{r_i} \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2} - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2 \right. \left. \text{en} \left[\frac{r_a}{r_i} \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \right\}$$

de donde
$$\frac{F_e}{r_e} = \pi r_a \left(\frac{r_a}{r_i} \right) Z \quad (B)$$

Combinando en una solución gráfica la (A) y la (B) se tiene finalmente Z función de $F_e / r_e \pi r_a$. (fig. B).

Ledinegg hace, para los ciclones de caldera del tipo Bebcack y similares, $F_e = M/C_A$ que preferimos sustituir en nuestro caso por $F_e = M / u_m$; es decir que, en última instancia, u_i depende de la velocidad u_m antes que de la u_A cuya significación no es la misma en ambos casos.

STANDARD WARTIME LOCOMOTIVES

(GERMANY)

A war impressed necessity, the substitution of steel for copper in fire box sheets and stay bolts has now convinced the German railroad people of the superiority of steel for these purposes and steel will remain the standard application.

An interesting feature was developed in connection with the investigation of locomotive builders. At Maschinenfabrik Esslingen, Wurttemberg, the war time standardized locomotive was being built for 8000 man hours and that included much material and part processing. This represents a reduction, according to the plant officials, from a previous requirement of 22,000 man hours. During the period of greatest construction and in fact until a few days before the capitulation most of the workers were impressed foreign workers. (Non-German in the language of the German officials). These workers had little or no skill. To meet this condition what had in many cases been considered skilled operations were so set up as to eliminate the skill requirement. At the same time the material fabrication was devised to minimize processing operations that involved skill. For example, cylinders and valve chambers were bored using a tool head that fixed the bore diameter without frequent skilled adjustment. The tool bits for the first pass (or roughing cut) were fixed in the head. When the horizontal boring bar was withdrawn after the first pass, four tool bits for the proper cutting position by the simple tripping of small levers. The second pass finished the bore.

This same principle was followed in much of the drilling and machine work using templates, jigs and fixtures to eliminate laying out, calipering and measuring. In short an intensified adaptation of the principle of our automobile industry mass production methods to locomotive building.

Flame cutting to template and stack flame cutting were extensively used and the cut surface was not subsequently machined. Brake hangers, brake levers, spring hangers, spring equalizers and similar parts were flame cut and all forging or machining eliminated.

Main and side rods were made from drop forged heads and an +I" section rolled bar welded electrically and under pressure. A Siemens Welding machine, with pressure and current controls was used. The current is passed thru the sections to be welded and when the proper temperature is reached butt welding is effected by pressing the sections together mechanically. Here again the forging requirement was limited to the drop (mechanical) operation on the rod heads. No machining was required between or on the heads leaving only the bore for the bushing to be machined.

The mud ring was made of eight pieces. The sides and ends were of bar stock rolled to finished size. The four corner sections were flame cut to template and the whole formed by manual electric arc welding in a rotating jig that provided for down-hand welding on all sides.

The mud ring, fire box and boiler sheets, waist sheets and dome were all drilled thru bushed templates (eliminating lay-out) with the sheets or assembly so held in adjustable jigs that the section being drilled was always held in proper relation to the drill spindle.

In connection with the overall man-hour requirement for construction of the locomotive, that for, the boiler complete was 1600, - a reduction from a former requirement of 4000.

The engine tank was of all welded construction without underframe and with two pressed steel builtup, 4-wheel trucks. The tender capacity was 11 tons of coal and 8000 galls of water.

The locomotive as a finished product is well assembled and the service performance under the Military Railways Service has demonstrated its utility.

In some of the sub-departments of this plant the ratio of unskilled to skilled labour was as high as 8 to 1.

BIBLIOGRAFIA.

- (1) Brown, H.F., "The econics of diesel traction on U.S. Railways". The Chartered Mechanical Engineer, Dec. 1960.
- (2) Porta, L.D. Revista de YCF (Argentina) Marzo de 1960.
- (3) Porta, L.D. "La combustión ciclónica en combinación con grillas" (Patent pending), Buenos Aires 1963 (no publicado) documentación interna de INTI.
- (4) Klie, L., "Die Belastbarkeit des Lokomotivkessels". Glasers Annalen 76 (1952) 47.
- (5) Van Stappen, J., "A new method for wood burming in steam locomotives". The Railway Gazzette, May 1, 1953.
- (6) Parsons, A.J., "Some aspects of locomotive feedwater treatment". Hanchck, J.S. "A brief history of locomotive feed water treatment on the Londos Midland Region of British Rys.". Journal of the Institution of Locomotive Engineers, Año 1957.
- (7) Chapelon, A., "Modernización de locomotoras". Congreso Panamericano de Ferrocarriles. Buenos Aires 1957.
- (8) Rozak-Veron, "Nouvelles etudes sur la Chaleur". Paris.
- (9) Gintrac, M.L. "Le traitement des eaux des chaudières". SNCF, 1947.
- (10) Chapelon, A., "La locomotive a vapeur". Bailliere, Paris, 1952.
- (11) Cox, E.S., "Locomotive axleboxes". Paper 447, Journal of the Institution of Loco. Eng., London.
- (12) Chapelon, A., "La locomotive a vapeur", Baillieres, Paris.
- (13) Marsh, G.C., "Recent development in Vacuum Brake equipment". Journal of the Inst. Loco. Eng., 42 (1952), part 2, 95.
- (14) Ahrons, Railway Lubrication.
- (15) Schweter, E., "Pumpen mit höher Drehzahl". Berlin 1938. Ver también Fuchslocher-Schulz: "Die Pumpen", pag. 197. Springer Verlag, Berlín 1959.
- (16) Dugas, MTZ, Beiheft 1 (1949), pág. 3.
- (17) Henschel, "Lokomotive Taschenbuch", p.143. Locomotive considered: E 94 de la Deutsche Bundesbahn.
- (18) Lampe, C. "Die 6-achige 3000PS-Diesel lokomotive Bauart ML3000" MTZ 21(1960) heft 6.

