

---

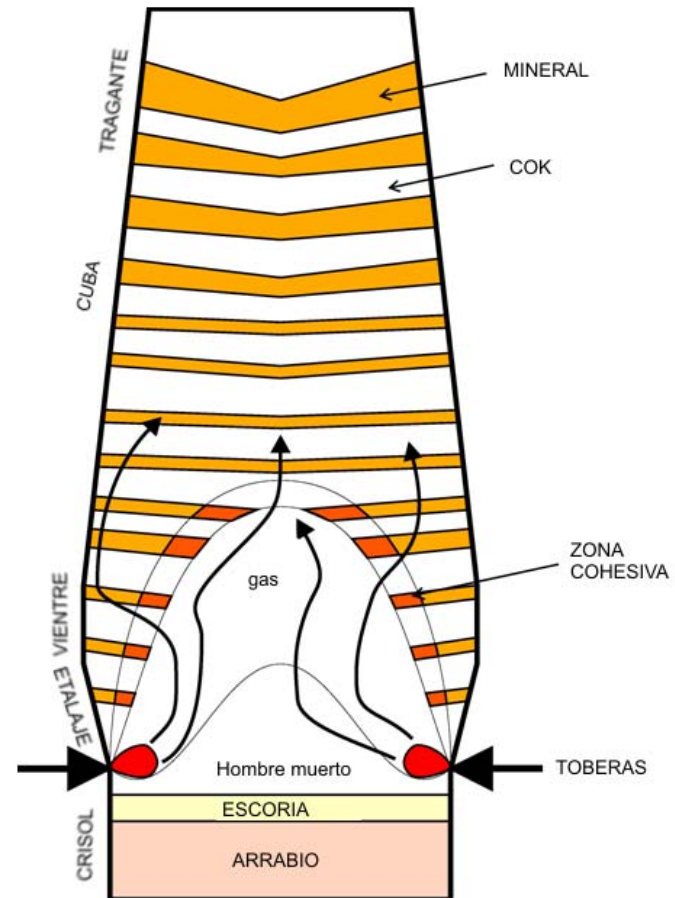
# INGENIERIA SIDERURGICA

## Proceso del horno alto

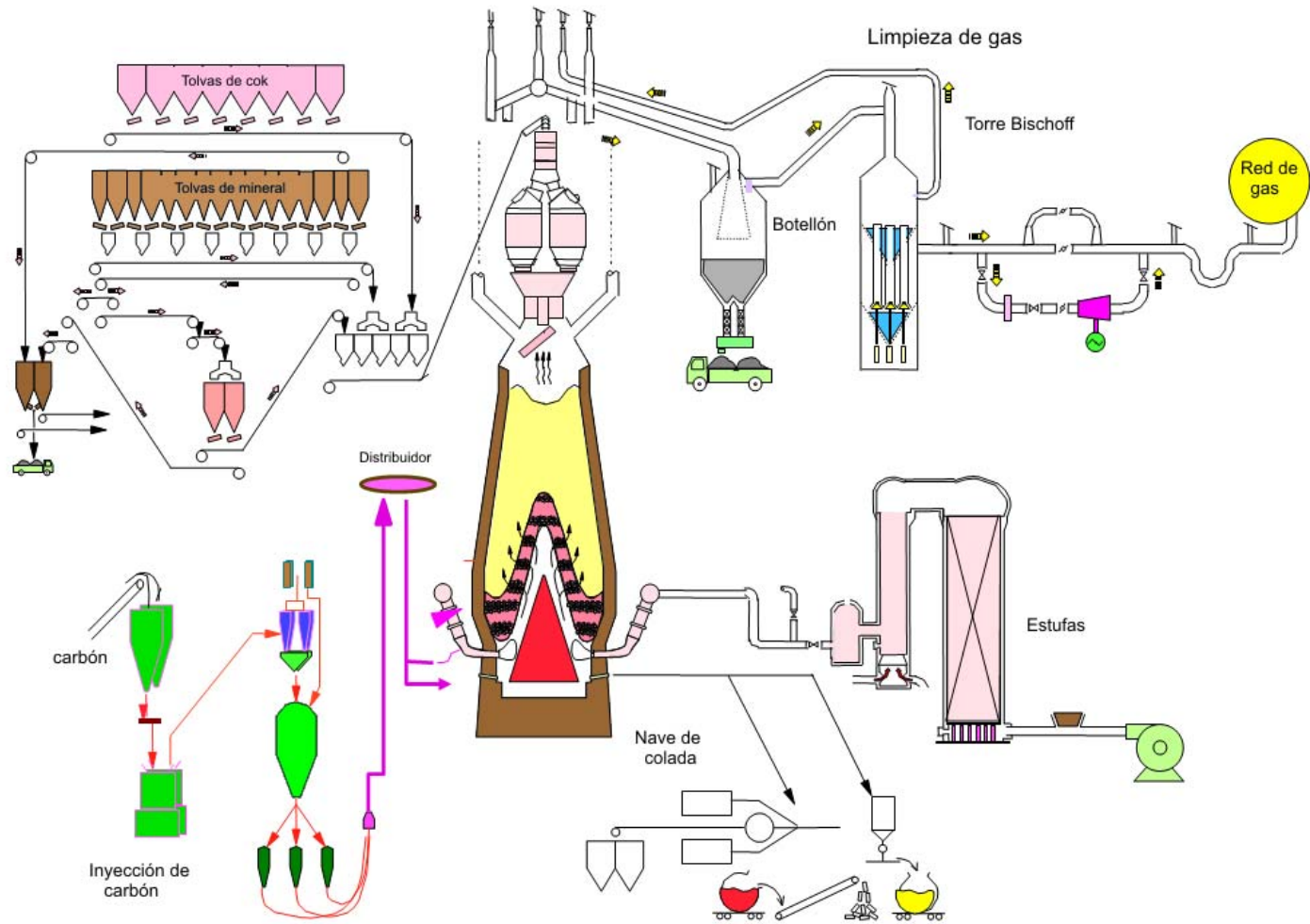
2015

# El horno

- Mineral
  - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}_x \rightarrow \text{Fe}$
- Cok
  - $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$
- Aire caliente  $1200^\circ\text{C}$



