

Procedimiento para el beneficio integral de minerales piríticos	
- Generalidades Titulo: - Aspectos termoquímicos de la Cámara de combustión y del horno de fluosólidos	
Paquete núm.:	
Actividad:	
Fecha: Noviembre 1984	Documento núm.: 9

Autor	Julio González Ludeña
Supervisor	
Jefe Proyecto	Federico Fdez. Tornero

Distribuido a:

50087

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE PIRITAS COMPLEJAS
PLAN GENERALGeneralidades.-

Se trata de crear la estructura calculatoria que fije logros y plantee cuestiones que guiarán la investigación tanto bibliográfica como experimental al ir señalando aquellos puntos en los cuales faltare información para realizar y llenar adecuadamente el modelo matemático que formará la citada estructura. Este modelo se materializará en una serie de ecuaciones y sus correspondientes programas de (mini)ordenador que permitan dar respuesta rápida cumplida y cómoda a los distintos planteamientos que pudieren sugerirse. Para ello se dejarán el mayor número posible de variables y parámetros libres para introducir los valores que se desee y la experiencia aconseje obteniendo así una estructura abierta y flexible para adaptarse a lo que convenga.

Se considerará dividido la totalidad del proceso en operaciones independientes que oportunamente se agruparán en unidades mayores estableciendo un balance material y térmico y ,finalmente, cuando proceda, energético y económico.

En cada operación se irán señalando con números correlativos los distintos puntos que indicarán entradas o salidas de materiales o energías estudiando en cada punto : masas (Kgmol y Kg) y entalpías sensibles y latentes y de formación. Cuando estos conceptos se refieran a la unidad de masa llevarán el subíndice que indique el punto a que corresponden de cada operación o aparato. Si se refieren a la base de cálculo llevarán el subíndice entre paréntesis.

Los programas ,si su envergadura lo permite se efectuarán para miniordenador HP-41CV con lenguaje "científico" y notación polaca inversa. Cuando esto no sea posible se utilizará el "Basic".

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE PIRITAS COMPLEJAS
PLAN GENERAL

Notación.-

Ademas y sin perjuicio de lo que se vaya señalando a lo largo del Plan será, en general:

M_n Masa total (Kgmol) por unidad de peso en el punto "n".
 $M_{(n)}$ id. referido a la base tomada para cada operación o aparato

igualmente y con los mismos subíndices y significado serán:

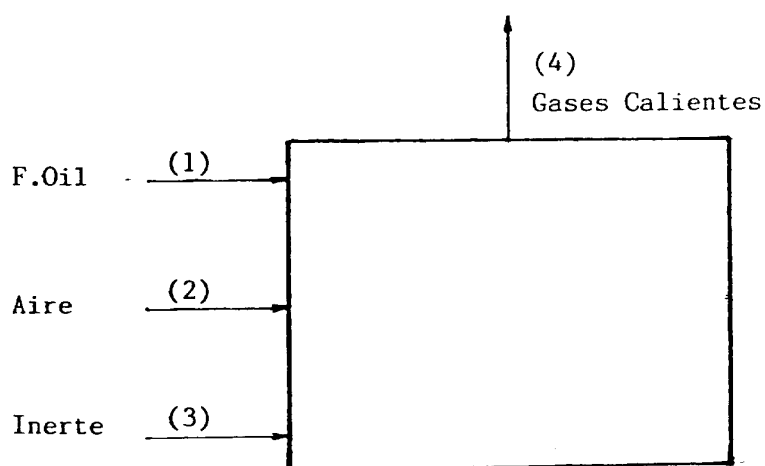
M' Masa en Kgs.
 V Volumen en m^3
 H Entalpia sensible en Kcal/Kgmol referida a 25° C y 1 ata
 H_f Entalpia de formación en Kcal/Kgmol referida a los elementos en su estado natural a 25° C y 1 ata.

APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE PIRITAS COMPLEJAS
PLAN GENERAL

CAMARA DE COMBUSTION

La Cámara de Combustión (en lo sucesivo CC) tiene por misión suministrar al Horno de Fluosólidos (en adelante HF) los gases con la energía térmica necesaria para aportar la que se precisa para las reacciones químicas que allí han de tener lugar.

Se considera como combustible el Fuel Oil nº 1 quemado sin exceso de aire.



BASE: 1 Kg de Fuel Oil nº 1

Composición

	Kgmol Kg F.O.	Kg Kg F.O.
O ₂	0,1026	3,283
N ₂	0,3860	10,816
H ₂ O	0,0092	0,1657

Total Aire hum.	0,4978	14,2647

El vol. a 20 ° C y 1 ata será:

$$V_{(2)} = 11,97 \text{ m}^3/\text{Kg F.O.}$$

Si Cp :

O ₂	$8,27 + 2,58 \cdot 10^{-4} T - 1,877 \cdot 10^{-5} T^{-2}$	Kcal/Kgmol ° K	
N ₂	$6,50 + 1 \cdot 10^{-3} T$	"	(2)
H ₂ O (g)	$8,22 + 1,5 \cdot 10^{-4} T + 1,34 \cdot 10^{-6} T^2$	"	

El programa "CALMOL" nos da para la mezcla:

$$C_p = 6,897 + 8,31 \cdot 10^{-4} T - 3,869 \cdot 10^{-4} T^{-2} + 2,48 \cdot 10^{-8} \text{ Kcal/Kgmol.}^\circ \text{ K} \quad (3)$$

y Cp medio 20-25° C $\bar{C}_p = 6,71 \text{ Kcal/Kgmol}^\circ \text{ C}$

y para H₍₂₎ = - 17 Kcal/Kg F.O.

Si para H₂O (g) es Hf = - 57.798 Kcal/Kgmol será:

$$Hf_{(2)} = - 532 \text{ Kcal/Kg F.O.}$$

P.(3) INERTE

Se supone una composición del gas inerte como la que produce la combustión del F.O. con k=1 es decir como serian los gases de cola de la instalación de condensación de azufre.

Esta composición sería:

	por Kg F.O.	
	Kgmol	Fracc. mol
CO ₂	0,07077	0,1337
H ₂ O	0,07148	0,1351
SO ₂	0,000842	0,0016
N ₂	0,38602	0,7296

Total	0,52911	1,0000

La cantidad de gas inerte debe ser tal que produzca en (4) la temperatura deseada. Sea esta cantidad "g" Kgmol/Kg F.O. Si :

$$\begin{array}{lll}
 \text{CO}_2 & C_p = 10,34 + 2,74 \cdot 10^{-3} T - 1,95 \cdot 10^5 T^{-2} & \text{Kcal/Kgmol.}^\circ\text{K} \\
 \text{H}_2\text{O (g)} & C_p = 8,22 + 0,15 \cdot 10^{-3} T + 1,34 \cdot 10^{-6} T^2 & \text{"} \\
 \text{SO}_2 & C_p = 7,70 + 5,30 \cdot 10^{-3} T - 0,83 \cdot 10^{-6} T^2 & \text{"} \\
 \text{N}_2 & C_p = 6,5 + 0,001 T & \text{"}
 \end{array} \quad (4)$$

"CALMOL" da para la mezcla :

$$C_p = 7,25 + 1,13 \cdot 10^{-3} T - 26138 T^{-2} + 1,8 \cdot 10^{-7} T^2 \quad \text{Kcal/Kgmol.}^\circ\text{K} \quad (5)$$

resulta entonces para :

$$H_{(3)} = g(7,25 T_3 + 5,63 \cdot 10^{-4} T_3^2 + 0,6 \cdot 10^{-7} T_3^3 + 26138 T_3^{-1} - 2300) \quad \text{Kcal/Kg F.O.} \quad (6)$$

Por otra parte tendremos :

$$\text{CO}_2 \quad H_f = - 94.052 \quad \text{Kcal/Kgmol}$$

$$\text{H}_2\text{O (g)} \quad H_f = - 57.798 \quad \text{"}$$

$$\text{SO}_2 \quad H_f = - 70.960 \quad \text{"}$$

El programa "CALFOR" nos da para la mezcla:

$$H_{f(3)} = - 20497 \text{ g} \quad \text{Kcal/Kg F.O.}$$

El volumen sería:

$$V_{(3)} = 0,082 \text{ g} T_3 \quad \text{m}^3/\text{Kg F.O.}$$

P (4) GASES CALIENTES

Estarán formados por los productos de la combustión del F.O. mas los gases inertes .Es decir serán siempre con k=1:

CO ₂	0,07077	+	0,1337 g	Kgmol/Kg F.O.	
H ₂ O	0,07148	+	0,1351 g	"	
SO ₂	0,000842	+	0,0016 g	"	(7)
N ₂	0,38602	+	0,7296 g	"	
Total	0,52911	+	1,000 g	Kgmol/Kg F.O.	

Si $k > 1$ y $k-1=e$ además de los relacionados, los gases contendrán:

O ₂	0,1026 e	Kgmol/Kg F.O.	
N ₂	0,3860 e	"	(8)
H ₂ O	0,0092 e	"	
Tot.	0,4978 e	Kgmol/Kg F.O.	

Puesto que la composición es la misma que en P(3) la entalpia será, si la temperatura es T_4 :

$$H_{(4)} = (0,52911 + g)(7,25 T_4 + 5,63 \cdot 10^{-4} T_4^2 + 0,60 \cdot 10^{-7} T_4^3 + 26,138 T_4^{-1} - 2.300) \quad (9)$$

Kcal/Kg F.O.