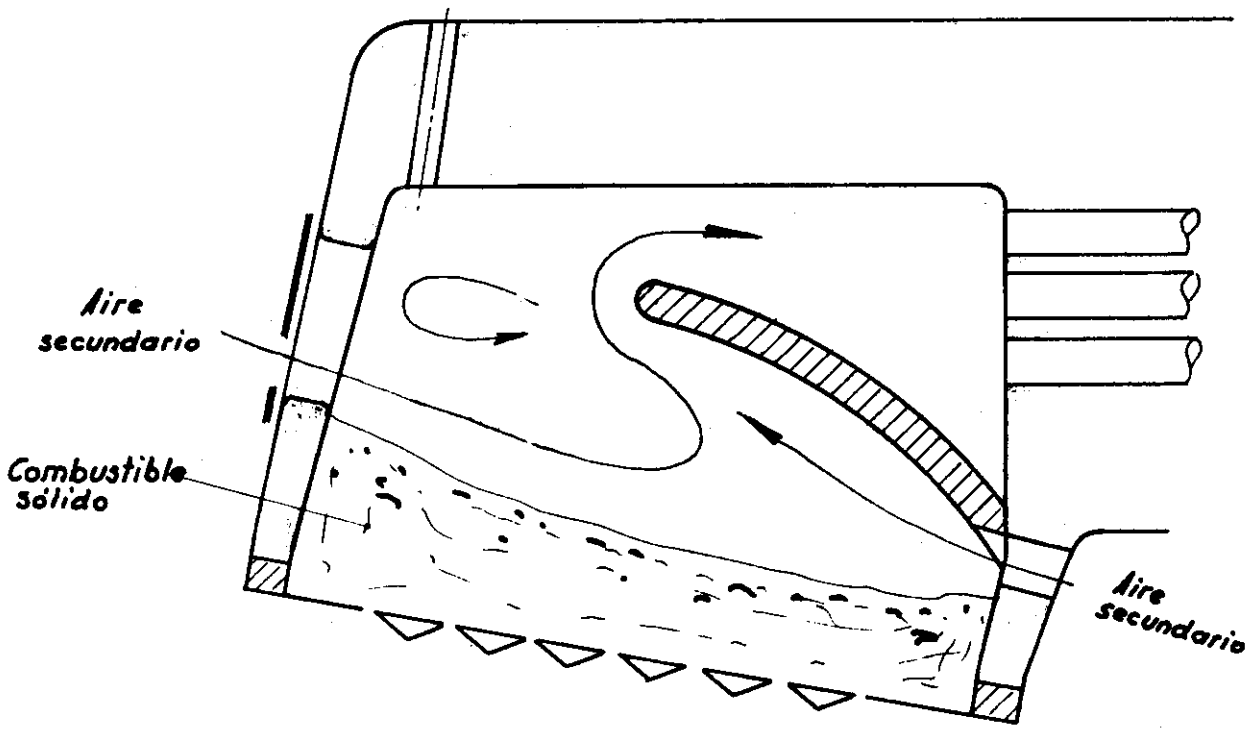


Fig. 1: Hogar con bóveda estudiada para separación de coke volante

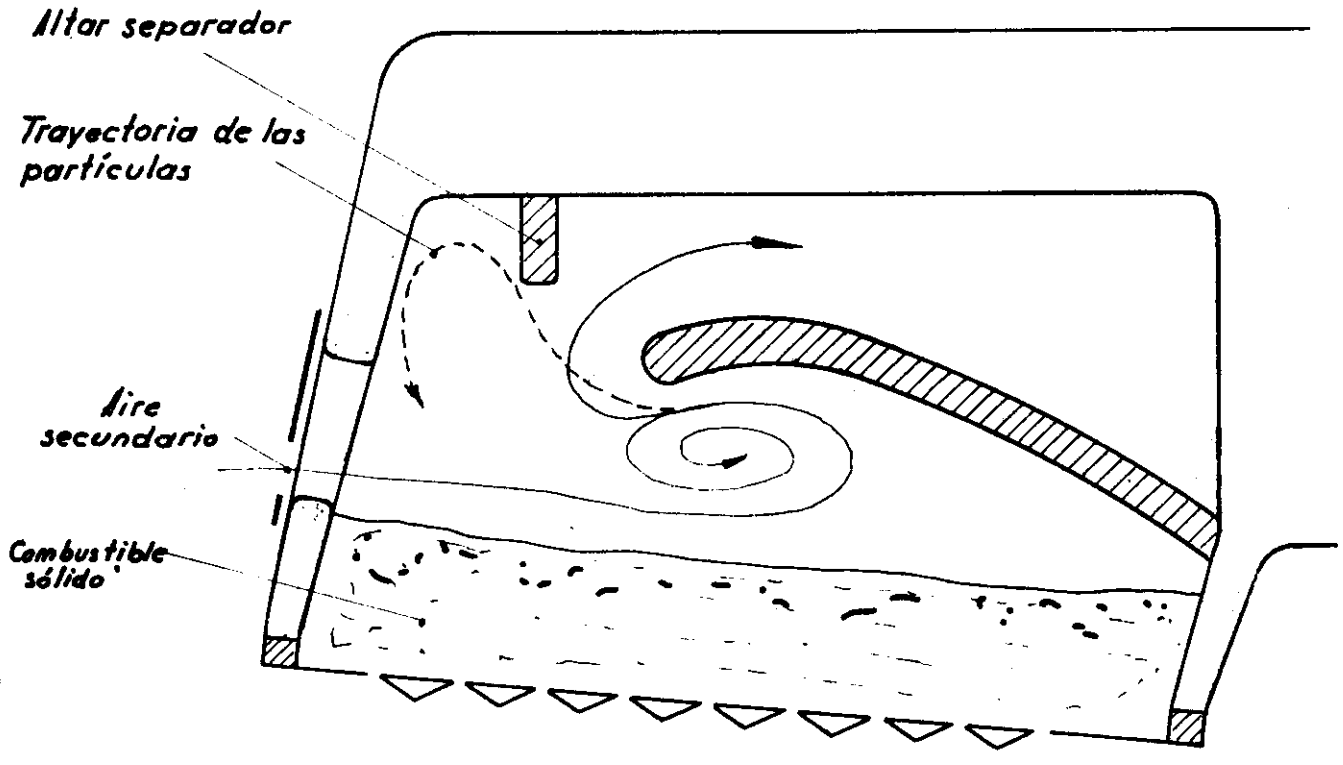


