



FISICO-QUIMICA METALURGICA

*FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS
Clase 05*

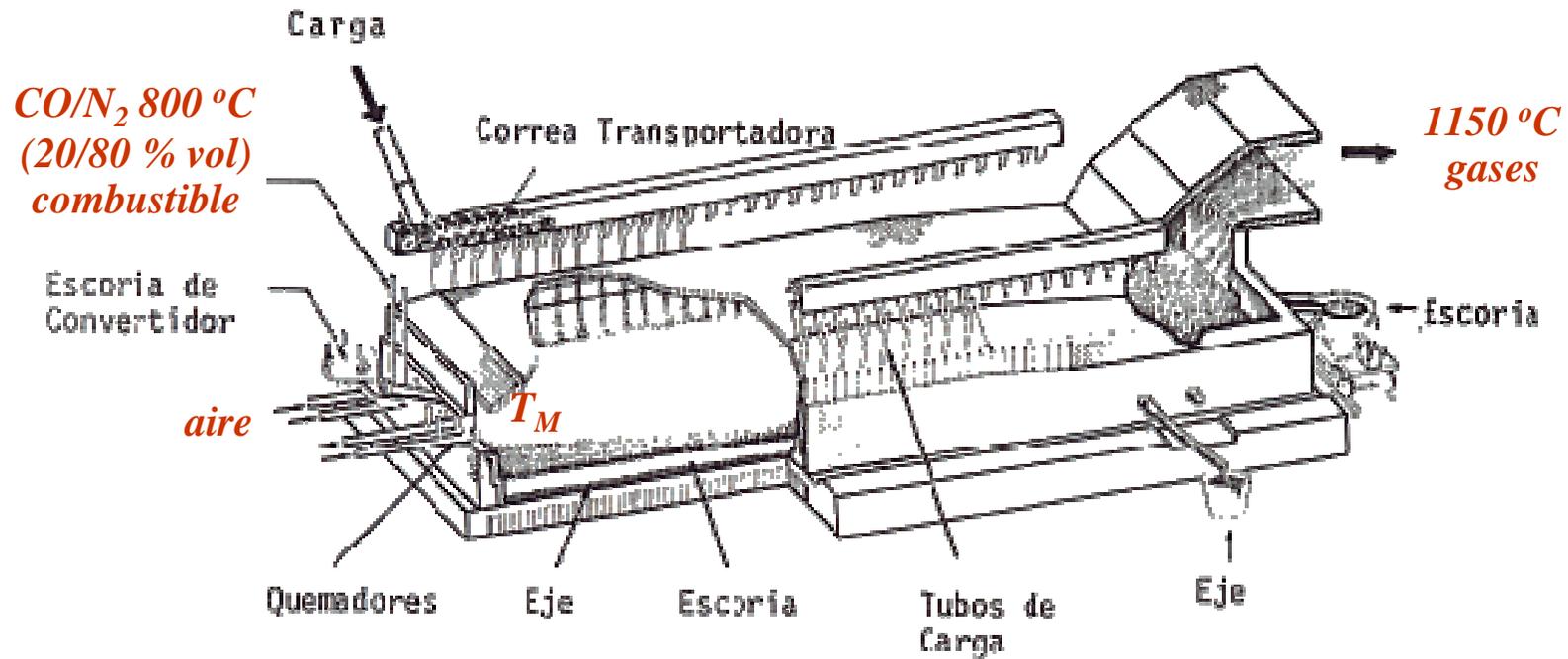
Prof. Dr. Leandro Voisin A.

Ejemplo 3:

Como agente gaseoso se dispone de un gas que contiene 20 % de CO y 80% de N₂ en volumen y que es precalentado a 800 °C e inyectado a un horno reverbero en donde combustiona completamente con la cantidad estequiométrica de aire. Si los gases salen a 1150 °C.

Calcular la temperatura de llama y la cantidad de calor suministrada al horno por metro cúbico de gas.