Por otra parte tendremos para Hf:

CO ₂	- 94.052 (0,07077 + 0,1337 g)	= - (6.656 + 12.575 g)	Kcal/Kg F.O.
H ₂ O	- 57.798 (0,07148 + 0,1351 g)	= - (4.131 + 7.808 g)	" (10)
SO ₂	- 70.960 (0,000842 + 0,00016 g)	= - (60 + 114 g)	"

$$Hf_{(4)} = - (10.847 + 20.497 g) \quad \text{Kcal/Kg F.O.}$$

Si $K > 1$ y $e = k-1$ resultaría para el exceso de aire:

$$H_{(4)e} = e(3,435 T_4 + 2,07 \cdot 10^{-4} T_4^2 + 4,20 \cdot 10^{-9} T_4^3 + 19,259 T_4^{-1} - 1107) \quad (11)$$

$$Hf_{(4)e} = - 532 e$$

El volumen sería : $V_{(4)} = (0,04339 + 0,082 g) T_4 \quad m^3/Kg \text{ F.O.} \quad (12)$

y para el exceso de aire: $V_{(4)e} = 0,04082 e T_4 \quad " \quad (13)$

BALANCE TERMICO DE LA CAMARA DE COMBUSTION

Si P son las pérdidas de calor de la Cámara de Combustión expresadas como fracción del P.C.I. del combustible resulta:

Entradas

$$\begin{array}{ll}
 p(1) & 9.600 + 0,42t_1 - 10,5 = t_1 = 60^\circ\text{C} & 9.614,7 & \text{Kcal/Kg F.O.} \\
 p(2) & & - 17,0 & " \\
 p(3) & g(7,25 T_3 + 5,63 \cdot 10^{-4} T_3^2 + 0,60 \cdot 10^{-7} T_3 + 26.138 T_3^{-1} - 2.300) & & "
 \end{array}$$

Salidas

$$\begin{array}{ll}
 p(4) & (0,52911 + g)(0,25 T_4 + 5,63 \cdot 10^{-4} T_4^2 + 0,60 \cdot 10^{-7} T_4^3 + \\
 & + 26.138 T_4^{-1} - 2.300) & & "
 \end{array}$$

Pérdidas 9.600 P

Llamando H_3 al paréntesis dep(3) y H_4 al 2º paréntesis dep(4) se encuentra:

$$\varepsilon_p = \frac{9.597,7 - 0,52911 H_4 - 9.600 P}{H_4 - H_3} \quad (14)$$

Se ha hecho una estimación a grosso modo de las pérdidas (Anexo 1) y resulta $P = 0,0015$. Sustituyendo este valor en (14) resulta:

$$\varepsilon_o = \frac{9.583,3 - 0,52811 H_4}{H_4 - H_3} \quad (15)$$

Se adjunta el Programa "CACOMB" que permite calcular $H_3, H_4, H_{(3)}, H_{(4)}, g, H_{f(4)}, M'_{(4)}$ y $V_{(4)}$. Como el valor de g calcula el programa es el correspondiente al valor $P = 0,0015$ calcula también finalmente la corrección a hacer en el valor de g si las pérdidas fuesen distintas de las supuestas.

Se adjunta también una colección de gráficos representando las principales funciones citadas.

Estimación aproximada de las Pérdidas de Calor
en la Cámara de Combustión

En una cámara de combustión para Fuel Oil se pueden quemar hasta 2 ton/m³.hr. Tomando solamente la mitad serían 10⁷ Kcal/hr. y sobre la base de unas 5 ton/hr de pirita y un consumo de 125 Kg F.O./ton.pir. la cámara de combustión tendría 0,625 m³ y supuesta cúbica tendría 0,855 m. de lado interiormente y una superficie exterior de 16,4 m² considerando incluso las 6 caras.

Con una pérdida específica de 10 Kcal/m².hr.°C y suponiendo una temperatura de la superficie exterior de 60° C las pérdidas serían ,con temperatura ambiente e 15° C:

$$16,4 \times 10 \times (60-15) = 7.380 \text{ Kcal/hr.}$$

Si la temperatura interior fuese 1.200 °C y una pared de 0,4 m. la superficie interior sería 4,39 m² y la transmisión de calor de la pared sería :

$$k = \frac{7.380 \times 0,4}{10,4 \times (1200-60)} = 0,25$$

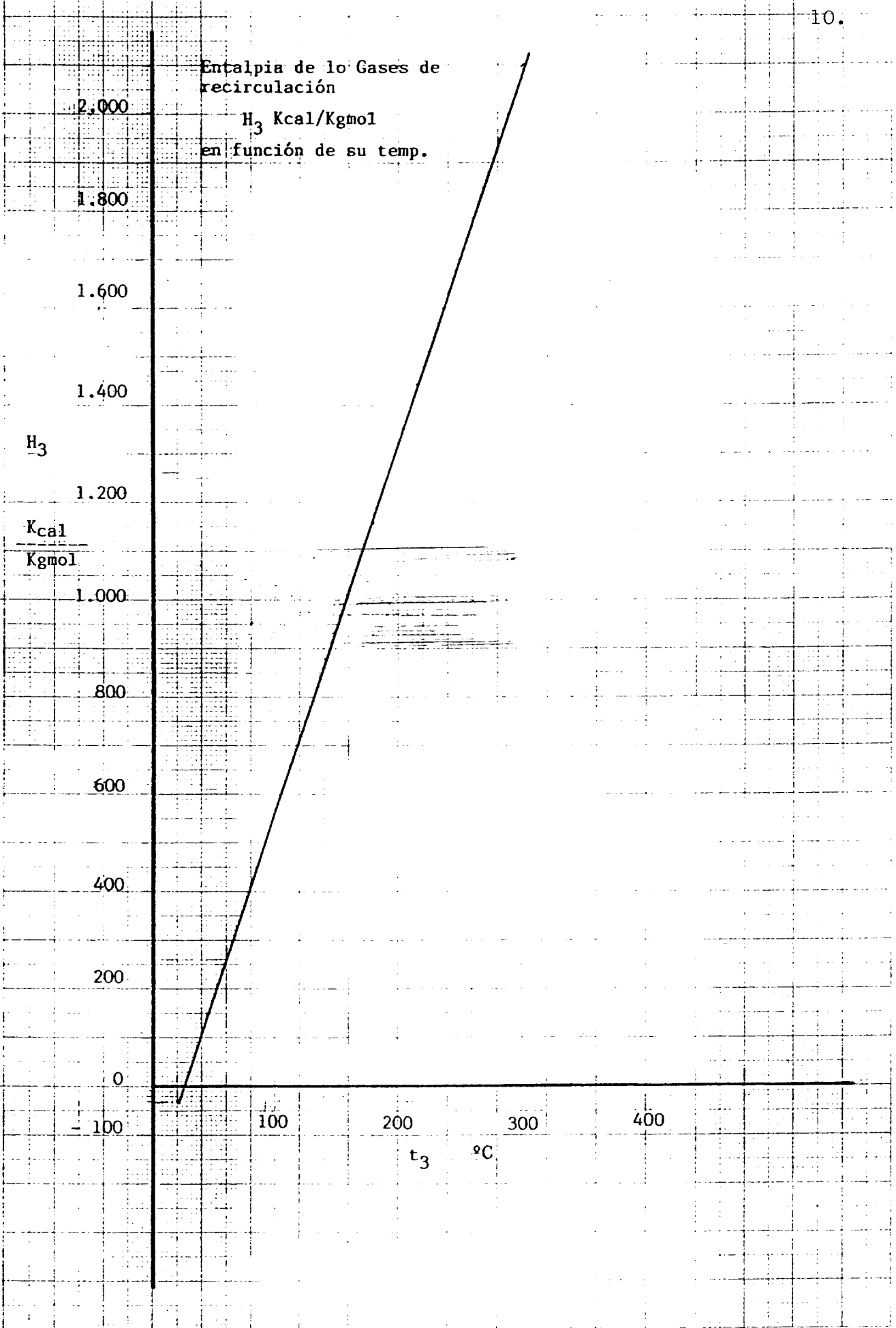
que viene a ser alcanzable con una combinación de refractario y aislante.

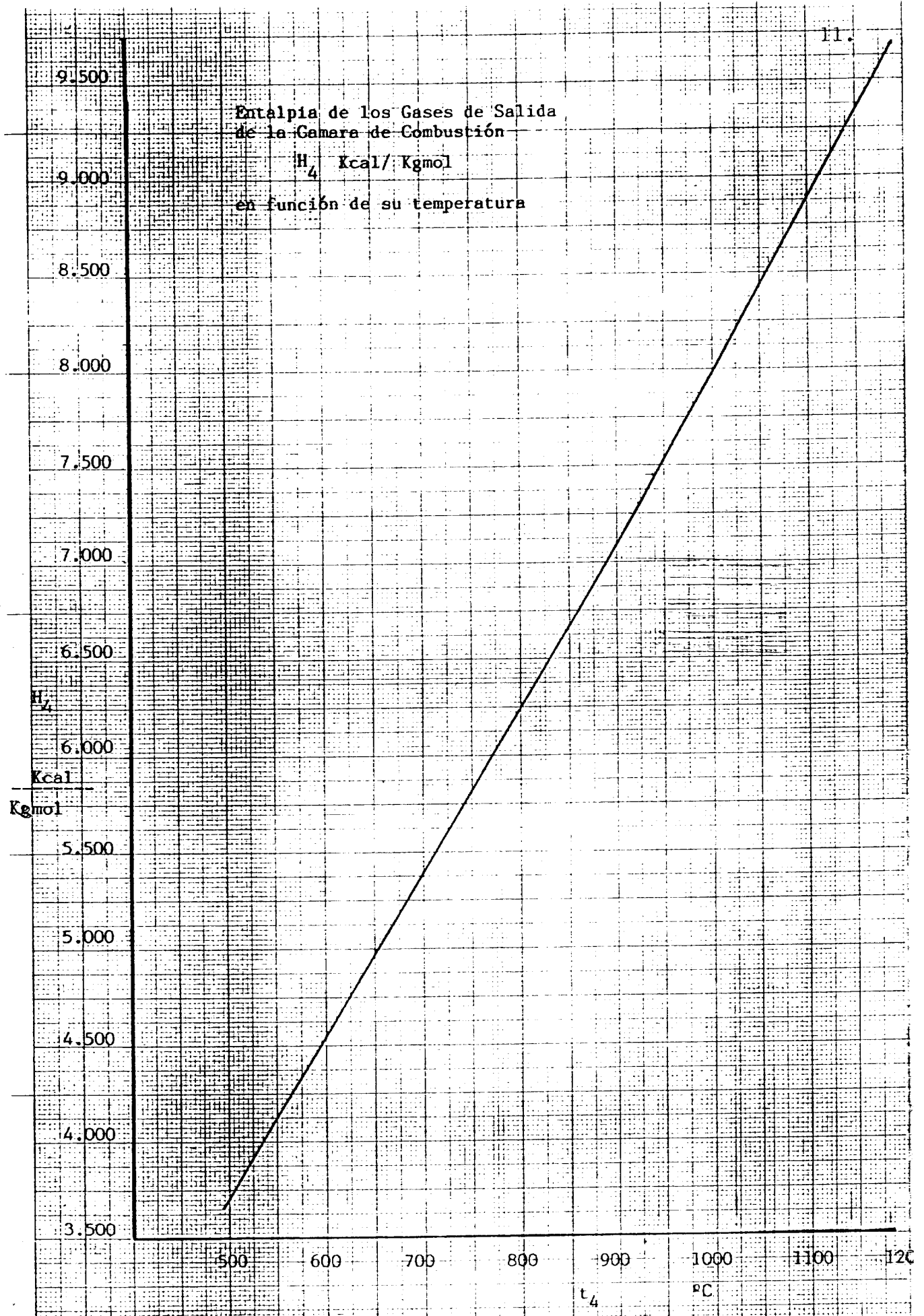
Se acepta pues como primera aproximación $P = 0,0015$.