Fig. 2: Disposición imaginada en 1955

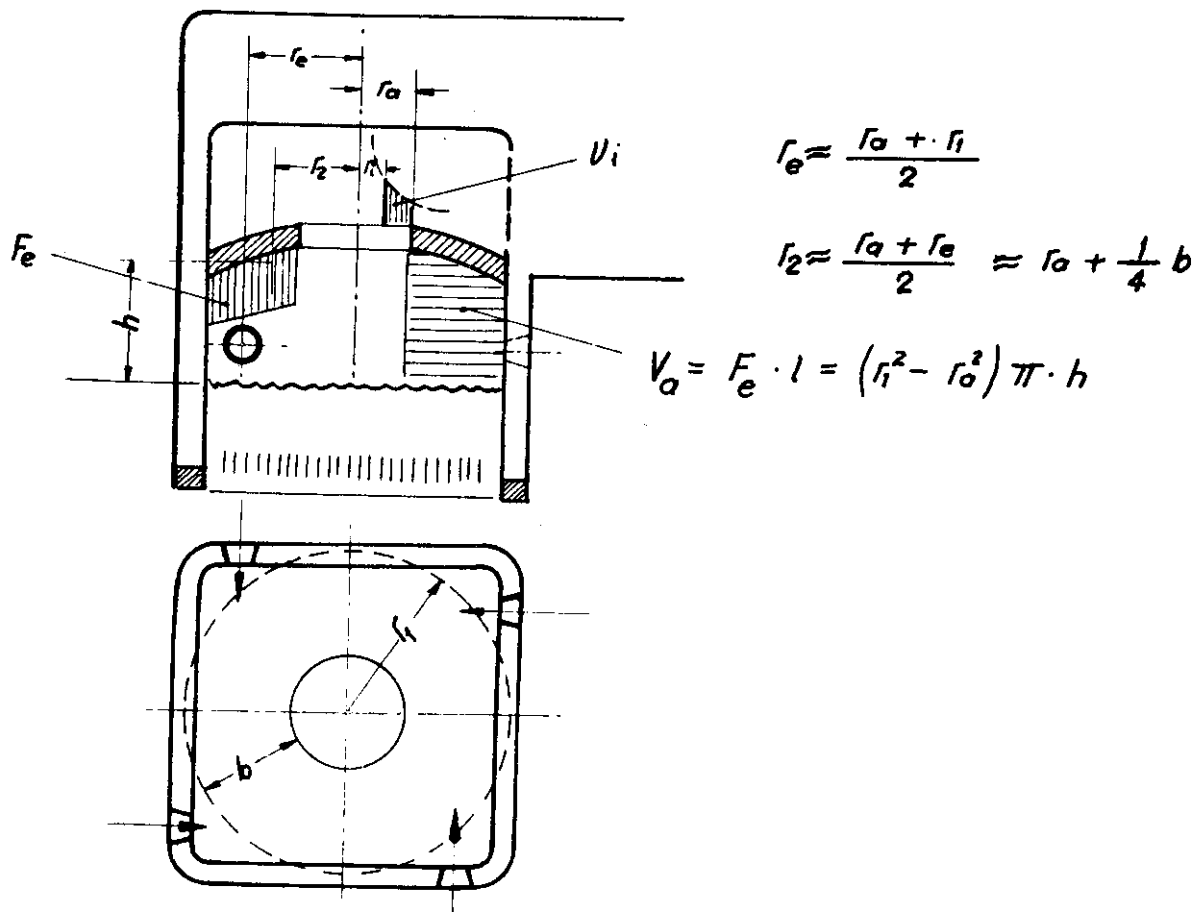


Fig. 3

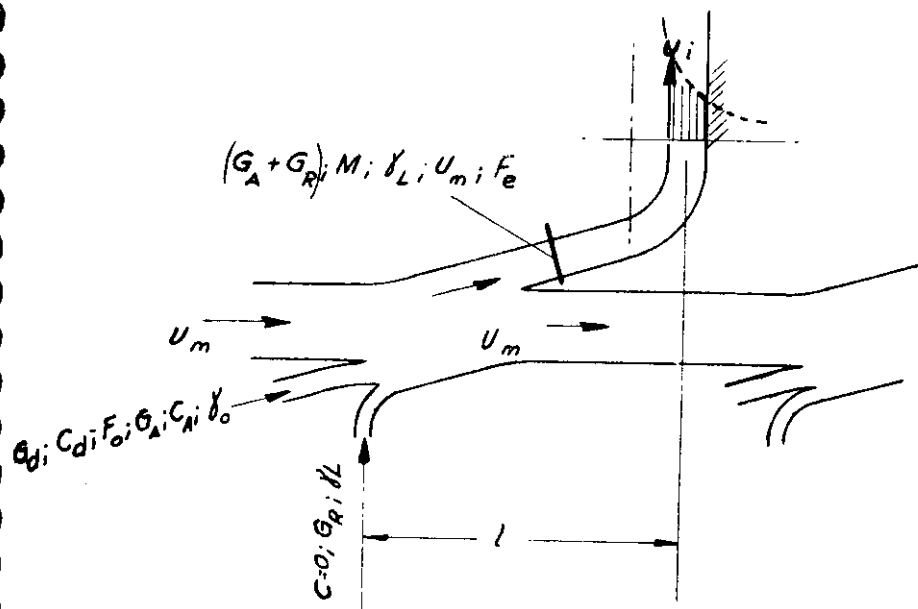