# Instalaciones auxiliares













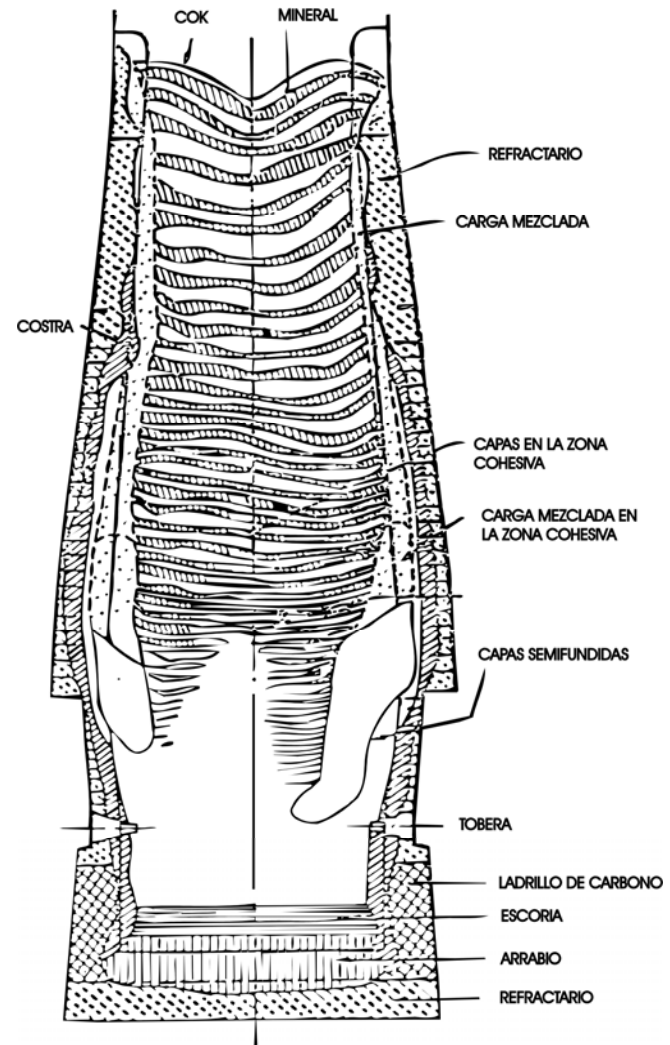




# Disección de hornos

Se realizaron en Japón entre 1968 y 1970.

- Zona granular
- Zona cohesiva
  - Isotermas de reblandecimiento 1100°C y fusión 1500°C
- “Hombre muerto” inactiva
- Zona activa de cok
- Dardo
- Crisol



# División en zonas

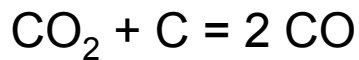
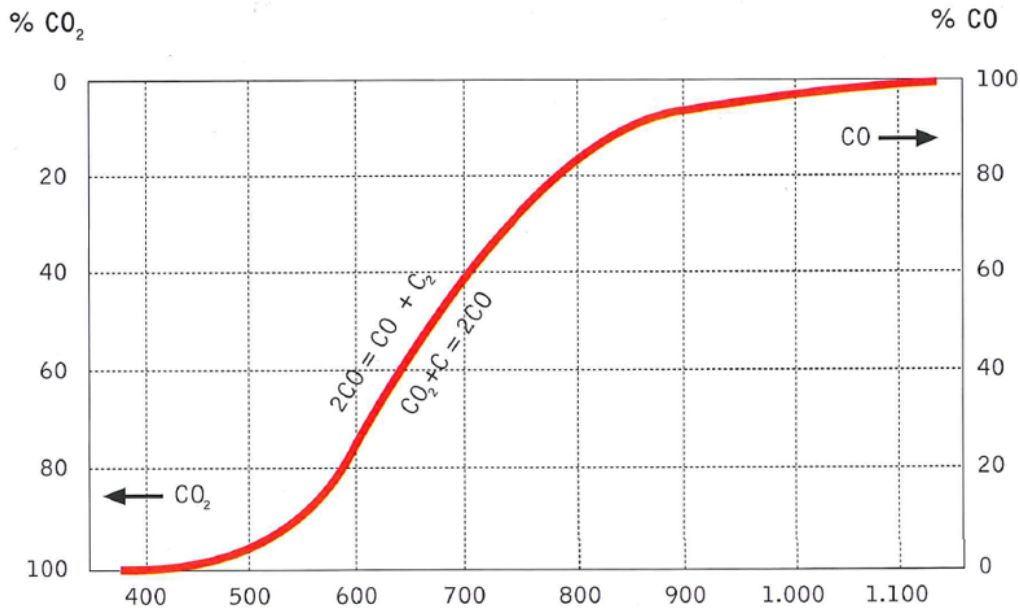


Diagrama de Boudouard  
(Carbon Solution Loss)

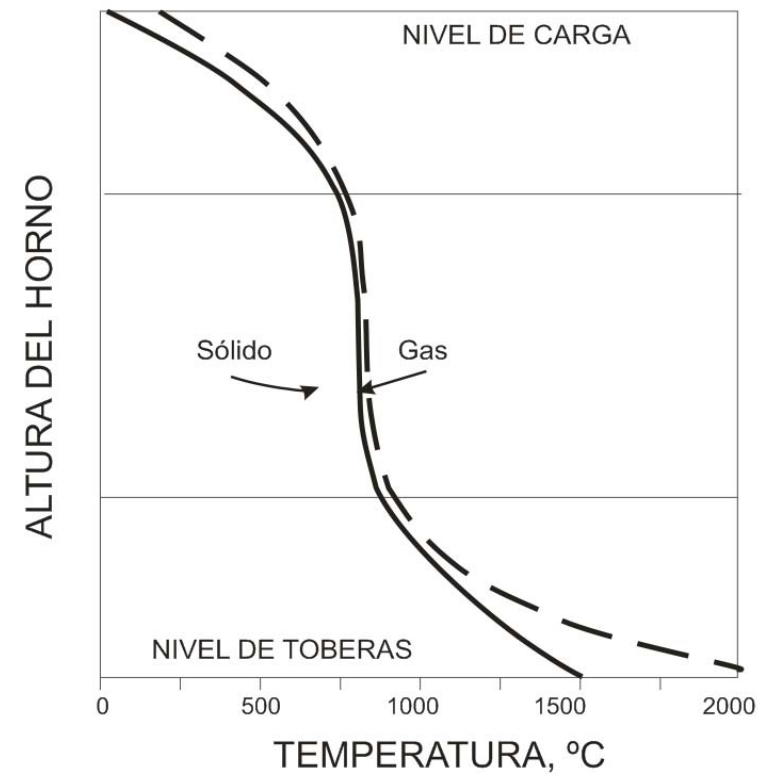
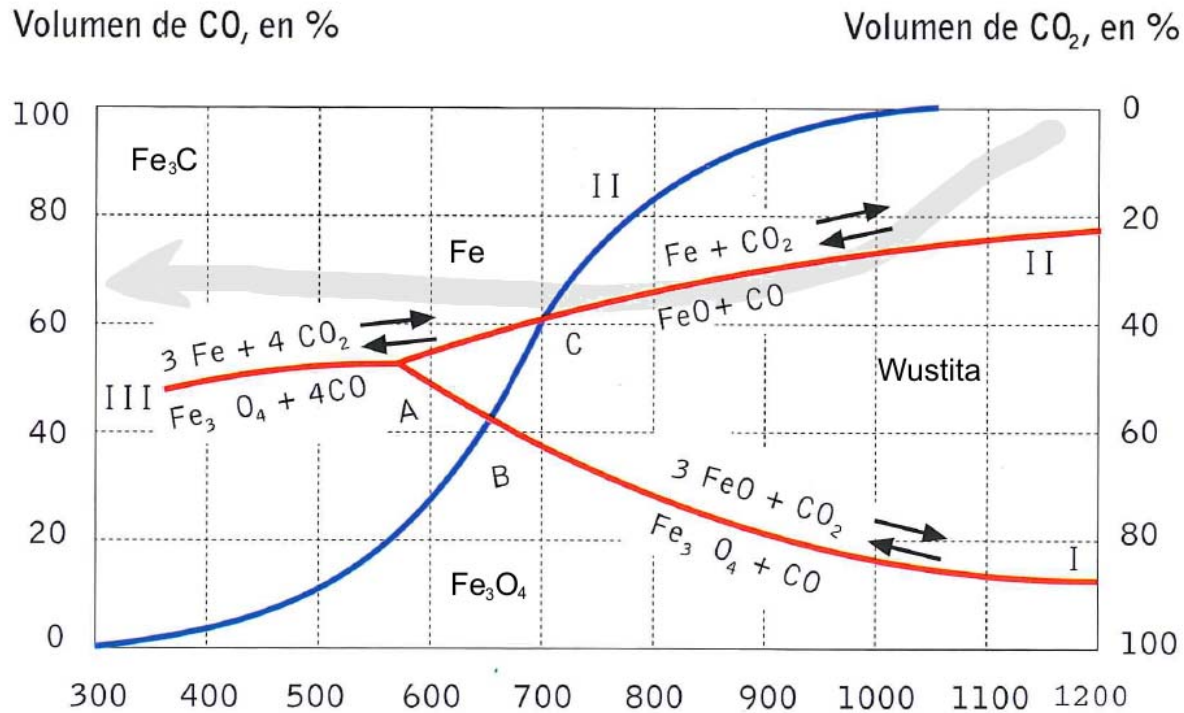