No obstante se ha calculado una corrección a añadir a g_0 para el caso de que las pérdidas $P \neq 0,0015$:

$$A_p = \frac{14,4 - 9.600 P}{H_4 - H_3} \quad (16)A1$$

$$g_p = g_0 + A_p$$





Masa de los Gases de salida de la Cámara de Combustion:

$M_{(4)}$ Kg/Kg F.O.

66

62

58

54

50

46

42

38

34

30

26

750

800

850

900

950

1000

1050

1100

1150

1200

t_4

temperatura de los Gases de recirc. t_p °C

0

20

40

60

80

100

120

140

160

180

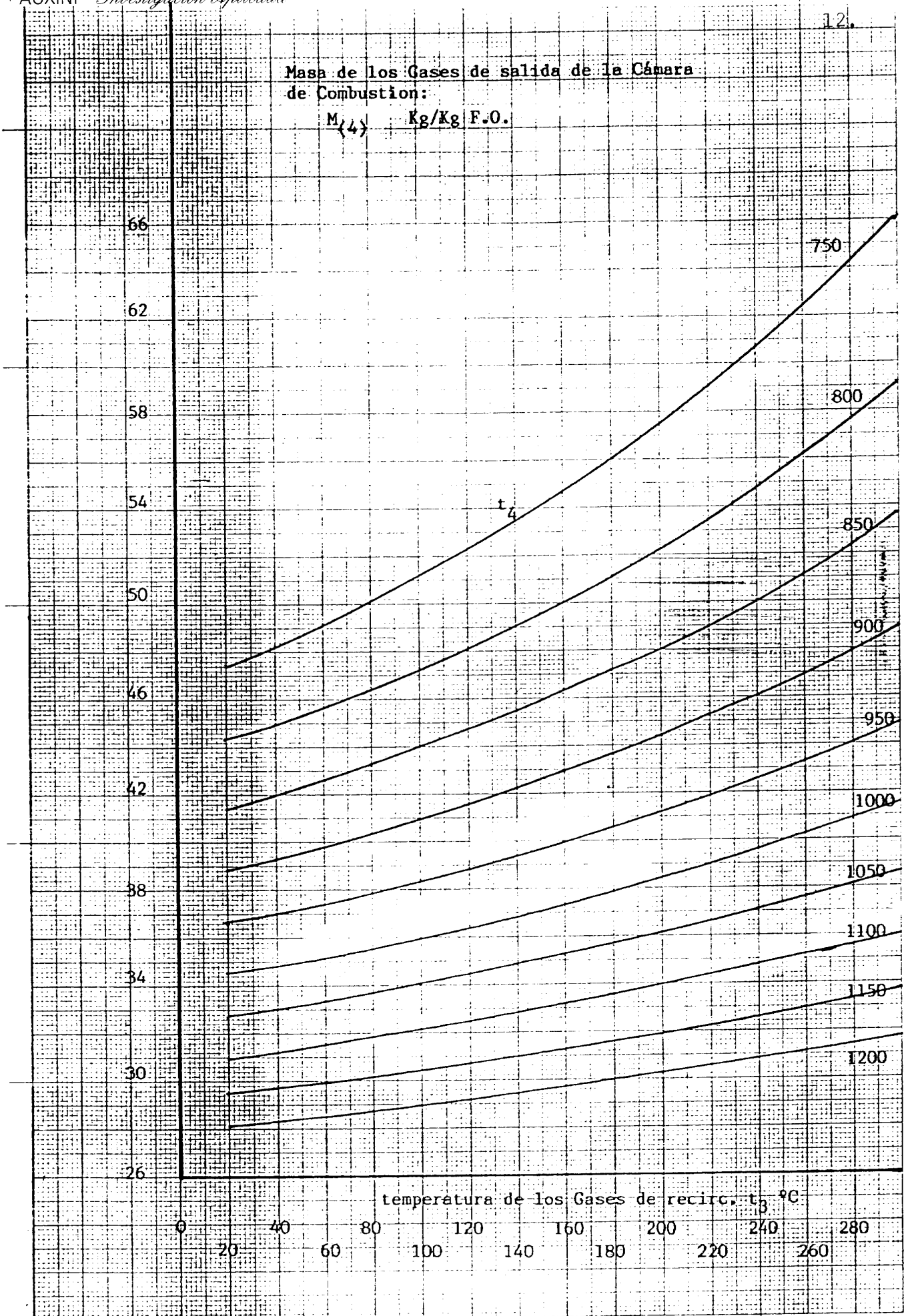
200

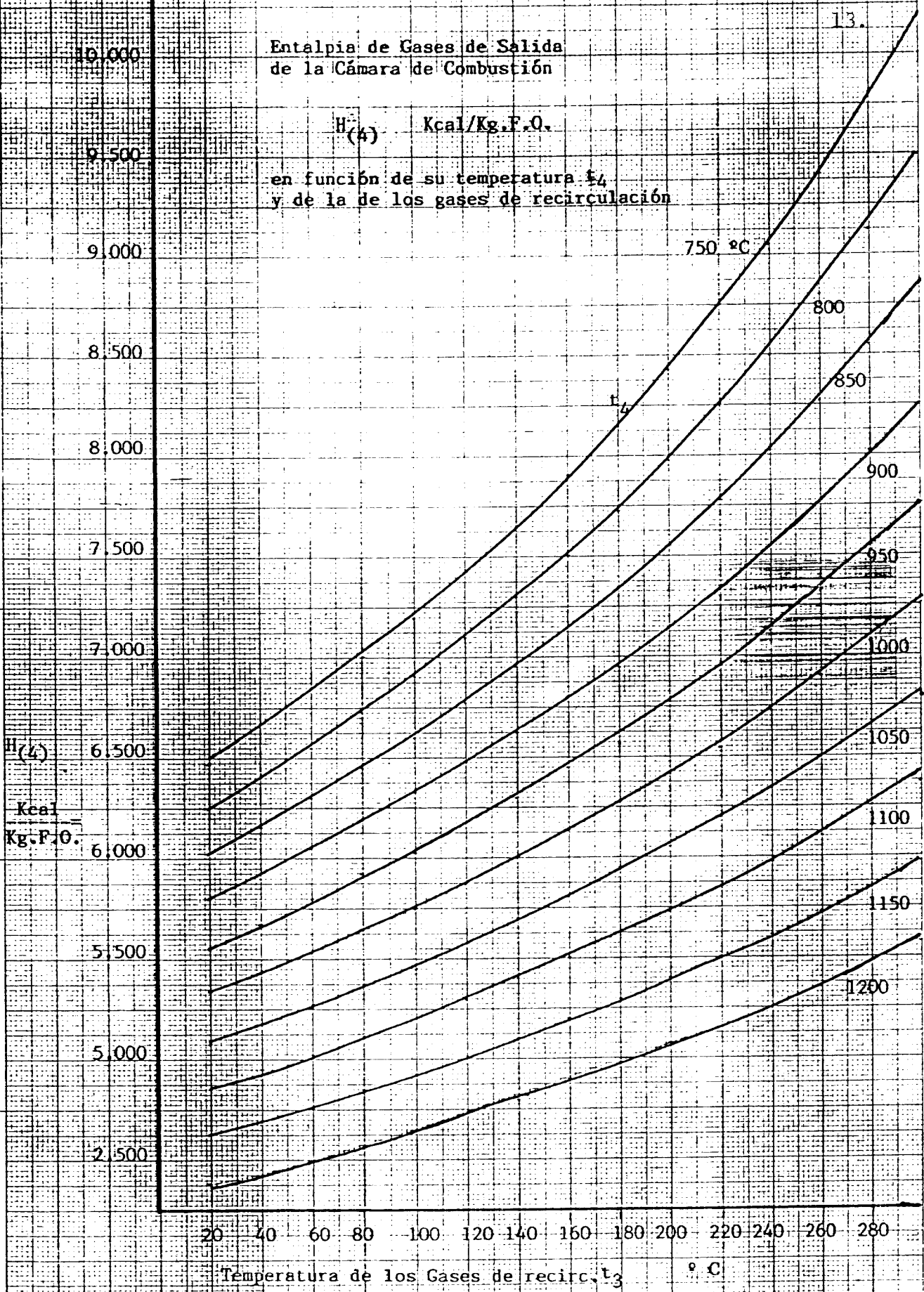
220

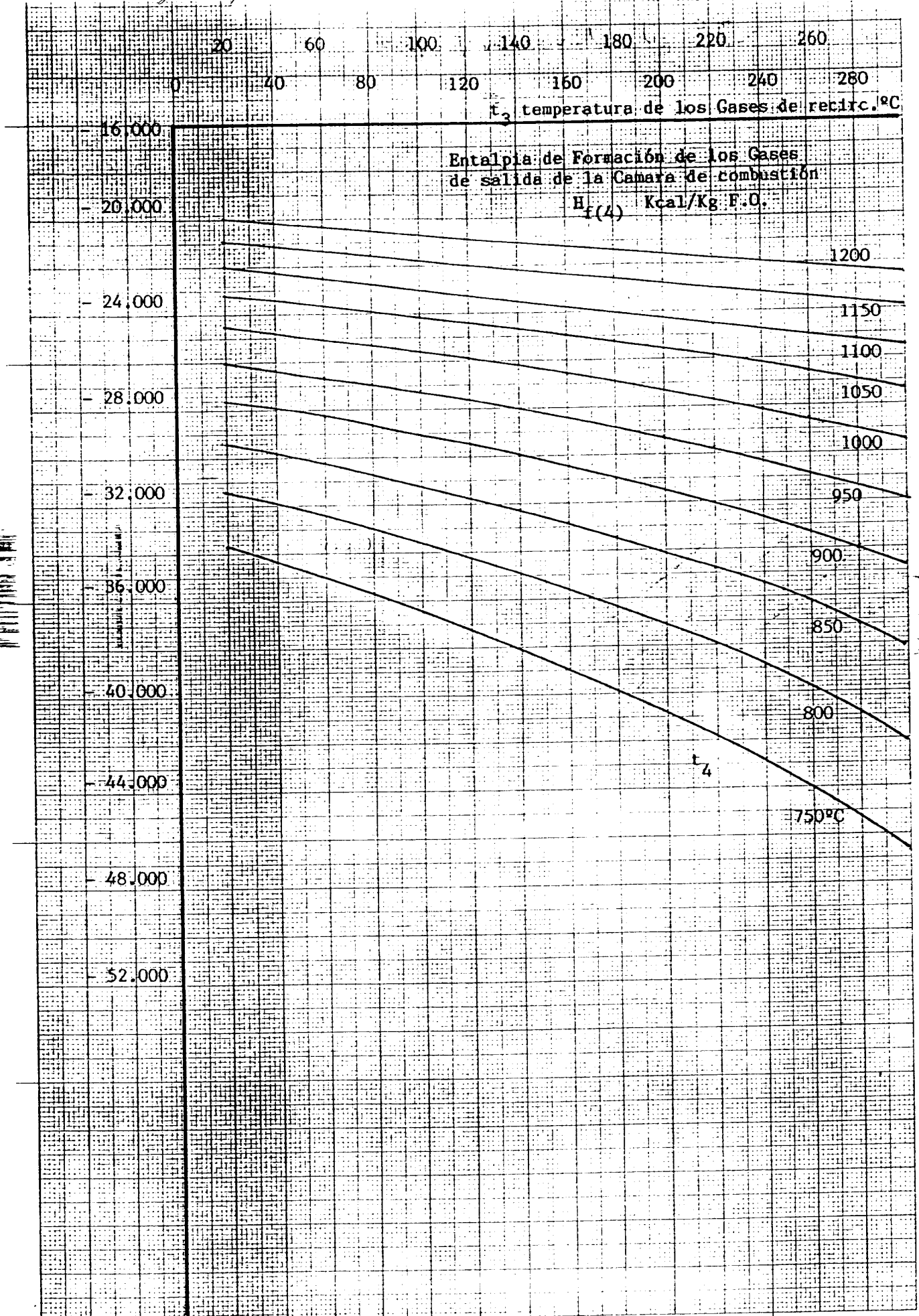
240

260

280

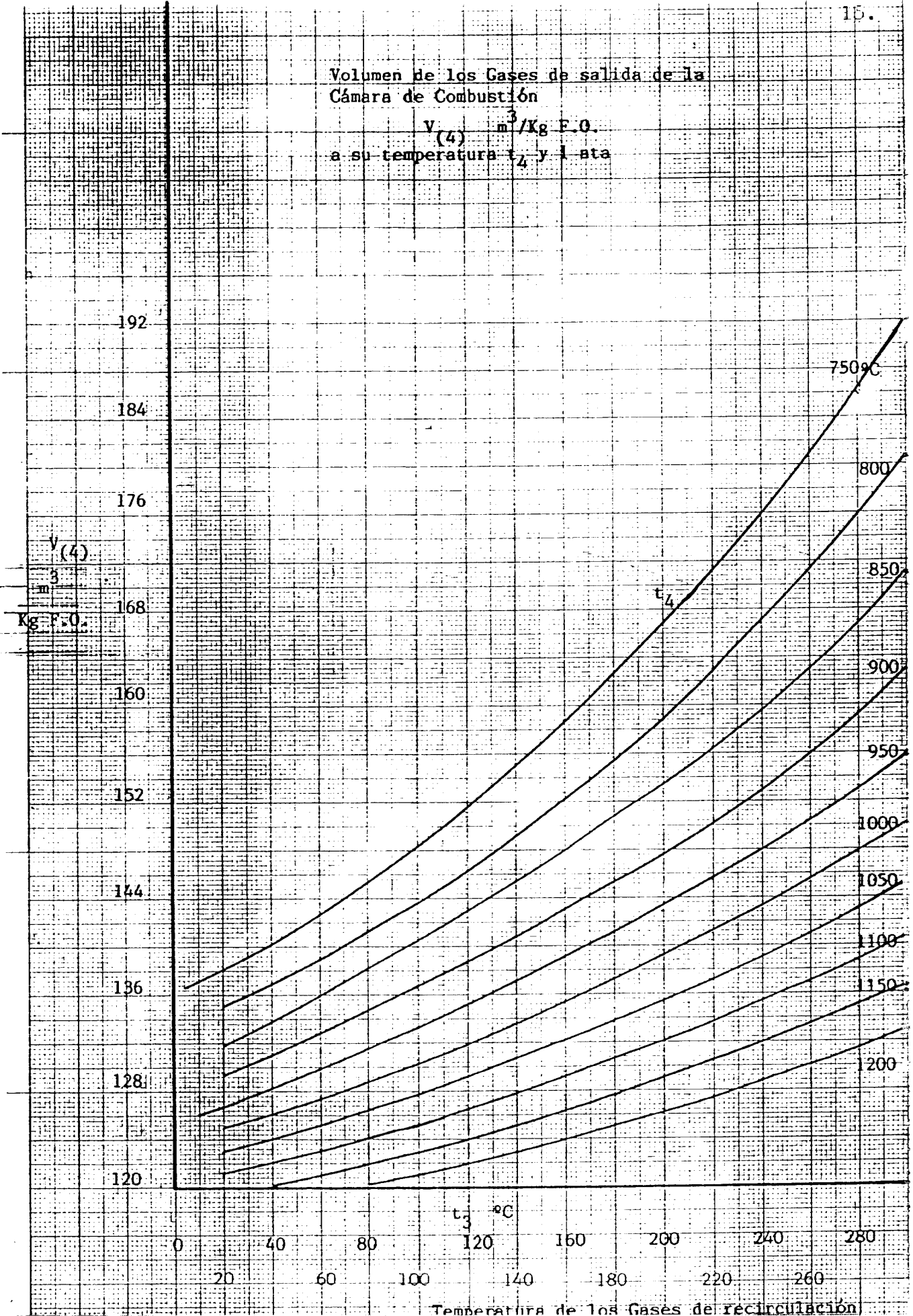






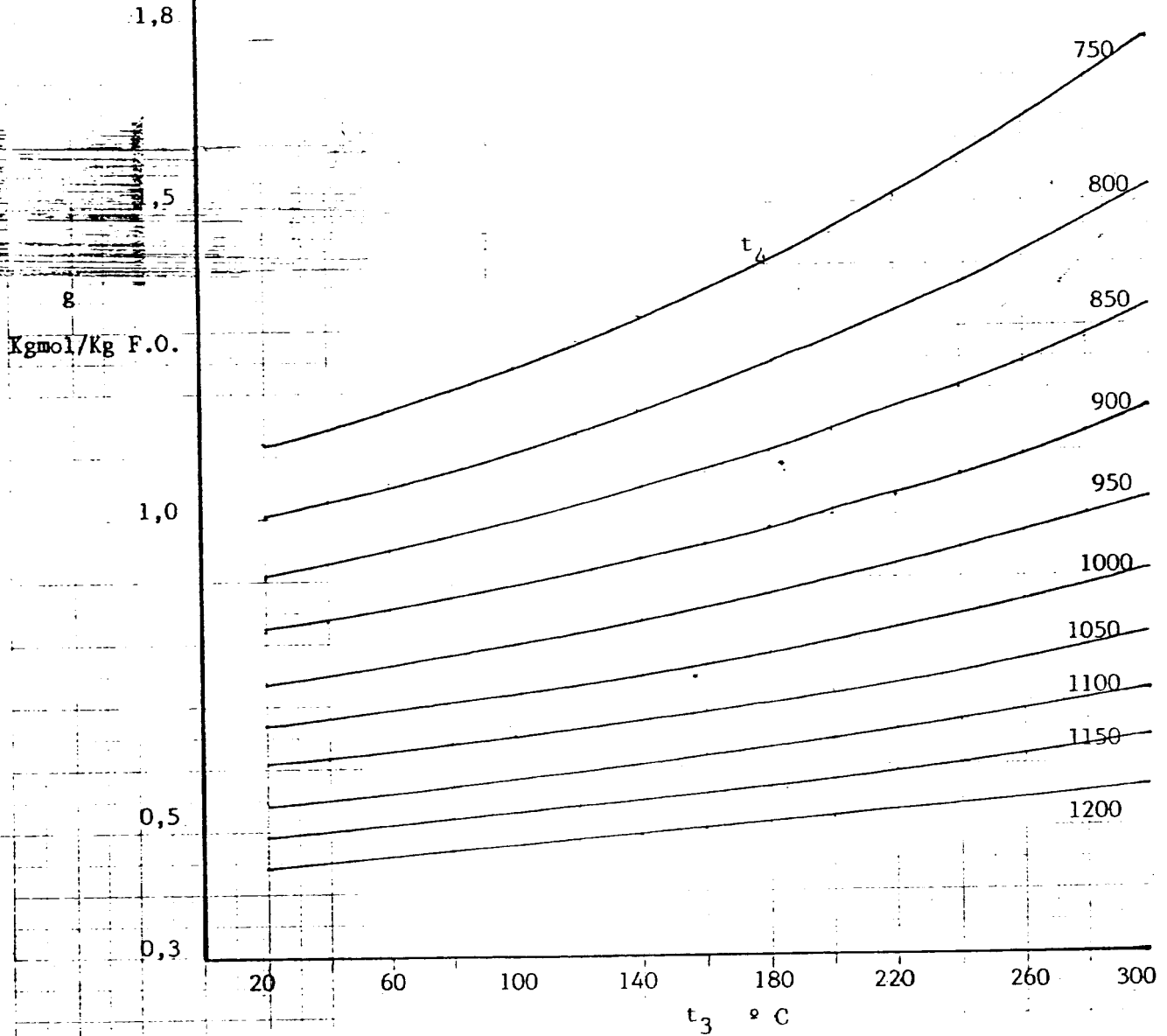
Volumen de los Gases de salida de la
Cámara de Combustión