Ejemplo 3:



Horno reverbero

Considere que:

$$C_p = a + bT \cdot 10^{-3} + cT^{-2} \cdot 10^5 \quad \text{J/Kmol}$$

Ejemplo 3, Solución:

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$\Delta H^{\circ}_{298K} (J / mol)$
<i>CO</i>	28.43	4.10	-0.46	-110500
<i>CO₂</i>	44.17	9.04	-8.54	-393700
<i>O₂</i>	29.98	4.19	-1.66	0
<i>N₂</i>	27.88	4.27	0	0

La reacción de combustion es:



y el calor de la reacción a 298 K será:

$$\Delta H^{\circ} = [(2 \cdot -393700) - (2 \cdot -110500) - 0] \quad J$$

$$\Delta H^{\circ} = -566400 \quad J$$

Ejemplo 3, Solución:

El cambio en la capacidad calórica es:

$$C_p = 1.50 + (5.69T \cdot 10^{-3}) - (14.49T^{-2} \cdot 10^5) \quad J/K$$

$$\Delta H_T^o - \Delta H_o = \int_0^T \Delta C_p dT \quad (ec. 1)$$

$$-566400 = \Delta H_o + 1.50T + (2.85T^2 \cdot 10^{-3}) + (14.49T^{-1} \cdot 10^5)$$

$$\Delta H_o = -571962 \quad J$$

Luego utilizando la *ec.(1)* y considerando la temperatura requerida en el lugar de T calculamos el calor de la reacción.

Ejemplo 3, Solución:

$$\Delta H_T^o - \Delta H_0 = \int_0^T \Delta C_p dT \quad (\text{ec. 1})$$

$$\Delta H_{1073}^o = -571962 + (1.5 \cdot 1073) + (2.85 \cdot 1073^2 \cdot 10^{-3}) + \dots \\ \dots (14.49 \cdot 1073^{-1} \cdot 10^5) \quad J$$

$$\Delta H_{1073}^o = -565727 \quad J$$

Para la reacción de 10 moles de gas conteniendo 2 moles de CO.

La entalpía anterior calentará los productos de combustión y además el nitrógeno proveniente del aire en el gas de inyección a la máxima temperatura de llama.

Ejemplo 3, Solución:

Por simplicidad asumiremos que el aire esta compuesto por 20% O₂ y 80% N₂ en volumen. Los gases de salida del horno contienen 2 moles de CO₂ de la combustión del CO y 12 moles de N₂ (8 del gas de entrada y 4 del aire).

Por lo tanto:

$$565727 = \int_{1073}^{T_M} \left(2C_{p_{CO_2}} + 12C_{p_{N_2}} \right) dT$$

$$565727 = \left[422.9T + \left(34.66 \cdot T^2 \cdot 10^{-3} \right) + \left(17.08 \cdot T^{-1} \cdot 10^5 \right) \right]_{1073}^{T_M}$$

$$1061000 = 422.90T_M + \left(34.66 \cdot T_M^2 \cdot 10^{-3} \right) + \left(17.08 \cdot T_M^{-1} \cdot 10^5 \right)$$

Ejemplo 3, Solución:

$$1061000 = 422.90T_M + (34.66 \cdot T_M^2 \cdot 10^{-3}) + (17.08 \cdot T_M^{-1} \cdot 10^5)$$

Siendo que T_M es mucho mayor que la temperatura de precalentamiento, el valor numérico del último término de la ec. es menor que 1000 y por ende puede ser ignorado, dejando una ec. cuadrática que tiene por resultado:

$$T_M = 2135 \text{ K} = 1862^\circ \text{ C}$$

El calor suministrado al horno es la diferencia entre el calor de combustión y las pérdidas de calor en los gases de salida, este último término será:

$$\int_{1073}^{1423} \left(2C_{p_{\text{CO}_2}} + 12C_{p_{\text{N}_2}} \right) dT = 177900 \quad \text{J}$$

Ejemplo 3, Solución:

Por lo tanto, el calor suministrado al horno por 10 moles de gas de inyección será:

$$(565727 - 177900) = 387827 \text{ J}$$

Siendo que un mol de cualquier gas corresponde a 22.4 litros bajo condiciones standard, el volumen de 10 moles a la temperatura de precalentamiento (1073 K) será:

$$[10 \cdot 22.4 \cdot (1073 / 273)] = 880 \text{ l} = 0.88 \text{ m}^3$$

Por lo tanto el calor suministrado al horno por m³ del gas de entrada será:

$$(387827 / 0.88) = 440713 \text{ J/m}^3$$

Ejemplo 4:

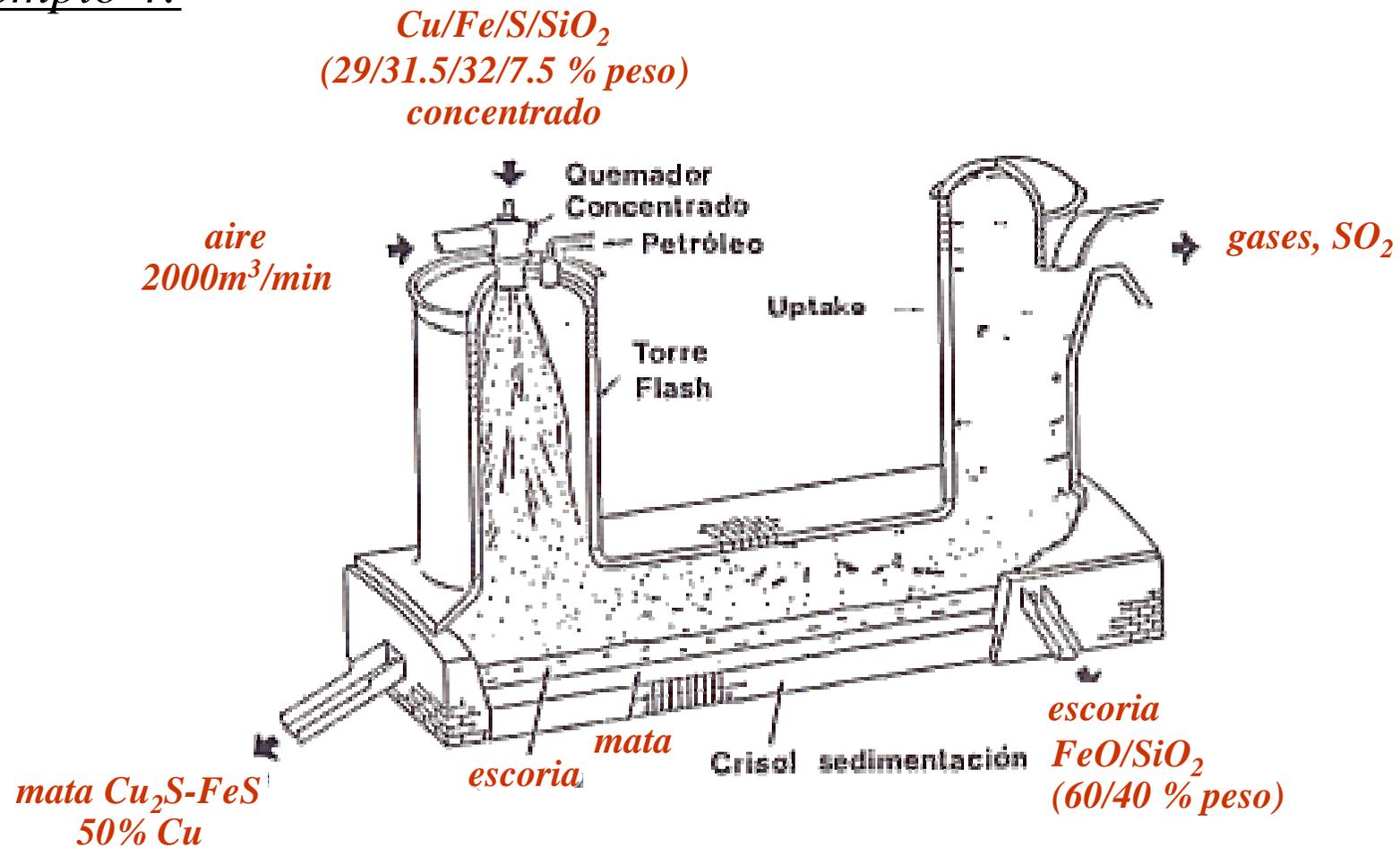
Un concentrado calcopirítico con 29% de Cu, 31.5% de Fe, 32% de S y 7.5% de SiO₂ es alimentado a un horno Flash. Como combustible, aire es inyectado a 2000 m³/min a NTP para generar una mata de cobre, Cu₂S-FeS, con ley 50% de Cu.