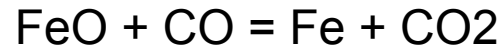
Diagrama de Reichardt

# Diagrama de Chaudron + Boudouard

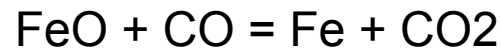


# Reducción directa e indirecta

Reducción indirecta:



Reducción directa



(simplificada  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ )

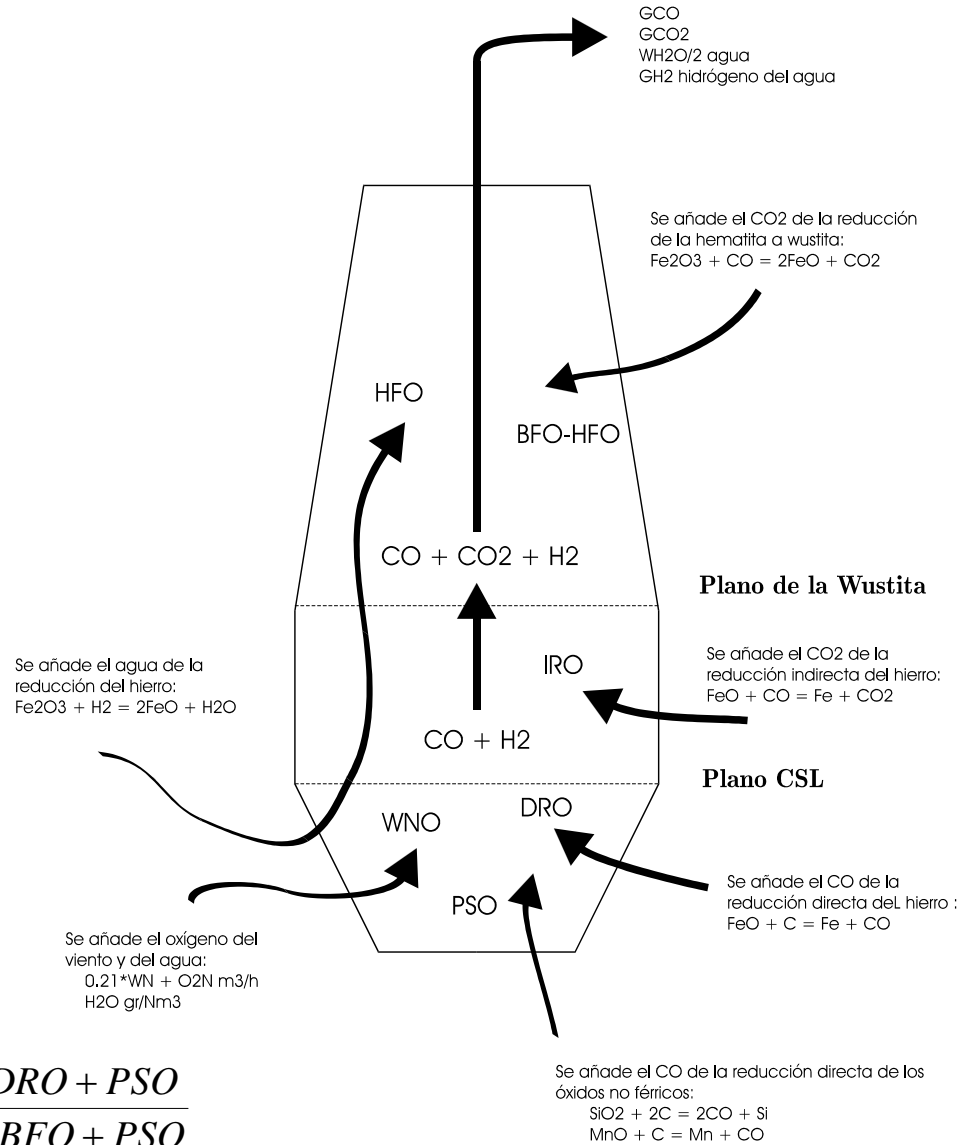
***“Existe un punto óptimo de reducción directa”***

*Si todo el gas reductor CO se generara en toberas, no se podría aprovechar debidamente el calor generado por la combustión del carbón, ni la gran cantidad de gas favorecería las reacciones de reducción.*



# Zonas

- Zona superior
  - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  reduce a wustita
- Zona reserva térmica
  - $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$
- Zona de reducción directa
  - $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$
  - $\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$
- Toberas
  - $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$



$$\% \text{ Reducción directa} = 100 \frac{\text{DRO} + \text{PSO}}{3\text{BFO} + \text{PSO}}$$

**Ejemplo:**

*Calcular el consumo y porcentaje de reducción directa de un horno con las siguientes condiciones de marcha.*