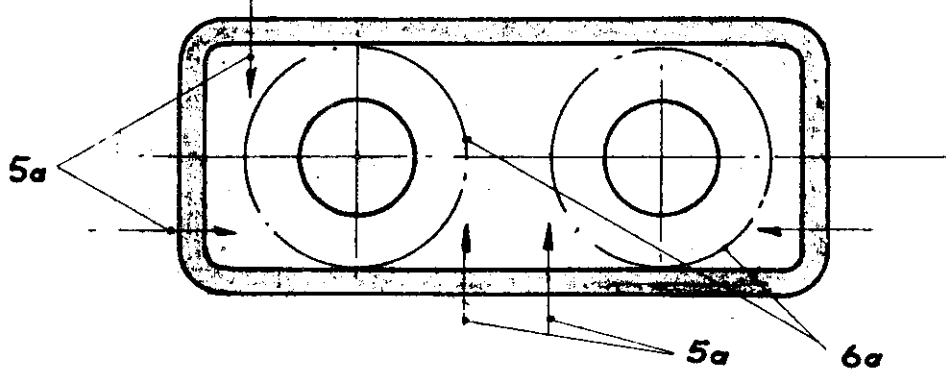
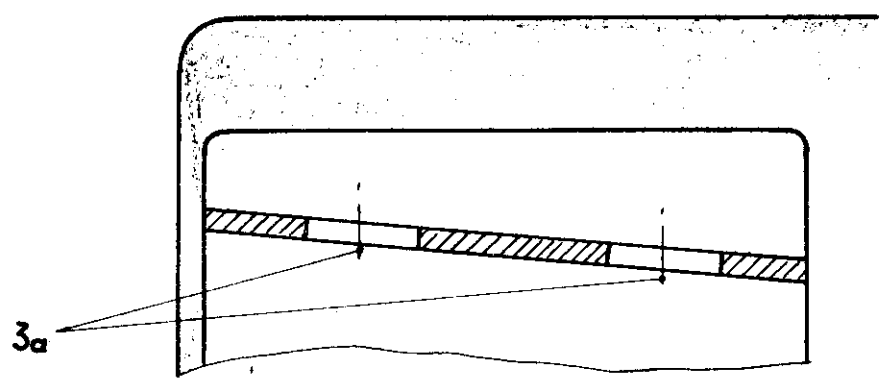
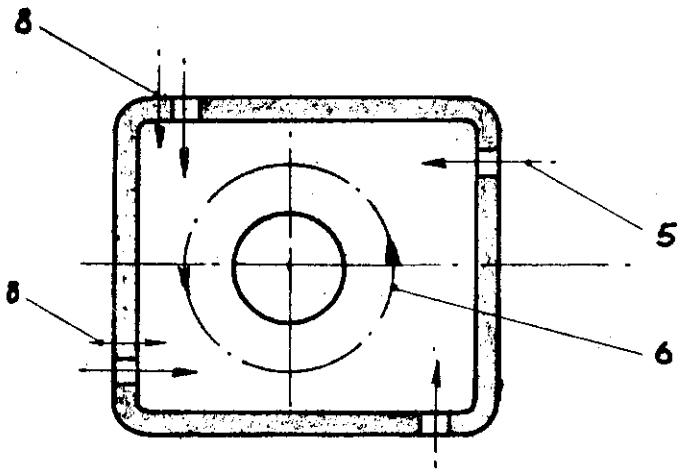
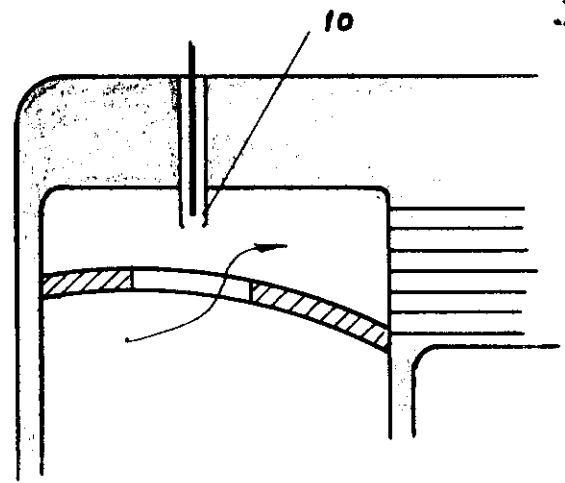