Mediante la adición de sílice se genera además una escoria que contiene 60% de FeO. Todas las concentraciones son en peso.

Se asume que no hay pérdidas de Cu en la escoria y que el 90% del oxígeno en el aire es consumido por las reacciones.

Calcular el peso de mata y escoria producidos por hora y la presión parcial de SO₂ en la salida de gases.

Ejemplo 4:



Horno Flash Outokumpu

Ejemplo 4, Solución:

1 Kg de concentrado contiene 290 g de Cu y la mata contiene 50% de Cu, entonces:

$$[(0.29/0.5) \cdot 100] = 580 \text{ g de mata}$$

Se tiene que dos moles ($2 \cdot 63.57$ g) de Cu combinados con 1 mol (32 g) de S forman 1 mol de Cu_2S y por lo tanto 290 g de cobre combinados con 73 g de S forman 363 g de Cu_2S en la mata. Como la mata sólo contiene Cu_2S y FeS, se tendran $(580 - 363) = 217$ g de FeS.

Ejemplo 4, Solución:

*El peso molecular del FeS es (55.85 + 32) = 87.85 g/mol,
Por lo tanto el peso del Fe en la mata será:*

$$\left[(217 \cdot 55.85) / 87.85 \right] = 138 \quad \text{g por Kg de concentrado}$$

Además, 1 Kg de concentrado contiene 315 g de Fe; si 138 g pertenecen a la mata, entonces 177 g son transferidos a la escoria y por lo tanto tendremos:

$$177 + \left[177 \cdot (16 / 55.85) \right] = 228 \quad \text{g de FeO}$$

Ejemplo 4, Solución:

Como la escoria contiene 60% en peso de FeO, el peso total de la escoria sera 380 g por Kg de concentrado.

Por otro lado, 1 Kilo de concentrado contiene 320 g o 10 moles de S. La mata formada desde esta cantidad de concentrado contiene $(217 - 138) = 79$ g ó 2.47 moles de S en el FeS y 73 g ó 2.28 moles de S en el Cu_2S . Luego como el contenido de azufre debe conservarse en el sistema:

$$\sum \eta_S = \eta_{S(\text{concentrado})} = \eta_{\text{Cu}_2\text{S}} + \eta_{\text{FeS}} + \eta_{\text{SO}_2}$$

donde: η es el número de moles de cada especie, substituyendo los valores que conocemos, tendremos que:

$$\eta_{\text{SO}_2} = 5.25$$

Ejemplo 4, Solución:

de manera similar la cantidad de Oxígeno consumido por las reacciones por kilo de concentrado es:

$$\sum \eta_{O_2} = \frac{1}{2} \eta_{FeO} + \eta_{SO_2} = 6.79$$

El aire contiene 21% en volumen de O_2 , y 22.4 m³ de gas de Oxígeno contienen 1000 moles de Oxígeno. Si el aire es soplado a una tasa de 2000 m³/min y 90% de el Oxígeno reacciona con el concentrado, la cantidad de O_2 consumida por hora será:

$$\left[(2000 \cdot 60 \cdot 0.21 \cdot 0.9 \cdot 1000) / 22.4 \right] = 1012500 \text{ moles}$$