*Análisis de gas:*

$$\%CO = 22.0 ; \%CO_2 = 22.6; \%H_2 = 1.37$$

*Caudal de viento 240000 Nm<sup>3</sup> /h, humedad 26 gr/m<sup>3</sup> y análisis de arrabio:*

$$\%Si = 0.4; \%Mn = 0.56; \%C = 4.7; \%Fe=94$$

*Análisis de carbono del cok 89%.*

*Se estima una producción en función del viento de 238 t/h.*

## **Solución:**

*Hacemos un balance de CO:*

$$WNO + DRO + PSO - IRO - (BFO - HFO) = GCO \quad (1)$$

*un balance de CO<sub>2</sub> :*

$$IRO + (BFO - HFO) = GCO_2 \quad (2)$$

*y un balance de Fe:*

$$2 BFO = IRO + DRO \quad (3)$$

*De un balance de nitrógeno se calcula el gas de tragante:*

$$\%N_2 = 54.1 \quad GN = 0.79 * WN * 100 / 54.1 = 350462 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

*y de ahí*

$$GCO = 3442 \text{ kmol/h}, \quad GCO_2 = 3536 \text{ kmol/h}, \quad GH_2 = 203 \text{ kmol/h}$$

$$WH_2O = 26 * 240000 / 18000 = 347 \text{ kmol/h}$$

$$HFO = 347 - 203 = 144 \text{ kmol/h}$$

*El CO formado en toberas:*

$$WNO = 2 * 0.21 * 240000 / 22.4 + 347 = 4847 \text{ kmol/h}$$

*A partir del análisis de arrabio se calcula el CO de los óxidos no férricos:*

$$PSO = 2 * 0.4 / 100 * 238 * 1000 / 28 + 0.56 / 100 * 238 * 1000 / 55 = 92 \text{ kmol/h}$$

*De (1) y (2) se calcula la reducción directa:*

$$4847 + (DRO + PSO) = 3442 + 3536$$

$$DRO + PSO = 2131$$

$$DRO = 2039 \text{ kmol/h}$$

*De (2) y (3) se despeja BFO ( $Fe_2O_3$ ):*

$$BFO = (GCO_2 + HFO + DRO) / 3 = (3536 + 144 + 2039) / 3 = 1906 \text{ kmol/h}$$

*La producción de arrabio calculada es:*

$$\text{Arrabio} = 1906 * 112 / 1000 * 100 / 94 = 227 \text{ t/h}$$



*Consumo de carbono por la reducción directa:*

$$(DRO+PSO)*12/227 = 112.6 \text{ kg/ta}$$

*El porcentaje de reducción directa frente al total de oxígeno en la carga:*

$$100*(DRO+PSO)/(3BFO+PSO)=100*2131/(3*1906+92)=36,6\%$$

*Carbono total:*

$$4.7/100*227*1000+(GCO+GCO2)*12=94405 \text{ kg/h}$$

*Consumo de cok:*

$$100/89*94405/227 = 467 \text{ kg/ta}$$

# Diagrama de Rist

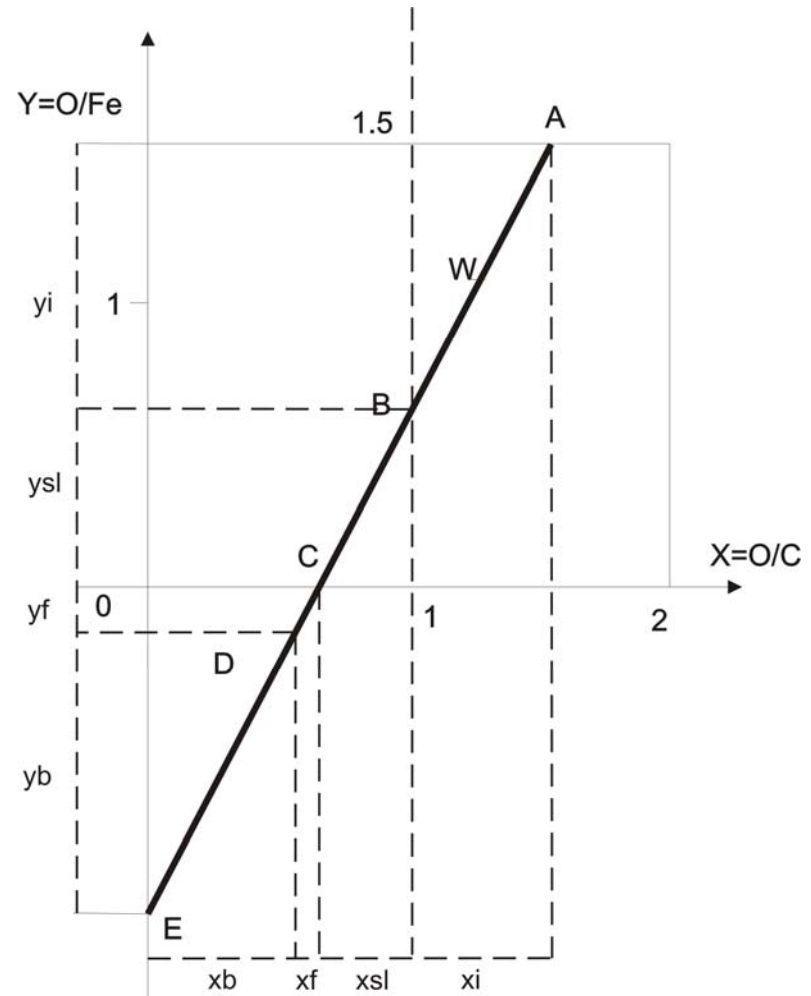
## Balance de oxígeno referido al hierro

$$O/Fe = y_i + y_{sl} + y_f + y_b$$

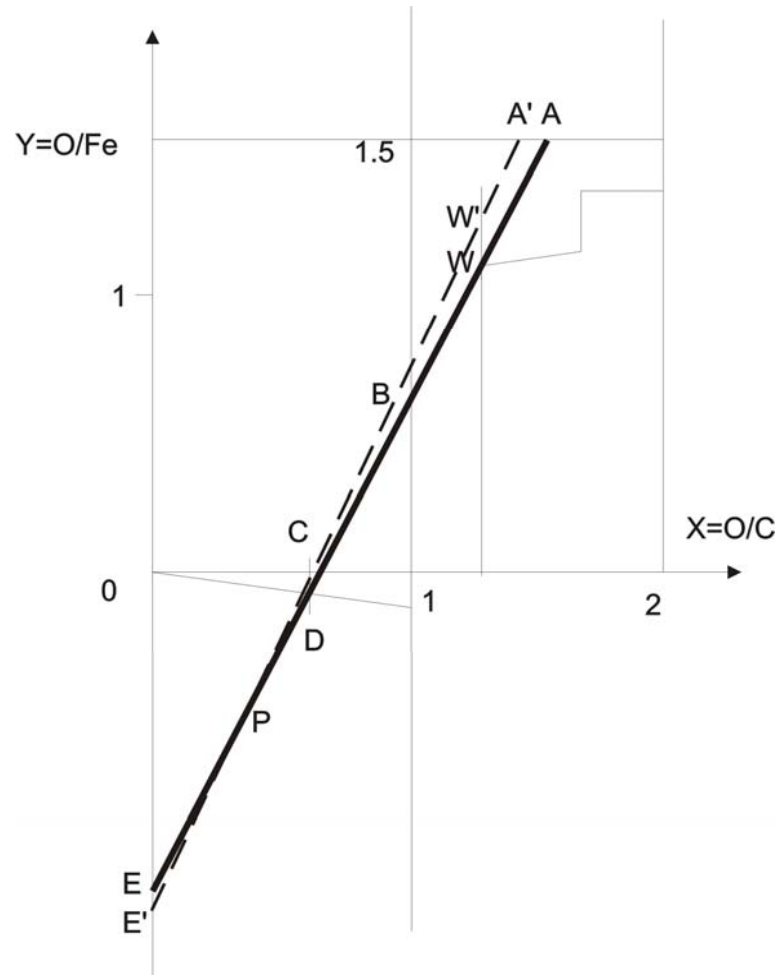
## Balance de oxígeno referido al carbono