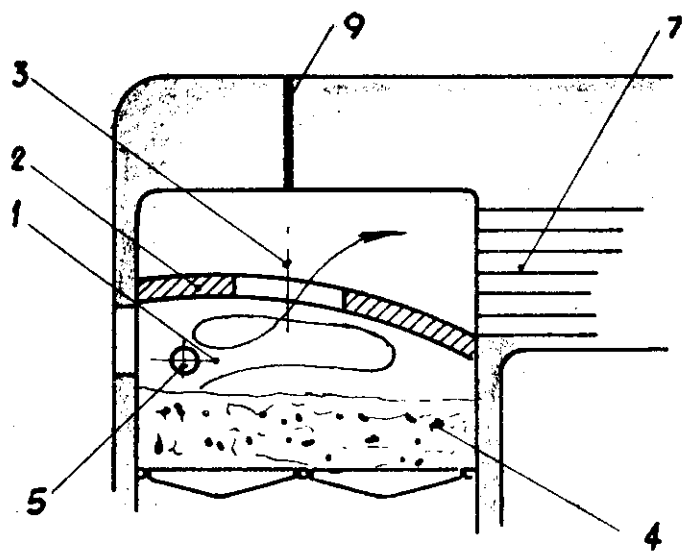
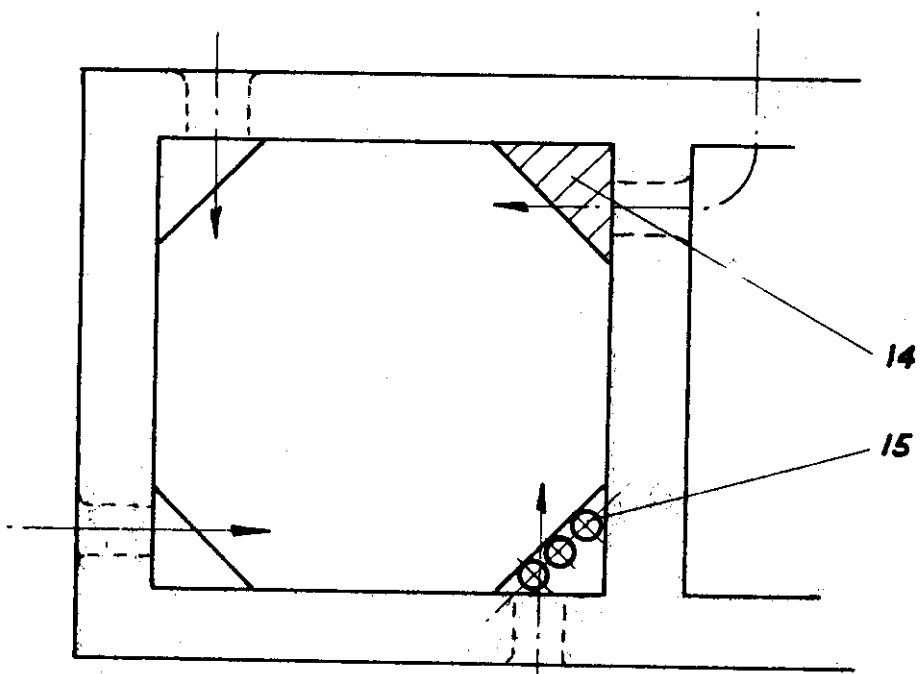
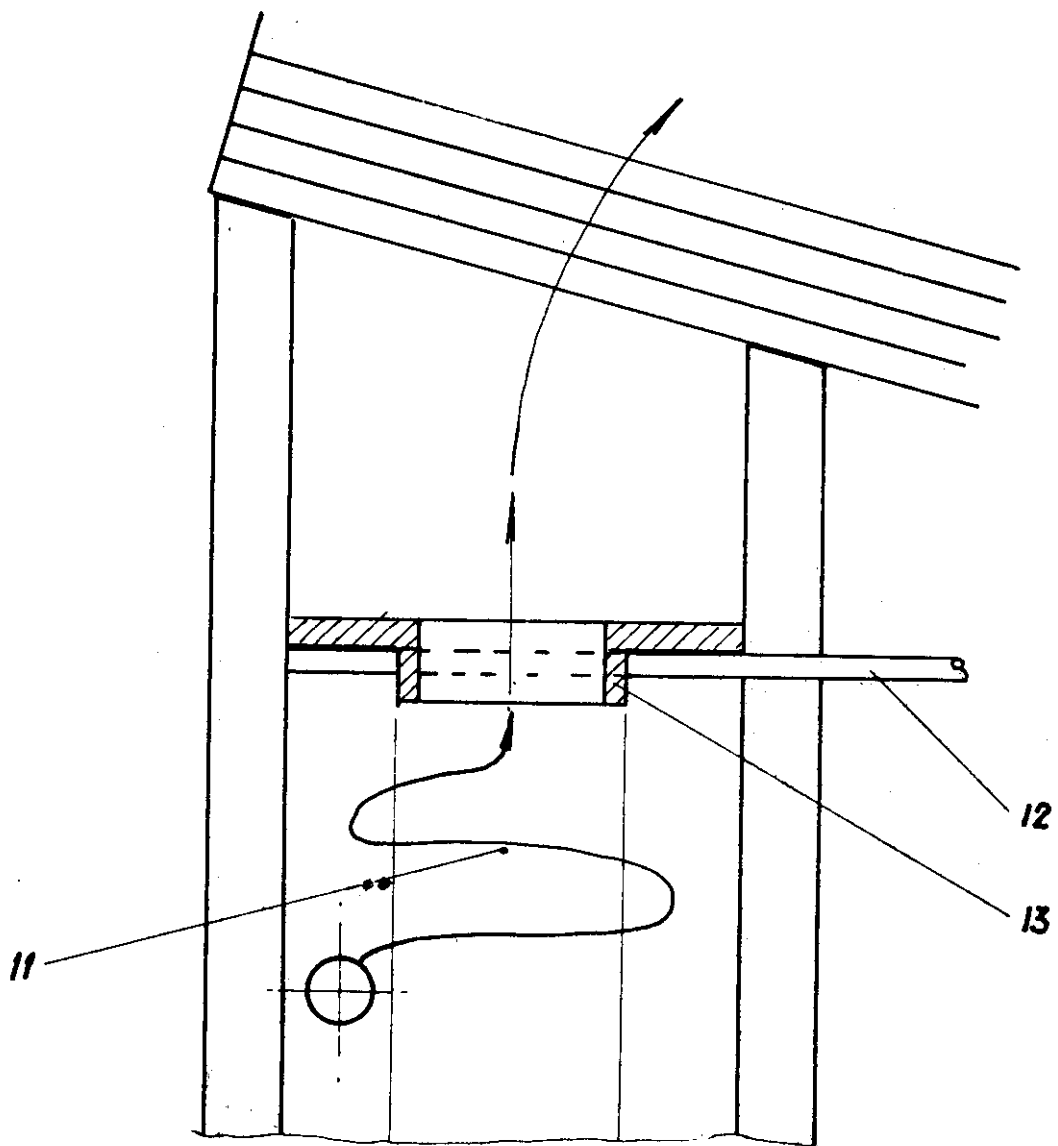