Por lo tanto, el peso del concentrado procesado es:

$$\left[1012500 / 6.79 \right] = 149120 \text{ Kg/h}$$

Ejemplo 4, Solución:

Mientras que los pesos de la mata y escoria producidas son, respectivamente:

$$[(149120 \cdot 580) / 1000] = 86490 \text{ Kg/h}$$

$$[149120 \cdot 0.380] = 56670 \text{ Kg/h}$$

Por cada Kg de concentrado procesado, 177 g o 3.17 moles de Fe son oxidados a la escoria y 1.59 moles de O₂ son consumidos, y por lo tanto en una hora de operación la cantidad consumida de O₂ en la oxidación del Fe sera:

$$[(1.59 \cdot 149120 \cdot 22.4) / 1000] = 5310 \text{ m}^3/\text{h de O}_2$$

Ejemplo 4, Solución:

Luego el volumen de gas no cambia por la conversión del O_2 a SO_2 . 5.25 moles de SO_2 serán generados por la oxidación de 1 kg de concentrado, y el volumen de SO_2 producido por hora sera:

$$\left[(149120 \cdot 5.25 \cdot 22.4) / 1000 \right] = 17540 \text{ m}^3/\text{h de } SO_2$$

y por lo tanto la presión parcial de SO_2 en los gases de salida será:

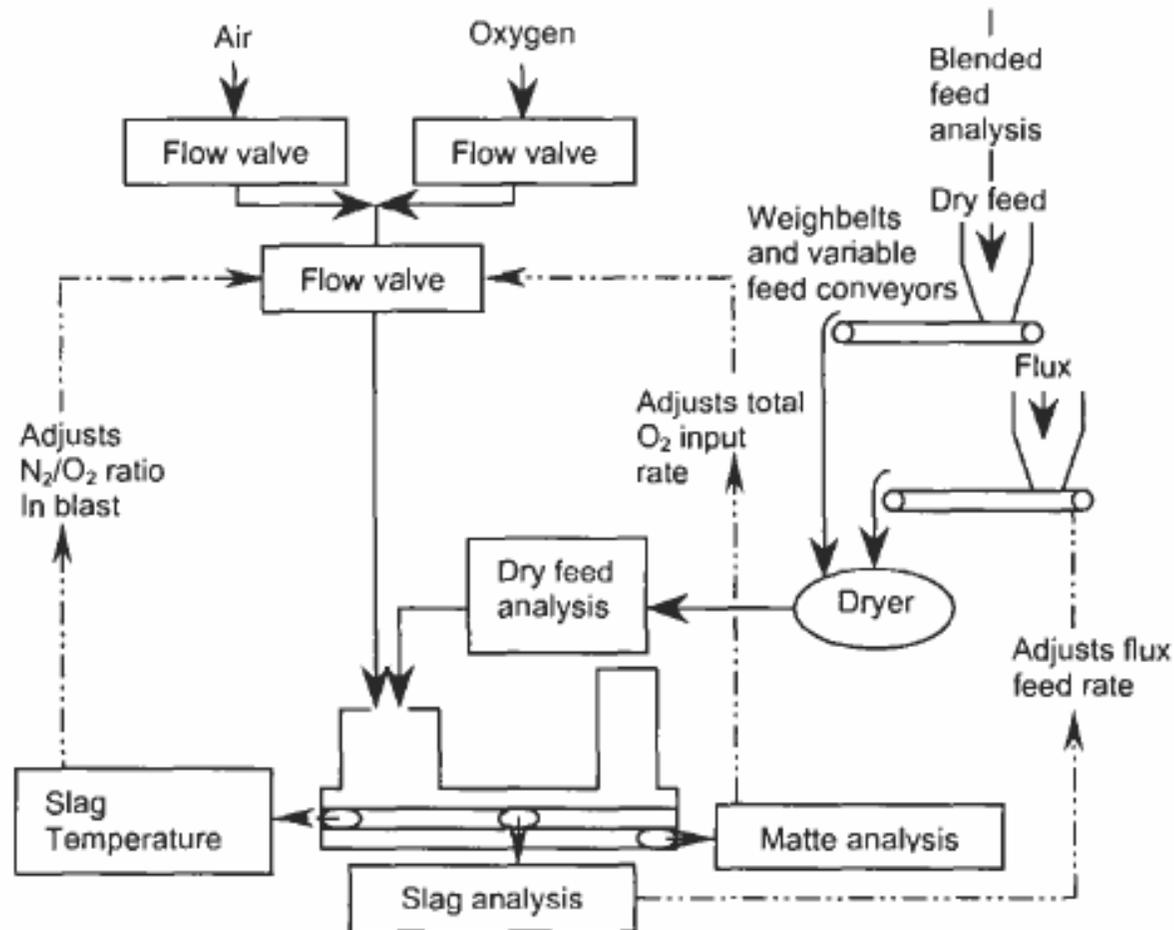
$$17540 / [(2000 \cdot 60) - 5310] = 0.153 = 15.3 \% \text{ Vol}$$