$$O/C = x_i + x_{sl} + x_f + x_b$$

Es una recta cuya pendiente es el consumo específico en moles de C/mol de Fe.



# Diagrama de Rist: diferencia idealidad



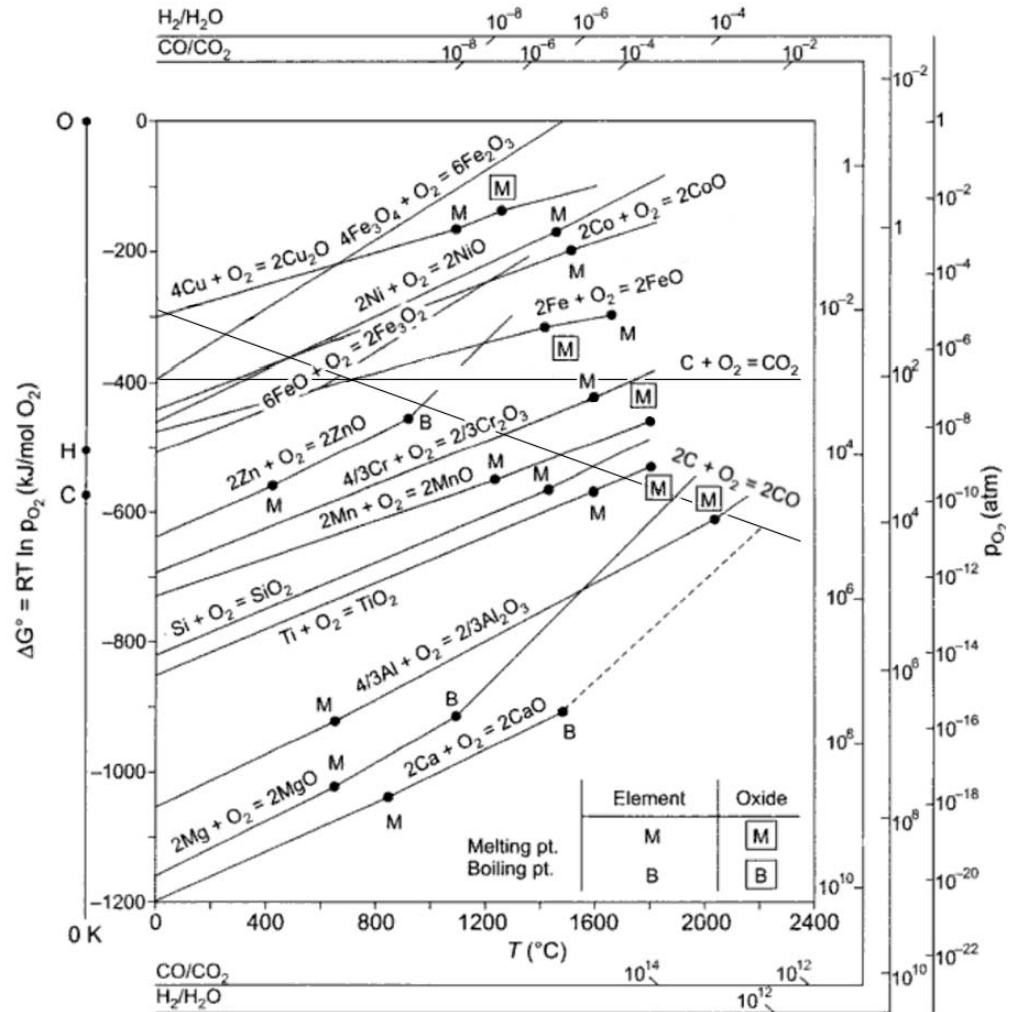
# Otros óxidos: Diagrama de Ellingham

Energía libre estándar

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

$$\Delta G^\circ = A + BT = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

Es útil para predecir las condiciones bajo las cuales un óxido será reducido a metal





# Puntos destacables

- Valores más negativos indican mayor estabilidad del óxido
- Pendiente positiva ( $\Delta S^\circ < 0$ ) al disminuir el oxígeno gas. Menor estabilidad del óxido con la temperatura
- En fase gaseosa la entropía cambia más rápidamente que en fase líquida
- Los elementos más bajos pueden reducir a los situados encima en el gráfico:  $M_1O + M_2 = M_1 + M_2O$
- Las reacciones  $C + O_2 = CO_2$  y  $2C + O_2 = 2 CO$  se cruzan a  $705^\circ\text{C}$ . Siendo el  $CO_2$  más estable a bajas temperaturas (reacción de Boudouard).
- El monóxido  $CO$  reducirá a la mayoría de los óxidos del horno por encima de  $1000^\circ\text{C}$ .