$V_{(4)} \text{ m}^3/\text{Kg F.O.}$
a su temperatura t_4 y 1 ata



Recirculación de Gases inertes
entrada a la Cámara de Combustión

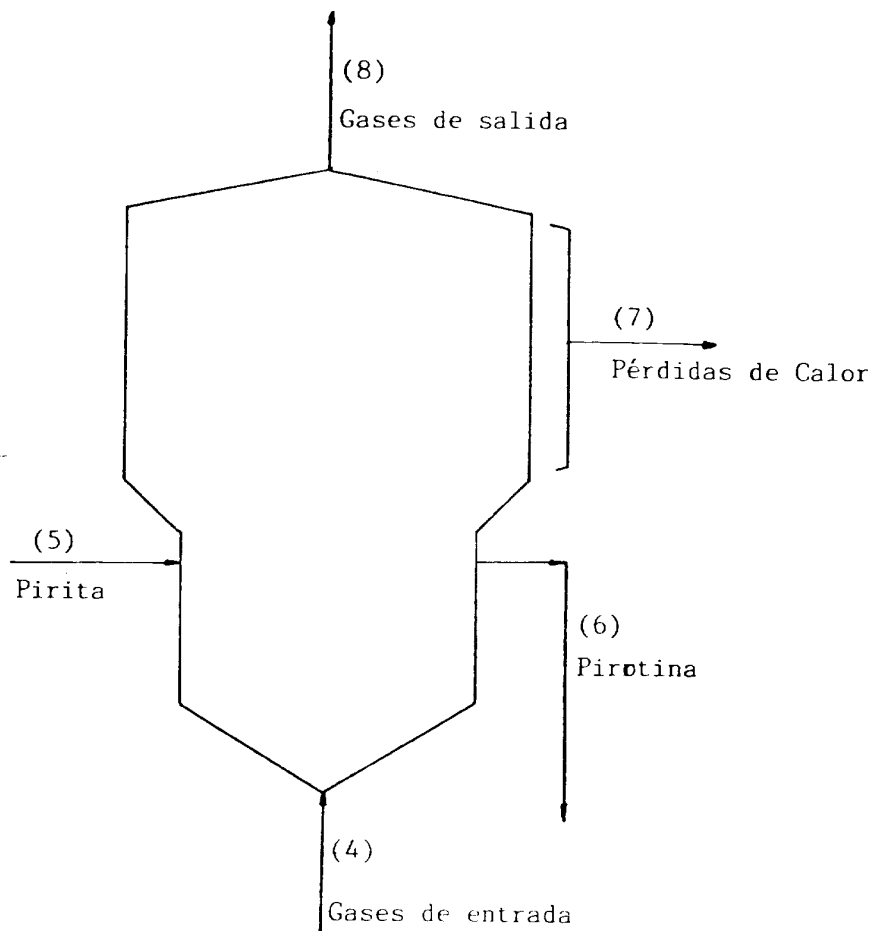
g Kgmol/ Kg F.O.



APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE PIRITA COMPLEJAS

PLAN GENERAL

HORNO FLUOSOLIDOS



BASE: 1 ton. de pirita compleja de la composición especificada en P.(5)

P.(4) GASES DE ENTRADA

Corresponden su masa y características al P.(4) de CC pero al cambiar de base vendrían multiplicadas todas por $G = \text{Kg de F.O./ton pirita}$:

$$M_{(4)} = G(0,52911 + g) \text{ Kgmol/ton pir. (1)} \quad M'_{(4)} = G(15,273 + 28,864g) \text{ Kg/ton pir. (2)}$$

$$H_{(4)} = G(0,52911 + g)(7,25T_4 + 5,63 \cdot 10^{-4}T_4^2 + 0,60 \cdot 10^{-7}T_4^3 + 26,138T_4^{-1} - 2,300) \text{ (3)}$$

$$Hf_{(4)} = - G(10,847 + 20,497 g) \text{ Kcal/ton pir (4)} \quad \text{Kcal/ton pir}$$

$$V_{(4)} = G(0,04339 + 0,082 g)T_4 \text{ m}^3/\text{ton pir. (5)}$$

P.(5)PIRITA DE ENTRADA

Segun datos recogidos en el Sur en Dic. de 1.982 los complejos siguientes tienen (en % salvo indicación en contrario) las composiciones:

	As	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Ag
Rio Tinto San Dionisio	0,32	0,90	1,53	2,98	41,08	48,52	33 ppm
Rio Tinto San Antonio	0,63	1,62	1,05	2,52	37,05	43,20	57
Aznalcollar	0,60	0,44	1,77	3,33	39,50	43,50	67
Media	0,52	0,99	1,45	2,94	39,21	45,07	52

Segun indicaciones verbales se tomará como mineral representativo el que contenga:

Cu	Pb	Zn
0,50	1,50	3,50

Por otra parte existen en estos minerales pequeñas cantidades de otros elementos (Hg, Sn, Se, etc) cuyo comportamiento en la destilación del azufre es incierto en el sentido de que no sabemos concretamente en la forma en que se volatilizan o quedan en el residuo. Dada su escasez y la incertidumbre señalada omitiremos su presencia de momento, para ir completando a medida que se vayan teniendo datos suficientes suministrados por una investigación experimental de la operación primera y básica del proceso: Obtención de SFe por destilación del azufre lábil de la pirita. El no afectará básicamente a las cifras obtenidas en este estudio inicial dado el mencionado bajo contenido de estos elementos.

Se toma pues como base un mineral conteniendo:

	Kg/ton pir	Kgmol/ton pir
Ag	0,050	$4,635 \cdot 10^{-4}$
As	3,0	0,04005
Cu	5,0	0,07865
Pb	15,0	0,07239
Zn	35,0	0,53533

Fe y S se calcularán hasta 100% en forma de S_2Fe .

Se suponen entonces las siguientes especies minerales,acompañando a la pirita:

	Kgmol/ton pir	Kg/ton pir
S _{Ag} ₂	$2,3175 \cdot 10^{-4}$	0,05743
S _{As} Fe	0,04005	6,521
S ₂ FeCu	0,07865	14,435
SPb	0,07239	17,321
SZn	0,53533	52,163
S ₂ Fe	7,58108	909,50257

Total	8,30773	1.000,

La supuesta composición elemental del mineral de entrada será entonces:

	Kgmol(ton	Kg/ton
Ag	$4,635 \cdot 10^{-4}$	0,050
As	0,04005	3,000
Cu	0,07865	5,000
Fe	7,6998	430,034
Pb	0,07239	15,000
S	15,9675	511,918
Zn	0,53533	35,000

		1.000.002

Disponemos de los siguientes calores molares:

$$\begin{array}{lll}
 S_2Fe & 17,869 + 1,333 \cdot 10^{-3} T - 3,045 \cdot 10^{-5} T^{-2} & \text{Kcal/Kgmol.}^\circ K \\
 SZn & 11,77 + 1,26 \cdot 10^{-3} T - 1,16 \cdot 10^{-5} T^{-2} & " \\
 SPb & 11,17 + 12,20 \cdot 10^{-3} T & " \\
 S_2FeCu & 20,79 + 12,8 \cdot 10^{-3} T - 1,34 \cdot 10^{-5} T^{-2} & "
 \end{array} \quad (6)$$

y para la mezcla resulta:

$$Cp = 17,443 + 1,5325 \cdot 10^{-3} T - 288,01 \cdot 10^{-5} T^{-2} \quad \text{Kcal/Kgmol.}^\circ K \quad (7)$$

A 20° C resulta para esta mezcla: $H = -73 \text{ kcal/kgmol.}$

Asignando al resto de los componentes de cuantía mínima el mismo calor molar de la mezcla ,a falta de otros datos resulta :

$$H_{(5)} = -606 \text{ Kcal/ton. pir. a } 20^\circ \text{ C}$$

Para las entalpias de formación asignamos a falta tambien de datos el mismo calor de formación al SAsFe que a la pirita:

	Hf
SAg ₂	- 7.600
SAsFe	- 42.520
S ₂ FeCu	- 41.590
SPb	- 22.540
SZn	- 48.500
S ₂ Fe	- 42.520

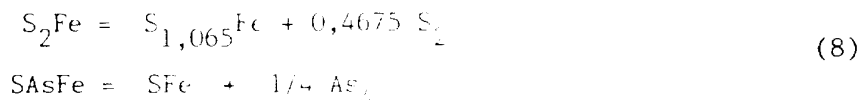
El Programa "CALFOR" nos da para la mezcla:

$$Hf_{(5)} = - 354.913 \text{ Kcal/ton.pir.}$$

La densidad real de la mezcla sería 4,98 ton/m³.