Fig. 4. Esquematzación de la circulación de caudales de gases en el ciclón.





3.- Ejemplo de aplicacion.

Locomotora Krupp C-6-0.

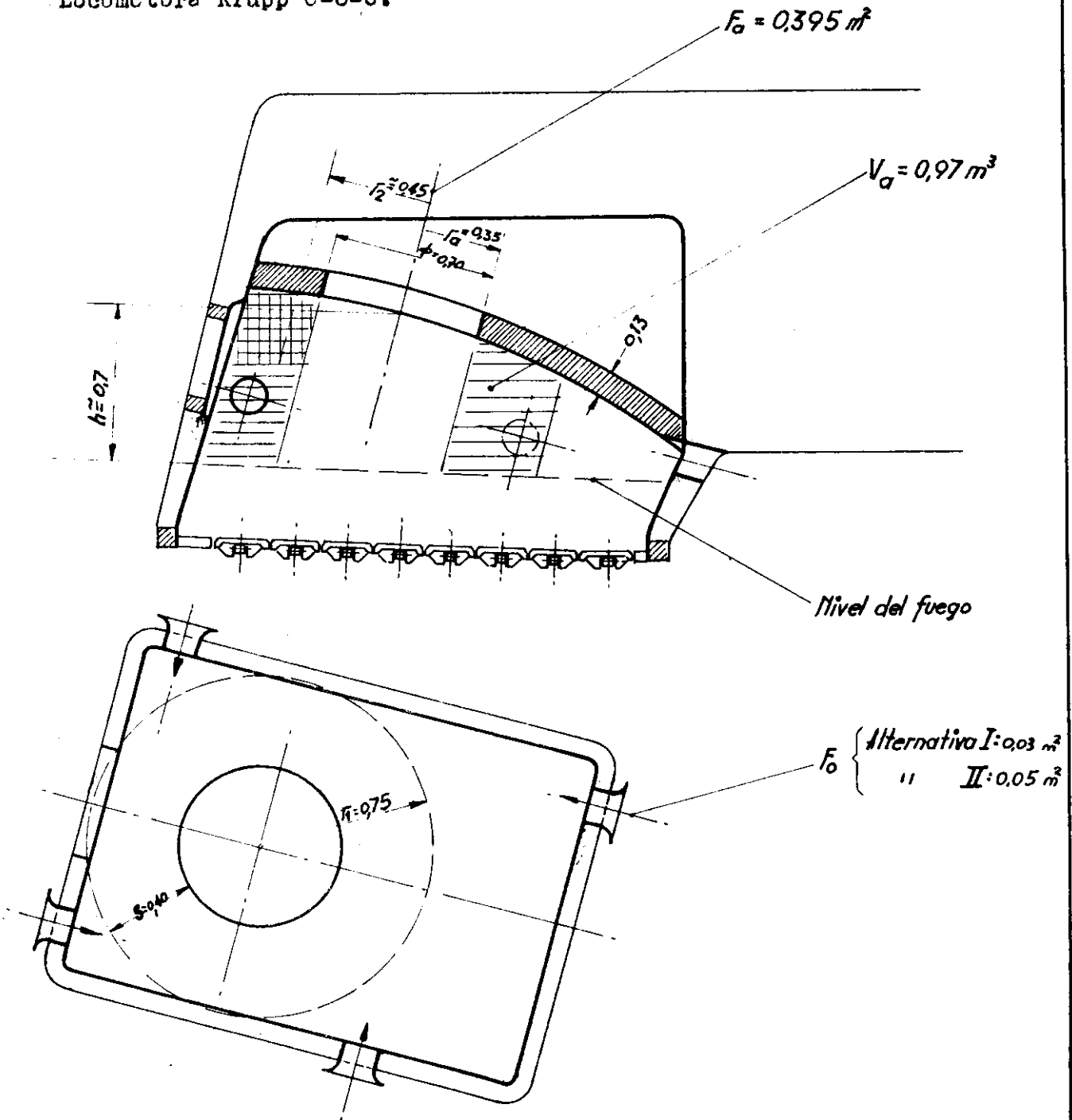


Fig. 7

$$Z = \sqrt{1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2} - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2 \ln \left[\frac{r_a}{r_i} + \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_i}\right)^2 - 1} \right] ; \quad Z = \frac{F_e}{r_e \pi r_a \left(\frac{r_a}{r_i}\right)}$$

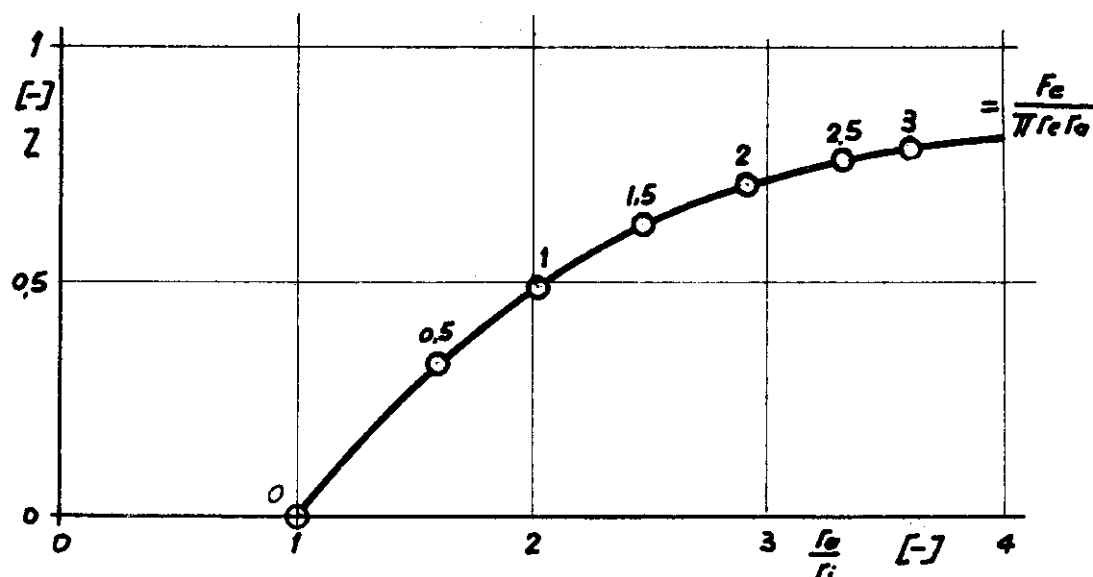


Fig. A

Curva aproximada:

$$Z \cong 0.48 \sqrt{\frac{F_e}{\pi r_e r_a}} = 0.27 \sqrt{\frac{F_e}{r_e r_a}} \quad \text{donde } r_e = \frac{r_i + r_a}{2}$$