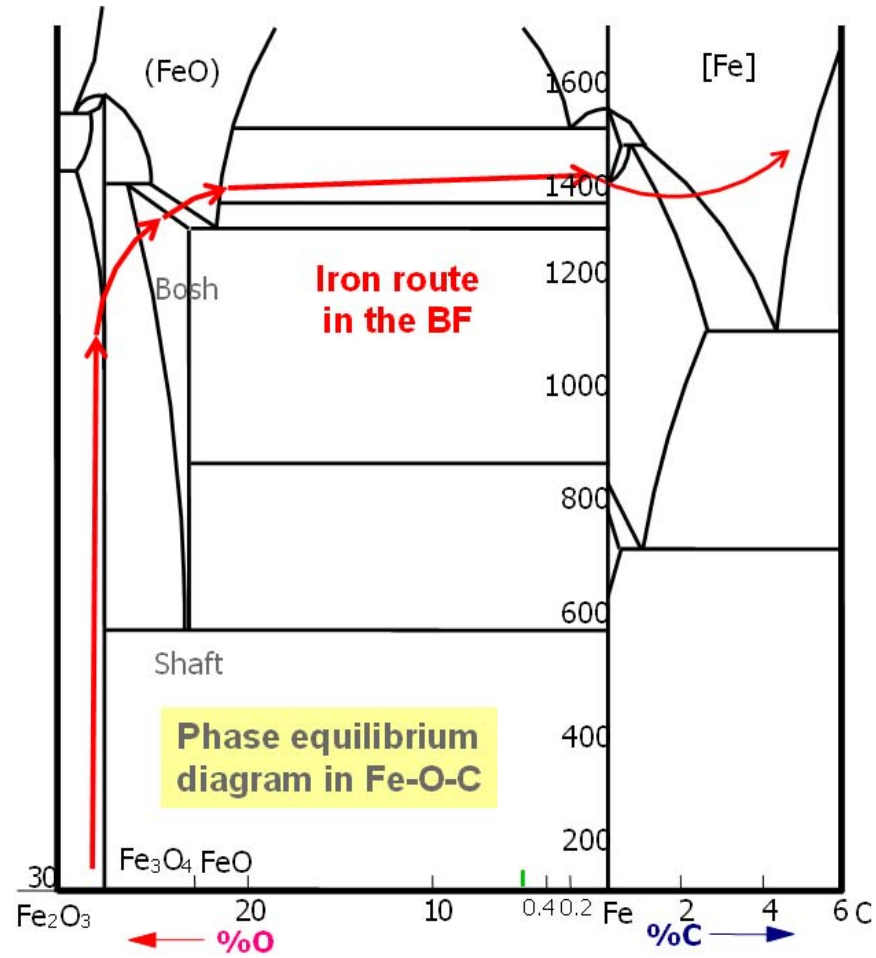
# Oxidos en el horno

- **SiO<sub>2</sub>** la afinidad por del silicio por el oxígeno es muy alta. En condiciones normales permanece con la escoria.
- **MnO** es más estable que los óxidos de hierro. Un 70% pasa al arrabio.
- **Cromo** es similar al manganeso y vanadio. Tiene afinidad por le carbono Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> dando ferrocromos muy carburados.
- **Zn**, el zinc es arrastrado con el gas formando incrustaciones en la cuba.
- **Titanio, aluminio y calcio** tienen gran afinidad por el oxígeno. Una pequeña cantidad para al arrabio como TiC.
- **Cobre, cobalto, níquel y estaño** son menos oxidable que el hierro y pasan al arrabio
- **Fósforo y arsénico** también pasan al arrabio.
- **Azufre**, la estabilidad del SO<sub>2</sub> es menor que la del FeO. Se forma FeS que se disuelve en arrabio líquido pero no sólido. CaS pasa a la escoria.

# Escorias

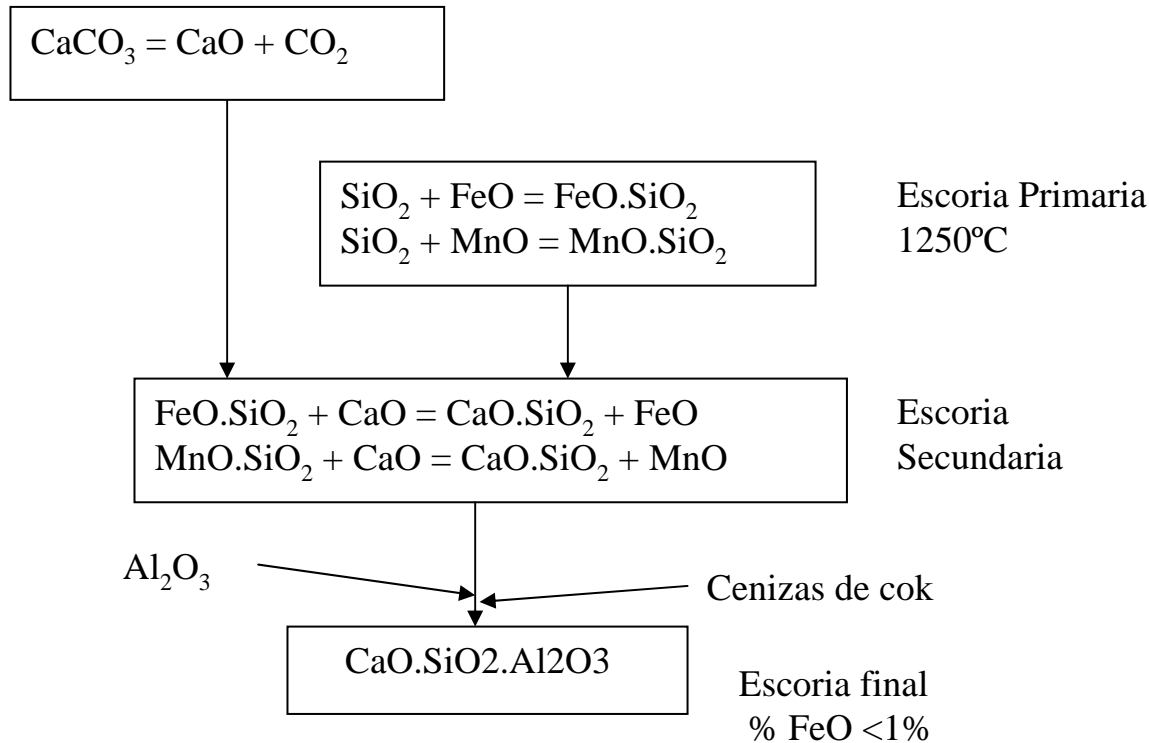
	Arrabio	Escoria	Tragan te
SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO		SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO formando óxidos más complejos	
VO, MnO	50%	50%	
FeO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , CuO, NiO	arrabio		
Zn			con el gas
Pb	al fondo del crisol		
FeS	0.001%	MnS, CaS, MgS	