P.(6) PIRROTINA

En tanto no se disponga de mas información cuantitativa sobre la forma en que se encuentran,despues de la destilación del azufre lábil,algunos elementos supon-dremos la siguientes transformaciones químicas:



El mineral de entrada se transformaría entonces:

De	a	Kgmol sol.	Kgmol vol.	Kg sol.	Kg. vol.
SAg ₂	SAg ₂	2,3175.10 ⁻⁴		0,05743	-
SAsFe	SAsFe	0,04005	0,01001	3,521	3,000
S ₂ FeCu	S ₂ FeCu	0,07865	--	14,435	-
SPb	SPb	0,07239	--	17,321	-
SZn	SZn	0,53533	--	52,163	-
S ₂ Fe	S _{1,065} Fe	7,58108	3,54415	682,252	227,250
Total		8,30773		769,749	230,251

Por otra parte, según los ensayos efectuados en los laboratorios de AUXINI se volatiliza a 700° C un 37,2% ó un 23,8% del Pb, Sotiel y Aznalcollar respectivamente. Sin embargo (Anexo 1) a esa temperatura solo puede explicarse la volatilización de un 1,6% basándose en la presión de vapor del SPb. No se puede racionalmente incluir en este estudio la volatilización inexplicada de esos porcentajes de Pb ya que posteriormente no tendríamos tampoco base racional para su separación del gas. Contaremos pues solamente con una volatilización física como SPb de acuerdo con la presión de vapor de este compuesto calculada mediante los datos del Anexo citado. En el futuro esto se modificaría, si fuese necesario, de acuerdo con lo que vayan indicando los resultados experimentales.

Si M_I (Kgmol/ton pir.) es la masa de gas que acompaña al vapor de SPb en los gases que salen del HF y p es la presión de vapor del SPb a la temperatura de dichos gases el SPb volatilizado en Kgmol/ton pir. serian:

$$m = \frac{p}{769 - p} M_I \quad (9)$$

Por otra parte si hay un arrastre mecánico de Am (tanto por uno) de sólidos con el gas de salida del HF la masa y composición en P.(6) quedaría definitivamente: (V. Anexo 2)

	Kgmol/ton pir	Kg/ton pir.
S _{Ag} ₂	$2,3175 \cdot 10^{-4}(1-Am)$	$0,05743(1-Am)$
S _{Fe}	$0,04005(1-Am)$	$3,521(1-Am)$
S ₂ FeCu	$0,07865(1-Am)$	$14,435(1-Am)$
SPb	$(0,07239-m)(1-Am)$	$17,321(1-13,814m)(1-Am)$
S _{Zn}	$0,53533(1-Am)$	$52,163(1-Am)$
S _{1,065} Fe	$7,58108(1-Am)$	$682,252(1-Am)$

Total	$(8,307732-m)(1-Am)$	$(769,749-239,27m)(1-Am)$

(10)

Para el cálculo de entalpías tenemos los siguientes datos (Kubaschewski):

		Kcal/Kgmol
S _{Ag} ₂	21,1	
S _{Fe}	298-411°K	$5,19 + 0,0264 T$
	411-598	17,4
	598- T	$12,2 + 0,00238 T$
S ₂ FeCu		$20,79 + 12,8 \cdot 10^{-3} T - 1,34 \cdot 10^{-5} T^{-2}$
SPb		$10,66 + 3,9 \cdot 10^{-3} T$

(11)

$$SZn \quad 11,77 + 1,23 \cdot 10^{-3} T - 1,16 \cdot 10^5 T^{-2}$$

$$S_{1,065}Fe \quad \text{igual al SFe} \quad (\text{Kubaschewski p. 284})$$

Para la mezcla $SAg_2 + S_2FeCu + SZn$:

$$H'_{(6)} = (1 - Am)(- 2.685,6 + 7,941T + 8,41 \cdot 10^{-4}T^2 + 72.636 T^{-1}) \quad \text{Kcal/ton pir}$$

Para el SFe + $S_{1,065}Fe$ considerados iguales, a los efectos:

$$H''_{(6)} = (1 - Am)(- 21.527 + 92,978 T + 9,069 \cdot 10^{-3} T^2) \quad \text{Kcal/ton pir}$$

y para el SPb:

$$H'''_{(6)} = (1 - Am)(- 242,7 + 0,772 T + 1,42 \cdot 10^{-4} T^2) - \\ - m(1-Am)(- 3.351,9 + 10,66 T + 1,96 \cdot 10^{-3} T^2) \quad \text{Kcal/ton pir}$$

y en total:

$$H_{(6)} = H'_{(6)} + H''_{(6)} + H'''_{(6)}$$

$$H_{(6)} = (1 - Am)(- 24.455 + 101,69 T + 100,52 \cdot 10^{-4} + 72.636 T^{-1}) + \\ + m(1 - Am)(- 3.351,9 + 10,66 T + 19,6 \cdot 10^{-4} T^2) \quad \text{Kcal/ton pir.} \quad (12)$$

Para la Entalpia de formación tenemos los datos:

SAg_2	- 7.600
SFe	- 24.000
SFe trsf 138°C	570
SFe trsf 325°C	120
S_2FeCu	- 45.500
SPb	- 23.500
SZn	- 49.050
$S_{1,065}Fe$	igual que SFe

Resulta entonces:

$$Hf_{(6)} = (- 209.188 + 23.500m)(1 - Am) \quad \text{Kcal/ton pir.} \quad (13)$$

(x)

P.(7) PERDIDAS DE CALOR

Las pérdidas de calor del HF que estamos considerando dependen de su temperatura interior, la exterior constante, y de su superficie. La capacidad en cambio depende de su volumen. No tiene pues sentido hablar de pérdidas de calor referidas a la unidad de peso tratado, que es nuestra base, sin tener

(x) Para el volumen resulta $V_{(6)} = 10^{-3}(100,354 - 1,842m)(1-Am)$

en cuenta las dimensiones del horno. Es preciso pues relacionar entre sí estas variables y parámetros y en forma analítica como venimos haciendo a fin de que puedan manejarse en un programa.

En el Documento nº 2 de AUXINI de Febrero de 1.984 se propone una forma y dimensiones del HF y en el estudio de D. Enrique Pire de Febrero del mismo año figura otro semejante. Sin embargo hay una diferencia muy importante entre ambos y es la capacidad específica que en el Doc. nº 2 es de $186 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ referido a la sección del lecho y en el de Pire es de $833,3$ en igual tiempo y area. Yo creo que esta última cifra ha de acercarse mas a lo posible. En todo caso, sin embargo, dejaremos este dato como parámetro J ($\text{Kg/m}^2 \cdot \text{hr}$) en condiciones determinadas de temperatura, clase de mineral, tamaño de grano etc.

La sección del lecho necesaria para tratar M_p Kg/hr sería:

$$S = \frac{M_p}{J} \quad (14) \text{ y el diámetro del lecho } D = \sqrt{\frac{4 M_p}{\pi J}} \quad \text{m.} \quad (15)$$

Al variar la capacidad de tratamiento del HF sin variar la específica variarán únicamente los diámetros de las secciones, fundamentalmente dos: el del lecho y el de la cámara de expansión. Las alturas de los cuerpos cilíndricos y tronco-cónicos no tienen por que variar, dentro de unos límites razonables si J se mantiene constante. Sin embargo al variar J variará el volumen de gases sin variar las secciones transversales es decir variará la velocidad de los gases y con ello la capacidad de la cámara de expansión para devolver al lecho determinados tamaños de grano. La altura pues de esta cámara deberá variar linealmente con J . En el estudio de Pire se dan 4 m. como longitud adecuada para $J = 833,3$. Para variaciones no muy grandes de J podemos adoptar entonces:

$$L = 0,0048 J \quad \text{m.} \quad (16)$$

Este criterio deberá ser revisado, a nuestro juicio, después de una aplicación detenida de los criterios en uso para la estimación de arrastre de sólidos por el gas en un HF. De ello debe salir una relación entre L y J mejor fundamentada.

Respetando pues los diseños propuestos podemos poner las dimensiones del HF en función de D y de J y, para la superficie exterior incluyendo $E =$ espesor de la pared (m.): (V. dibujo anexo)

$$\text{Sup. int. } S_I = \pi(1,347 D^2 + 2 D + 0,75 \sqrt{9,242 + D^2} + 0,0096 DJ) \text{ m}^2 \quad (17)$$

$$\text{Sup. ext. } S_E = \pi \left\{ \sqrt{0,1045 D^2 + 0,455 D \cdot E + 0,5 E^2} (D + 2E) + 2(D + 2E) + \right. \\ \left. 1/4 \sqrt{9,242 + D^2} (3D + 4E) + (0,0096 J + 0,44 D)(D + E) + \right. \\ \left. \sqrt{1,048 D^2 + 2 D E + E^2} (D + E) \right\} \quad \text{m}^2 \quad (18)$$

La variación de area en la dirección del flujo de calor debe ser considerada. En la cámara de expansión con $S_E/S_I < 2$ podría tomarse la media aritmética, en el lecho, sin embargo, esto no sería adecuado. Se tomará por tanto en el conjunto la media logarítmica de las superficies interior y exterior. En este estudio estimativo será suficiente esta medida así como las suposiciones que se harán en cuanto a composición de las paredes y algún otro extremo. Con vistas a la construcción del HF será conveniente sin embargo una consideración más detallada del flujo tridimensional de calor en las distintas partes del HF. Se considera la pared del HF compuesta de:

$$E = E_r + E_a + E_c \quad (19)$$

siendo:

$$\begin{aligned} E_r &= \text{espesor de refractario} && \text{m.} \\ E_a &= \text{id. aislante-refractario} && \text{m.} \\ E_c &= \text{id. ladrillo común} && \text{m.} \end{aligned}$$

El programa anexo "PERCAL" permite calcular las pérdidas de calor de un HF de acuerdo con lo expuesto. Nos remitimos a lo que allí se expone en cuanto a los criterios seguidos para el cálculo.