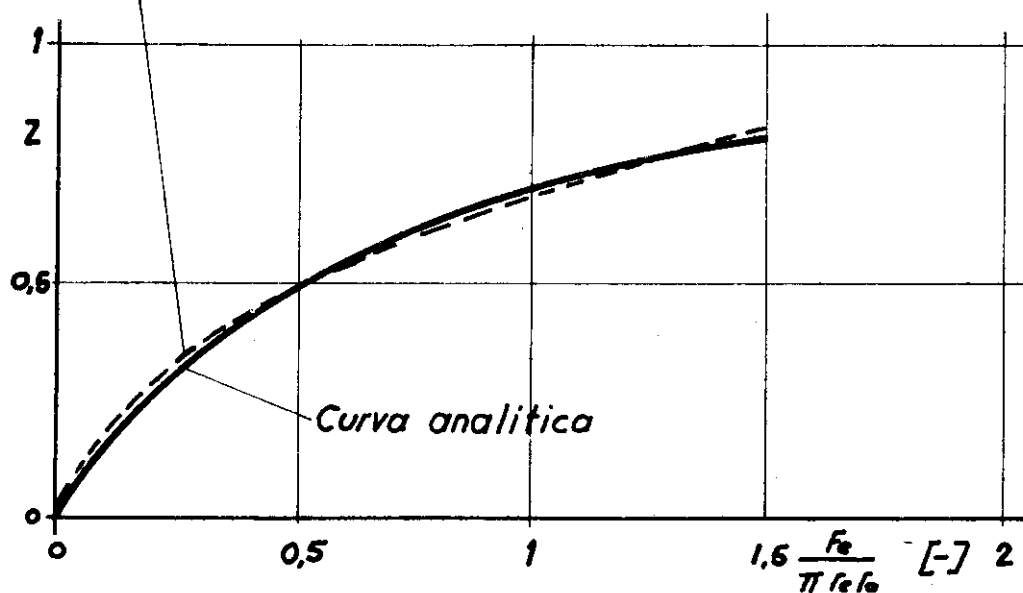


Fig. B

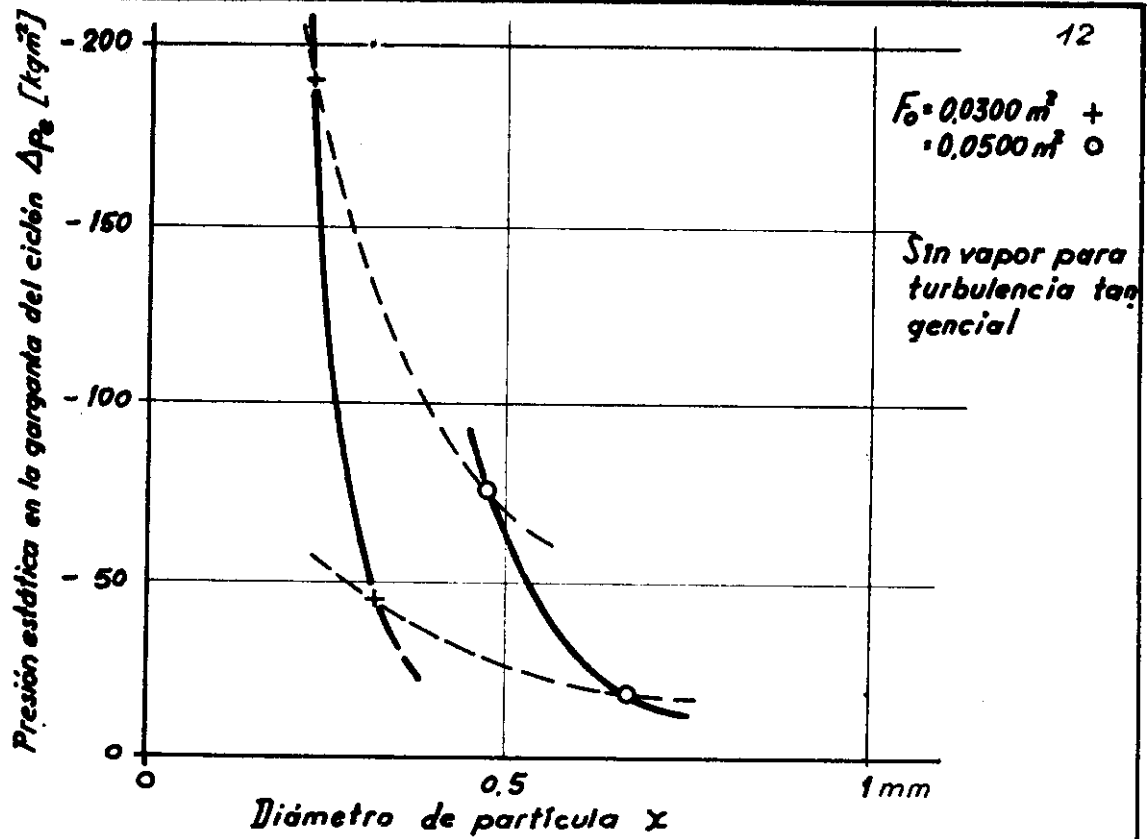


Fig. 9: Tiro necesario sin adición de vapor

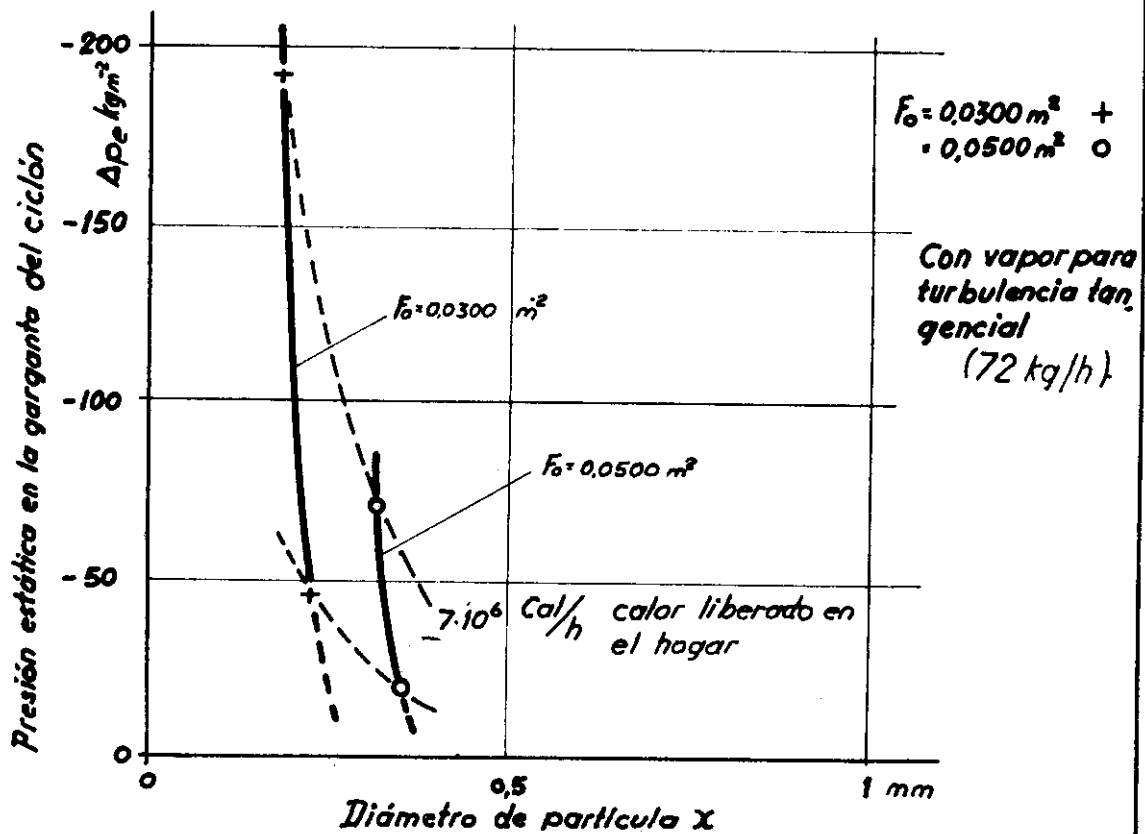


Fig. 10: Tiro necesario con adición de vapor