# Carburación del hierro



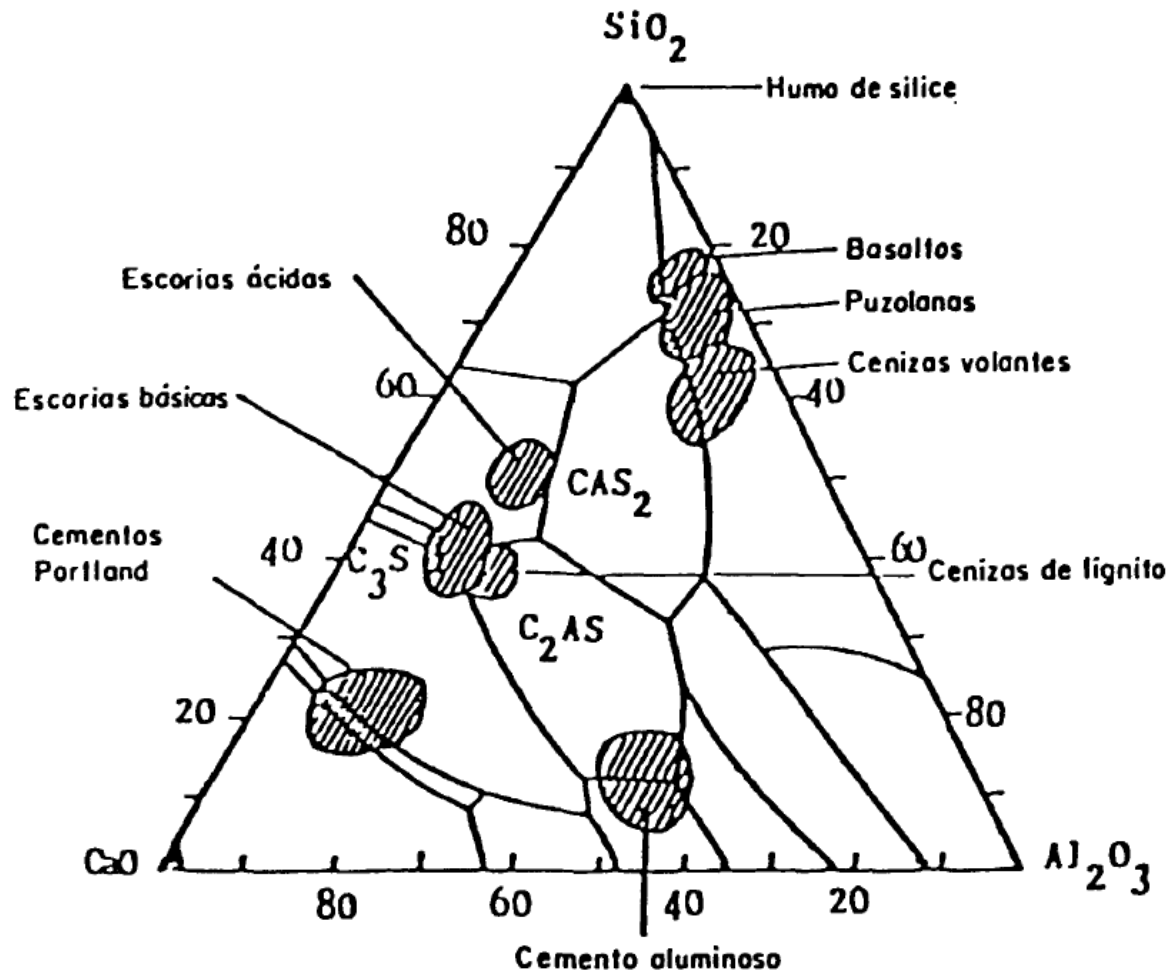


# Escoria primaria y secundaria

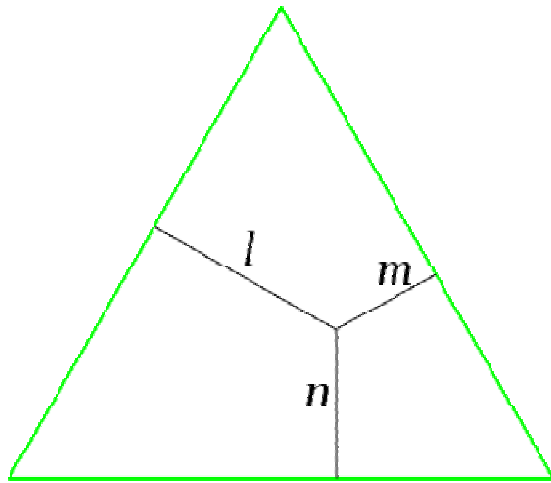


CaO 35%, SiO<sub>2</sub> 30%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20%, MgO 10%, CaS 4%, FeO 1%

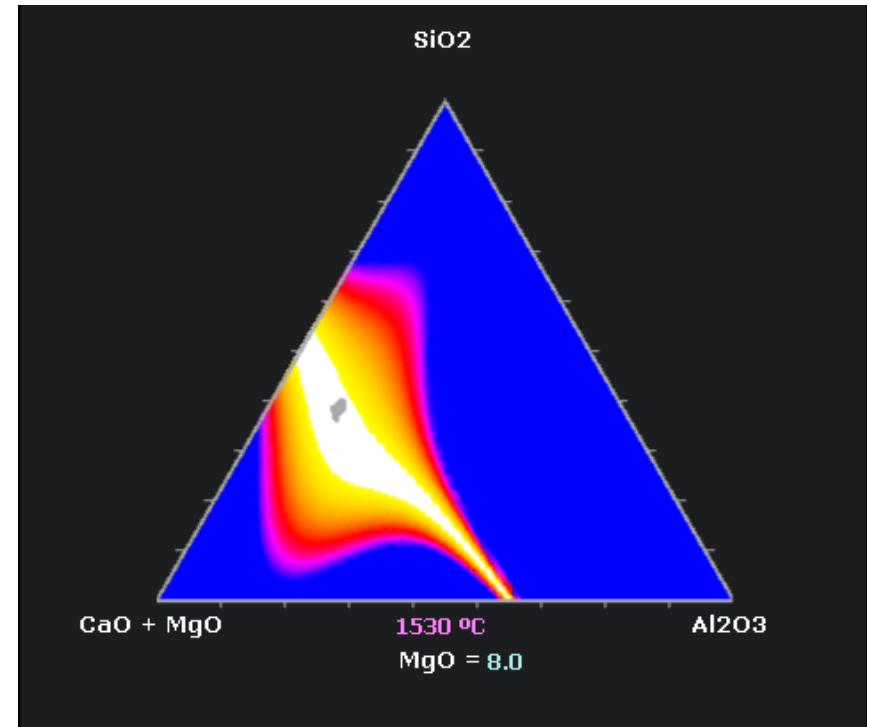
# Diagrama CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>



# Diagrama ternario: viscosidad



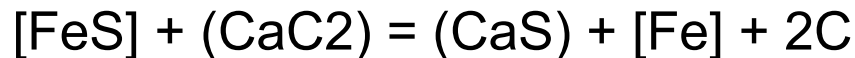
Teorema de Viviani  $h = l + m + n$



CaO 35%,  $\text{SiO}_2$  30%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  20%, MgO 10%, CaS 4%, FeO 1%

# Desulfuración del arrabio

- El azufre entra al horno principalmente con el combustible, cok, carbón, etc.
- La desulfuración tiene lugar principalmente en el horno.  
$$[\text{FeS}] + (\text{CaO}) = (\text{CaS}) + (\text{FeO}) - 3500 \text{ kcal/mol}$$
- Aumenta con:
  - Alta temperatura
  - Medio básico (Índice de basicidad alto  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  )
  - Ambiente reductor que destruya el FeO (por ejemplo CO, Mn, etc)
  - Mayor volumen de escoria
- Desulfuración externa en torpedo o cuchara mediante CaC<sub>2</sub>, CaSi, Cal+Mg, etc.