Como ejemplo se ha efectuado un cálculo para el horno de $D = 1,75 \text{ m.}$ capaz para 2 ton/hr de pirita con $J = 833,3 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ y paredes de 0,4 m. compuestas de:

$$\begin{aligned} E_r &= 0,12 \text{ m. de refractario aluminoso} \\ E_a &= 0,12 \text{ m. de aislante refractario} \\ E_c &= 0,16 \text{ m. de ladrillo macizo común} \end{aligned}$$

Se han supuesto distintas temperaturas interiores siendo la temp. ambiente 20°C . El gráfico adjunto representa los valores obtenidos para Q_m (Kcal/ton/pi.) así como para las temperaturas de contacto entre las distintas capas y la temperatura de la pared exterior del horno. La observación de las temperaturas de contacto entre las capas es importante para comprobar que están dentro de los límites de estabilidad térmica de los materiales. En el ejemplo

AUXINI - *Investigación Aplicada*

no podría utilizarse el material aislante escogido con el espesor adoptado por encima de una temperatura interior de 950° C. Habría que cambiar de material o bien adoptar espesores menores de aislante, con mayores pérdidas de calor, naturalmente.

P.(8). GASES DE SALIDA

Están formados, por una parte, por los gases de entrada al HF procedentes de la CC a los que hay que añadir el azufre destilado así como el SPb volatilizado. Finalmente debe añadirse el sólido arrastrado mecánicamente por el gas. Otros productos volatilizados se tendrán en cuenta cuando se tengan datos fidedignos cuantitativos incluyendo su estado molecular.

En los supuestos asumidos en P.(6) serían destilados:

S₂ 3,54415 Kgmol/ton pir

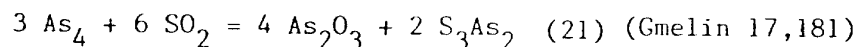
As₄ 0,01001 "

La composición de los gases, salvo el SPb volatilizado y por supuesto las reacciones entre los componentes iniciales sería entonces:

N ₂	G(0,38602 + 0,7296 g)	Kgmol/ton pir	
CO ₂	G(0,07077 + 0,1337 g)	"	
H ₂ O	G(0,07148 + 0,1351 g)	"	
SO ₂	G(0,000842 + 0,0016 g)	"	(20)
S ₂	3,54415	"	
As ₄	0,01001	"	

Total G(0,52911 + g) + 3,55416 Kgmol/ton pir.

En adelante se considerará al As₄ como inerte en relación con los otros componentes debido, principalmente, a su pequeña cantidad ya que por otra parte no puede excluirse la transformación.



Hasta este punto la composición en Kgs de la fase gaseosa sería:

N_2	$G(10,816 + 20,443 \text{ g})$	Kg/ton pir	
CO_2	$G(3,115 + 5,884 \text{ g})$	"	
H_2O	$G(1,288 + 2,434 \text{ g})$	"	
SO_2	$G(0,05394 + 0,1025 \text{ g})$	"	(22)
S_2	227,251	"	
As_4	3,000	"	

Tot. $G(15,2729 + 28,8635 \text{ g}) + 230,251 \text{ Kg/ton pir.}$

Estos componentes que podemos considerar "iniciales" de la fase gas reaccionan entre si para formar otros compuestos en cantidades que pueden calcularse con el programa "FICHION" que ya ha sido entregado. Este programa da los Kgmol de cada componente resultante de las reacciones entre los "iniciales", referidos a 1 Kgmol de N_2 .

Como al As_4 lo consideramos como inerte lo sumaremos al N_2 hasta despues de calculada la composición final dada por el "FICHION" en cuyo momento lo desglosaremos.

Los Kgmol de " N_2 " serán entonces:

$$G(0,38602 + 0,7296 \text{ g}) + 0,01001 = G(0,38602 + 0,7296 \text{ g} + 0,01001/G) = G.N \quad (23)$$

llamando:

$$N = 0,38602 + 0,7296 \text{ g} + \frac{0,01001}{G} \quad (24)$$

$\frac{\text{Kgmol "N}_2\text{"}}{\text{ton pir}}$

Adoptando la notación empleada por el "FICHION" para la composición inicial esta sería:

N_2	1	Kgmol	
CO_2	$a = \frac{0,07077 + 0,1337 \text{ g}}{N}$	Kgmol/Kgmol " N_2 "	
H_2O	$b = \frac{0,07148 + 0,1351 \text{ g}}{N}$	"	
SO_2	$c = \frac{0,000842 + 0,1351 \text{ g}}{N}$	"	(25)
S_2	$d = \frac{3,54415}{G.N}$	"	

Para la entrada en el programa citado se agrupan algunos de estos valores:

$$A = 2a + b + 2c = \frac{0,214704 + 0,6727 \text{ g}}{N} \quad (26)$$

$$B = c + 2d = \frac{0,000842 + 0,1351 \text{ g}}{N} + \frac{7,0883}{G.N}$$

La notación empleada por el programa para designar los moles de los productos resultantes de las reacciones es:

$$\begin{array}{cccccccccccc} \text{CO}_2 & \text{H}_2\text{O} & \text{SO}_2 & \text{S}_2 & \text{S}_6 & \text{S}_8 & \text{CO} & \text{COS} & \text{SH}_2 & \text{H}_2 & \text{CS}_2 \\ u & v & s & x & y & z & w & r & t & p & q \end{array} \quad (27)$$

El programa "FICHION" calcula pues los valores de estas variables dependientes en función de los valores iniciales de a,b,c,d y por supuesto de la temperatura y de los valores de las constantes de las reacciones consideradas. Nos remitimos al texto del citado programa para el detalle de las reacciones y de las agrupaciones de constantes correspondientes así como el uso del mismo.

Se puede escribir entonces que el programa realizando los cálculos según una serie de funciones:

$$u = \phi_1(a,b,c,d,T) \quad v = \phi_2(a,b,c,d,T) \quad s = \phi_3(a,b,c,d,T) \text{ etc.}$$

y en general:

$$x_i = \phi_i(a,b,c,d,T) \quad (28)$$

A fin de hacer más resumidas las fórmulas que sigan adoptaremos esta notación más general correspondiendo a cada especie molecular el subíndice que figura en la siguiente relación:

	N_2	CO_2	H_2O	SO_2	S_2	S_6	S_8	CO	COS	SH_2	H_2	CS_2	
Kgmol	1	u	v	s	x	y	z	w	r	t	p	q	(29)
i =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Otra modificación necesaria en la notación del "FICHION" por razones obvias es la sustitución de la letra Sigma mayúscula por la correspondiente minúscula.

Con estas bases para la notación podemos establecer el siguiente resumen para el cálculo de las funciones del P.(8):

Masas

El "FICHIOM" suministra directamente las siguientes:

$$x_i \quad \text{Kgmol componente } i/\text{Kgmol "N}_2\text{"} \quad 2 \leq i \leq 12 \quad (30)$$

para la conveniente validez general de las expresiones matemáticas que siguen conviene establecer también, asignando los correspondientes índices "i" al As_4 ($i = 13$) y al SPb ($i = 14$) los siguientes valores que se deducen de lo expuesto y de (23) y (24):

$$x_1 = 1 - \frac{0,01001}{G.N} \quad \text{Kgmol N}_2/\text{Kgmol "N}_2\text{"}$$

$$x_{13} = \frac{0,01001}{G.N} \quad \text{Kgmol As}_4/\text{Kgmol "N}_2\text{"} \quad (32)$$

$$x_{14} = \frac{p_T}{760 - p_T} \sigma \quad \text{Kgmol SPB/Kgmol "N}_2\text{"}$$

Esta última se deduce teniendo en cuenta que σ suministrada también por el "FICHIOM" es:

$$\sigma = 1 + \sum_2^{12} x_i = (x_1 + x_{13}) + \sum_2^{12} x_i = \sum_1^{13} x_i \quad \text{Kgmol total(excpt. SPb)/Kgmol "N}_2\text{"} \quad (33)$$

De un modo general, entonces, la masa del componente "i" en P.(8) será:

$$M_{(8)i} = G.N x_i \quad \text{Kgmol comp. "i"/ton pir.} \quad (34)$$

y los moles totales de la fase gas:

$$\sigma_t = G.N \sigma + G.N x_{14} = G.N (\sigma + x_{14}) = G.N \sum_1^{14} x_i \quad \text{Kgmol total/ton pir} \quad (35)$$

Una vez estimado el arrastre mecánico A_m (v. Anexo 2) habría que añadir a la fase gas la fase sólida compuesta por:

	Kgmol/ton pir	Kg/ton pir
SAg ₂	2,3175.10 ⁻⁴ Am	0,05743 Am
SFe	0,04005 Am	3,521 Am
S ₂ FeCu	0,07865 Am	14,435 Am
SPb	(0,07239-m) Am	17,321(1-13,814m)Am
SZn	0,53533 Am	52,163 Am
S _{1,065} Fe	7,58108 Am	682,252 Am

Total	(8,307732-m) Am	(769,749-239,27m)Am

Entalpia sensible

Fase Gas

El signo prima (') en las entalpias refiriéndose a esta fase:

$$Cp_i = \text{cal. molar del componente "i"} \quad \text{Kcal/Kgmol.}^\circ\text{K}$$

$$\text{Entalpia comp. "i"} \quad H'_i = \int_{T_0}^T Cp_i dT \quad \text{Kcal/Kgmol} \quad (T_0 = 298,1) \quad (37)$$

$$Cp_{mzcl.} = \frac{1}{\sigma_t} \sum_1^{14} M_{(8)i} Cp_i = \frac{1}{\sum_1^{14} x_i} \sum_1^{14} x_i Cp_i \quad \text{Kcal/Kgmol.}^\circ\text{K} \quad (38)$$

$$\text{Entalpia total comp. "i"} \quad H'_{(8)i} = G.N.H'_i \quad \text{Kcal/ton pir} \quad (39)$$

$$\text{Entalpia mezcla} \quad H'_8 = \int_{T_0}^T Cp_{mzcl.} dT \quad \text{Kcal/Kgmol mzcl.} \quad (40)$$

$$\text{Entalpia tot. fase gas} \quad H'_{(8)} = \sigma_t H'_8 \quad \text{Kcal/ton pir.} \quad (41)$$