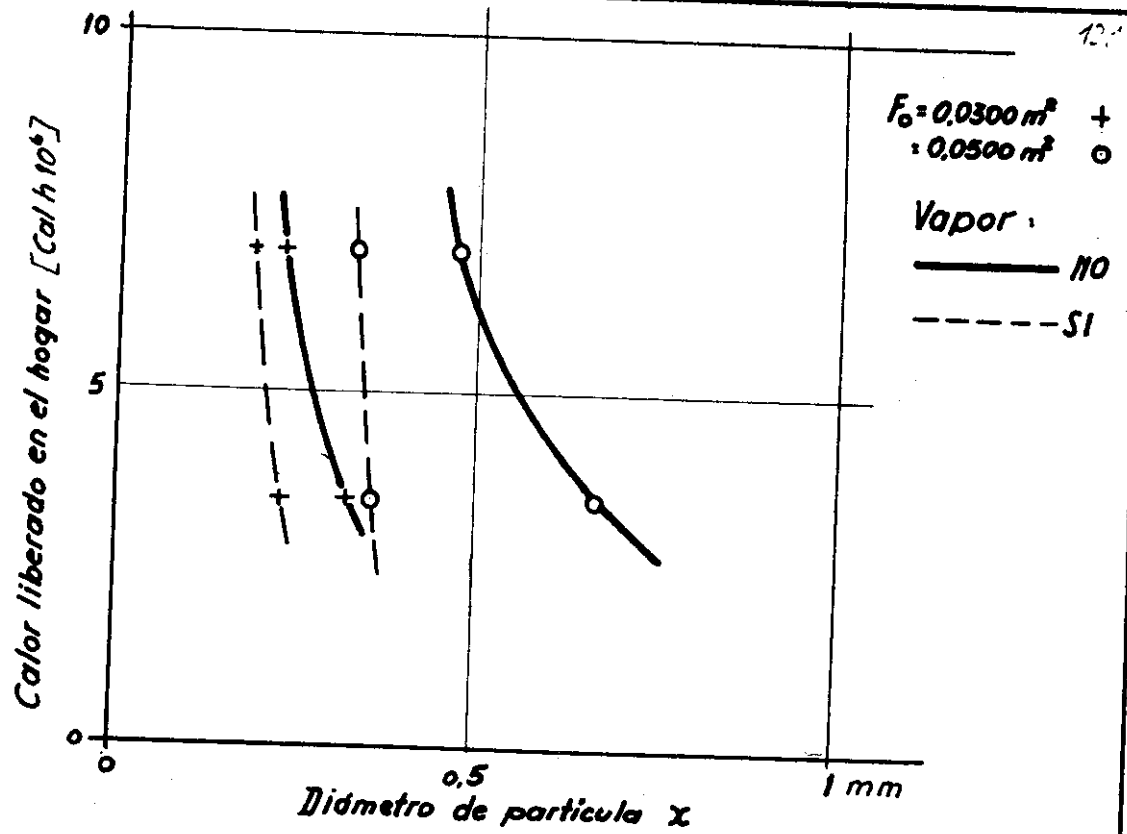


Fig. 11: Efecto de la adición de vapor en el diámetro χ

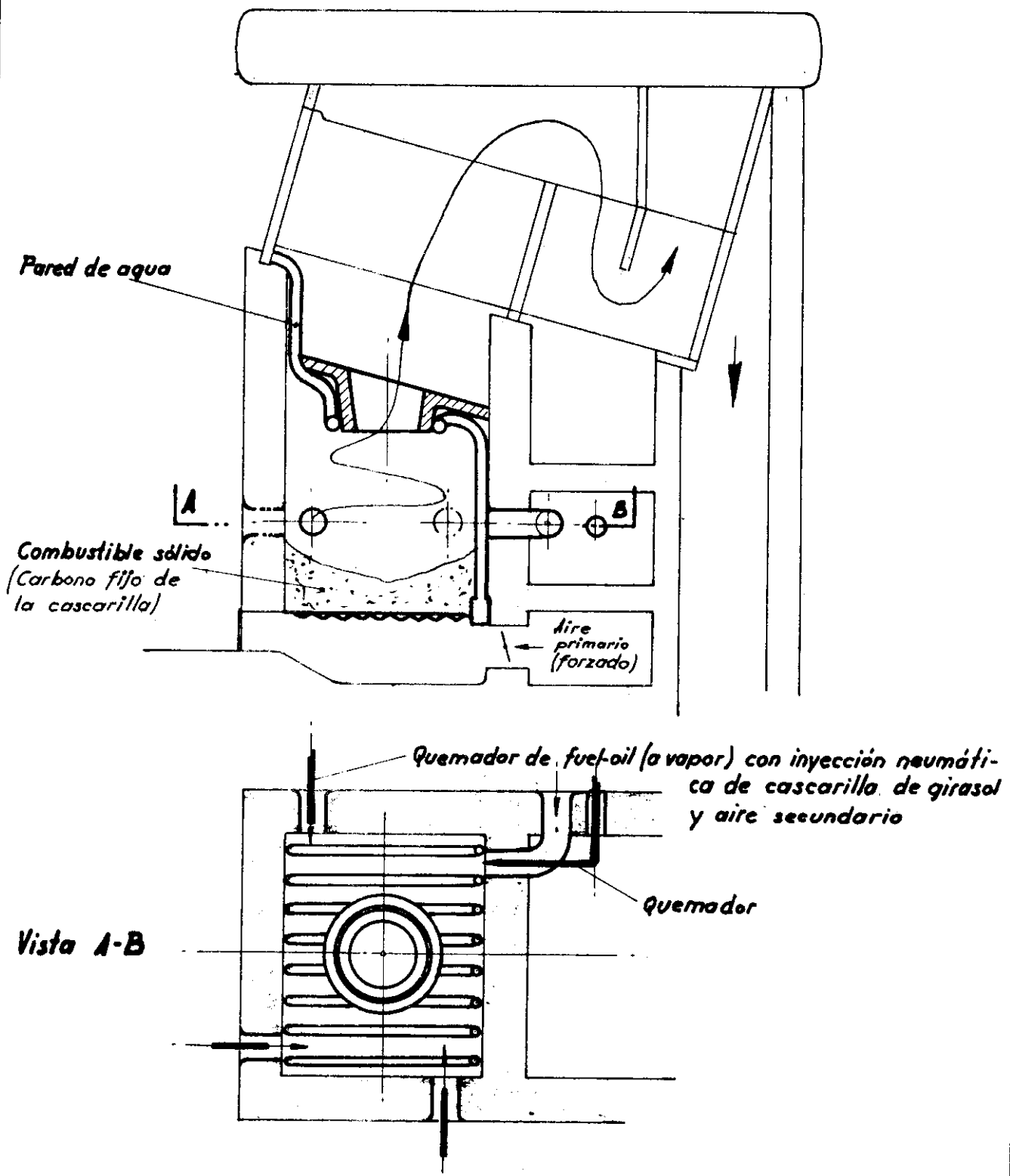


Fig. 12. Ejemplo de caldera fija para quemar cascarilla de girasol