Datos Industriales

Smelter	Caraiba Metais S/A Dias d'Avila, Brazil	Norddeutsche Affinerie, Hamburg, Germany
Startup date	1982	1972
Size, inside brick, m		
hearth: w × l × h	6.8 × 24.3 × 2.9	6 × 20 × 3
reaction shaft		
diameter	5.5	6
height above settler roof	6.1	7.5
gas uptake		
diameter	5.1	4 × 8
height above roof	10	10
slag layer thickness	0.4	0.7
matte layer thickness	0.4	0.2-0.5
active slag tapholes	2	2
active matte tapholes	5	4
concentrate burners	1	1
Feed details tonnes/day		
new concentrate (dry)	2001 (32% Cu)	2850 (33% Cu)
silica flux	71 to 150	300-350
oxygen		
recycle flash furnace dust	120	230
converter dust	6	15
slag concentrate	0	no
reverts	60	150 (ladle skulls, slimes, various dusts)
other		375 molten converter slag

Datos Industriales

Smelter	Caraiba Metais S/A Dias d'Avila, Brazil	Norddeutsche Affinerie, Hamburg, Germany
Blast details		
temperature, °C	200	ambient
volume% O ₂	60	50-60
flowrate, thousand Nm ³ /hr	40	40
Production details		
matte, tonnes/day	1000 (62% Cu)	1450 (65% Cu)
slag, tonnes/day	950 (1.7% Cu)	1600 (1.5% Cu)
mass% SiO ₂ /mass% Cu	0.74	0.85
Cu recovery, flash slag	electric furnace	electric furnace
Cu recovery, converter slag	electric furnace	recycle to flash furnace
offgas, thousand Nm ³ /hour	45	50-60
vol. % SO ₂ , leaving furnace	24	30-35
dust production, tonnes/day	101-120	230
matte/slag/offgas temperature	1230/1310/1350°C	1210/1220/1350°C
Fuel inputs, kg/hour		
hydrocarbon fuel burnt in reaction shaft	oil 400 + natural gas, 400 Nm ³ /hour	no
hydrocarbon fuel in settler burners	oil, 600	oil, 1000; no coke



Example control system for Outokumpu flash furnace. The three loops, left to right, control slag temperature, slag composition and matte composition. Slag temperature may also be controlled by adjusting reaction shaft hydrocarbon burner combustion rate. It is fine-tuned by adjusting settler burner combustion rates. Matte grades $\pm 1.5\%$ Cu and temperatures $\pm 20^\circ\text{C}$ are obtained.

ERROR: syntaxerror
OFFENDING COMMAND: --nostringval--

STACK:

/Title

()

/Subject

(D:20110325111851-04'00')

/ModDate

()

/Keywords

(PDFCreator Version 0.9.5)

/Creator

(D:20110325111851-04'00')

/CreationDate

(Leandro Voisin A.)

/Author

-mark-