Fase Sólida

El signo segunda (") refiriéndose a esta fase:

$$\text{Entalpia total fase sólida} \quad H''_{(8)} = \frac{Am}{1-Am} H_{(6)} \quad \text{Kcal/ton pir.} \quad (42)$$

Total

$$H_{(8)} = H'_{(8)} + H''_{(8)} = \sigma_t H'_8 + \frac{Am}{1-Am} H_{(6)} \quad \text{Kcal/ton pir} \quad (43)$$

Entalpia de formaciónFase gas

$$\text{Será: } Hf'_{(8)} = G.N. \sum_1^{14} Hf'_i x_i \quad \text{Kcal/ton pir} \quad (44)$$

Fase sólida

$$Hf''_{(8)} = \frac{Am}{1-Am} Hf_{(6)} \quad \text{Kcal/ton pir} \quad (45)$$

Total

$$Hf_{(8)} = Hf'_{(8)} + Hf''_{(8)} = G.N. \sum_1^{14} Hf'_i x_i + \frac{Am}{1-Am} Hf_{(6)} \quad \text{Kcal/ton pir} \quad (46)$$

VolumenesFase gas

$$V'_{(8)} = 0,08205 \sigma_t T_8 \quad m^3/\text{ton pir} \quad (47)$$

Fase sólida

$$V''_{(8)} = \frac{Am}{1-Am} V_{(6)} \quad m^3/\text{ton pir} \quad (48)$$

Total

$$V_{(8)} = V'_{(8)} + V''_{(8)} = 0,08205 \sigma_t T_8 + \frac{Am}{1-Am} V_{(6)} \quad m^3/\text{ton pir} \quad (49)$$

BALANCE CC-HF

Se ha preparado un programa "CC-HF" que con ayuda de los otros programas ya elaborados permite establecer un balance total de ambos acoplados. Nos remitimos a dicho programa para la realización numérica de los planteamientos hechos en este estudio.

- - ANEXO 1 - -

Segun Kubaschewski p.368 la presión de vapor del SPb sólido se obtiene mediante la expresión:

$$\log p = - 13.300.T^{-1} - 0,81 \log T - 0,43.10^{-3} + 14,85 \quad (1)$$

de aqui resultan las siguientes presiones de vapor:

t	700	750	800	850	°C
p	0,022	0,094	0,35	1,13	mm Hg

Considerando el máximo de N₂ pasado en los ensayos realizados en los laboratorios de AUXINI (100 lt/hr) y 4 horas resultan 16,4 gmol por ensayo. Si el mineral tiene 1,5 % de Pb las citadas presiones de vapor explicarían la volatilización de :

t	700	750	800	850
gmol SPb	488.10 ⁻⁶	2,1.10 ⁻³	7,7.10 ⁻³	25.10 ⁻³
gr. SPb	0,12	0,5	1,84	6,0
% del SPb	1,6	6,7	24,5	80,0

- - ANEXO 2 - -

El valor de A_m puede determinarse por alguno de los métodos propuestos como el SI (Sharpness Index) o los de Zenz. Especialmente el SI será de interés a fin de predecir no solo el arrastre por el gas sino la distribución de tamaños con vistas al diseño del ciclón o cualquier otro medio inercial de separación de sólidos de un gas. Este estudio puede dar además indicaciones sobre la dimensión vertical de la cámara de expansión del HF.

Aparte de estos métodos especializados hemos hecho una estimación calculando la velocidad de caída libre de una partícula.

Según (47) el volumen del gas que sale del lecho sería:

$$V'_{(8)} = 0,08205 \sigma_t T_8$$

y a 750° C y con $g=0,7$ y $\sigma = 1,4$ para $G= 125$ resulta $V'_{(8)} = 13.172 \text{ m}^3/\text{ton pir}$

en un horno de $D = 1,75 \text{ m}$. la velocidad del gas sería entonces $0,76 \text{ m/seg}$

La densidad del gas en las condiciones citadas y 1 ata sería aprox. $0,35 \text{ Kg/m}^3$ suponiendo un peso molecular medio de 29,5.

En estas condiciones y para una partícula de 1 mm y viscosidad del gas de 0,043 centipoises se obtiene un Re de 6,2; estamos pues aun dentro del margen de validez de la ley de Stokes con arreglo a la cual el diametro de la mayor partícula arrastrada por el gas sería $d=0,11 \text{ mm}$, supuesta esférica. Se ha supuesto una densidad de la partícula de 4,8.

Si la granulometría de la pirrotina fuese la misma que la de la pirita de entrada (improbable) el arrastre en las citadas condiciones sería menor de 1% como se deduce del gráfico Rosin Rammler adjunto donde viene representadas las granulometrias de las dos piritas (Sotiel y Aznalcollar) estudiadas por AUXINI últimamente. Las dos rectas que representan las granulometrias coinciden practicamente en una sola.

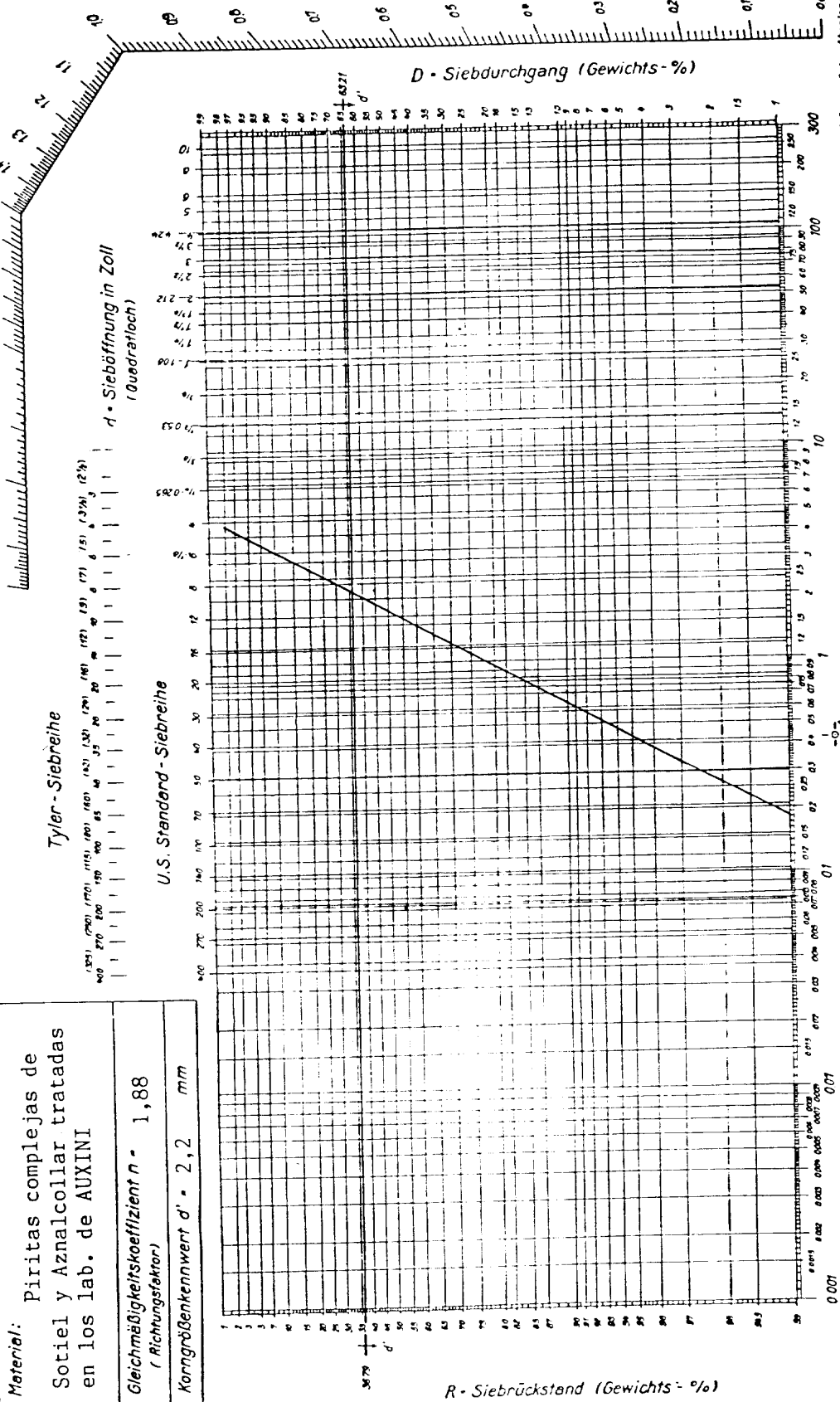
Körnungsnetz

nach E. Puffe 1950
zur graphischen Darstellung und Auswertung von Körnungsanalysen auf Grund der Rosin-Rammmer-Gleichung

$$R = 100 \cdot e^{-1.88 \cdot d}$$

$$D = 100 - R$$

Materiel:	Piritas complejas de Sotiel y Aznalcollar tratadas en los lab. de AUXINI
Gleichmäßigkeitskoeffizient $n =$ (Richtungsfaktor)	1,88
Korngrößenkennwert $d' =$	2,2 mm



Der Schnittpunkt der RRS-Geraden mit der 36.75% - Koordinate liefert auf der Abszisse den Korngrößenkennwert d' , die Parallelverschiebung der RRS-Geraden durch Abl. A_1 auf dem Diagramm ist, näheres siehe „Zeitschrift für Erzbau und Metallhüttenwesen Bd. I 1940, Heft 4.“

Siebreihe DIN 177 (neu)

Pérdidas de Calor de un Horno Fluosólidos (Ejemplo)

Capacidad 2 ton/hr. pirita
 Cap. especif. 838,3 Kg/m².hr
 Diam. techo 1,75 m.

t_1 temp. pared int.
 t_2 temp. contacto refr.-aisl.
 t_3 temp. contacto aisl-comun
 t_a temp. pared ext.
 t_m temp. ambiente 20°C

Pérdidas Kcal/ton pir.

Pared= 0,12 m refr.+0,12m aisl+0,16m común