# Coeficiente de reparto

La reacción de desulfuración es reversible y su constante de equilibrio  $K$  sería:

$$K = \frac{(\% CaS)(\% FeO)}{[\% FeS](\% CaO)}$$

El coeficiente de reparto se define como:

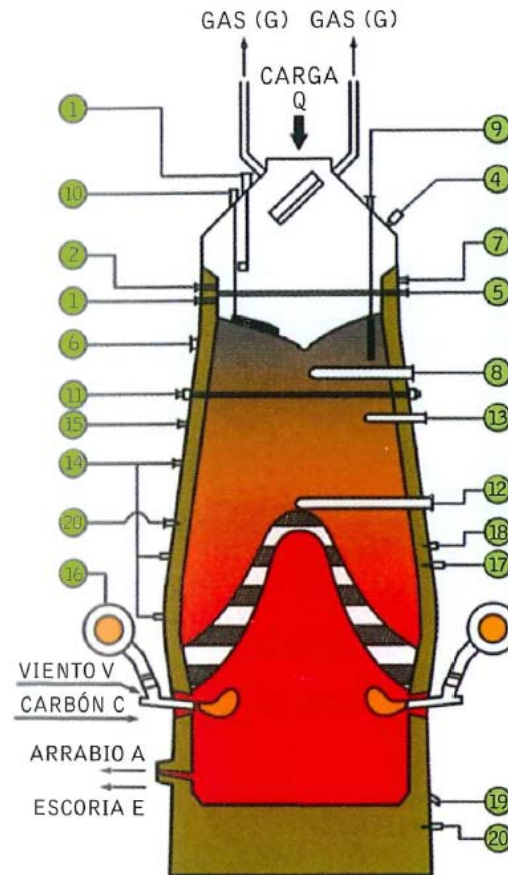
$$L_s = \frac{(\% CaS)}{[\% FeS]} = K \frac{(\% CaO)}{(\% FeO)}$$

Experimentalmente se prueban relaciones como:

$$\log L_s = 3.44 \sum K_i \cdot Ni - \log [\text{wt}\% \text{ O}] - 10980 / T + 3.50$$

# Control de proceso

Nivel 1

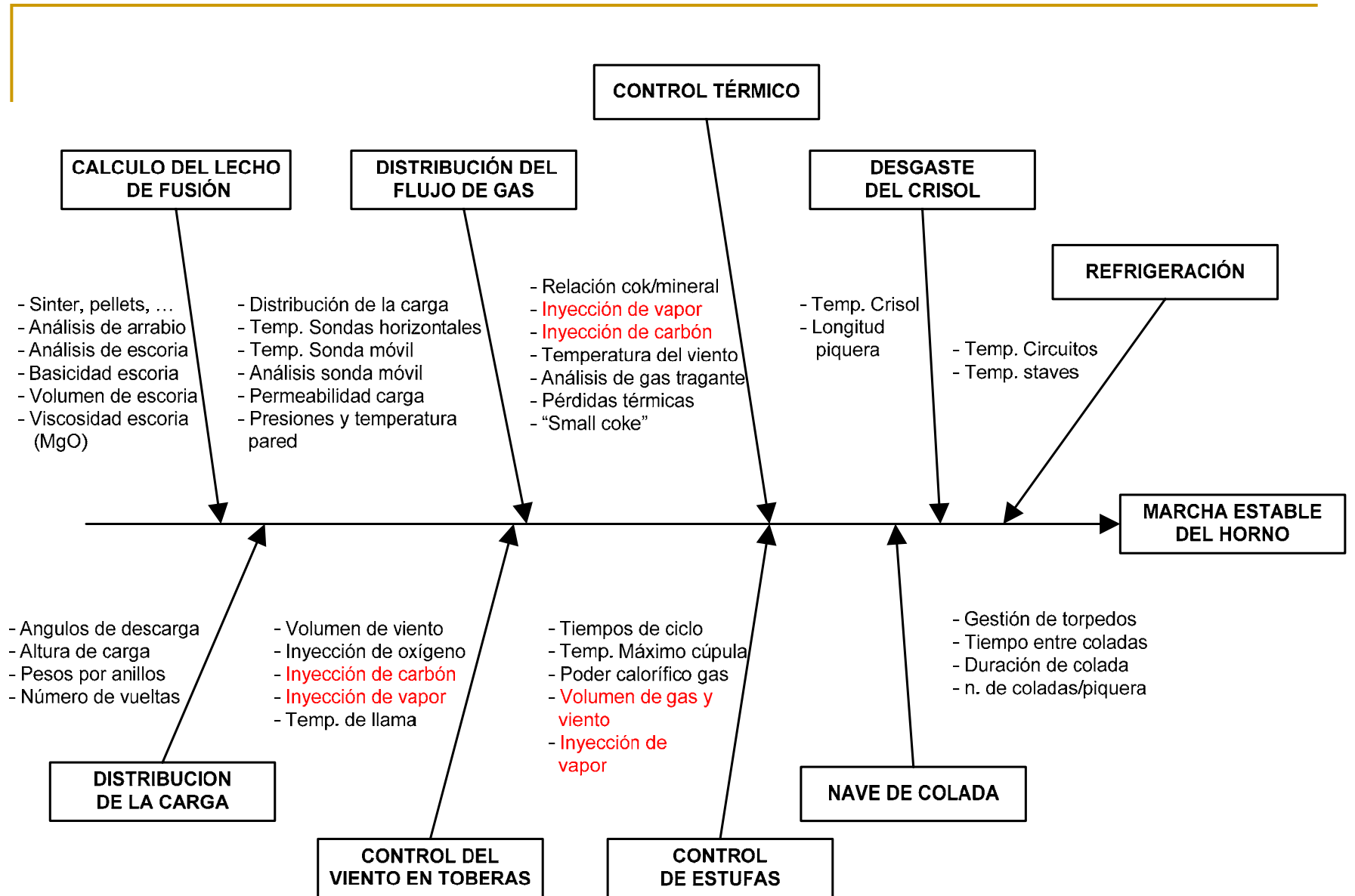


- |    |                                     |
|----|-------------------------------------|
| 1  | PERFIL DE LA CARGA                  |
| 2  | TRAYECTORIA DE CAÍDA DE LA CARGA    |
| 3  | SONDA DE ALTURA DE CARGA            |
| 4  | CÁMARA INFRARROJOS                  |
| 5  | SONDA TRANSVERSAL DEL TRAGANTE      |
| 6  | TEMPERATURAS FLUJO EN PAREDES       |
| 7  | VELOCIDAD GAS DEL TRAGANTE          |
| 8  | SONDA DE LA ALTA CUBA               |
| 9  | SONDA VERTICAL                      |
| 10 | SONDA DESCENSO CARGA                |
| 11 | SONDA TRANSVERSAL DE LA ALTA CUBA   |
| 12 | SONDA DE LA BAJA CUBA               |
| 13 | TOMA DE MUESTRAS EN LA CUBA         |
| 14 | SONDAS DE PRESIÓN EN LA CUBA        |
| 15 | SONDAS DE PULSACIÓN DE PRESIÓN      |
| 16 | PRESIÓN DE VIENTO CALIENTE          |
| 17 | TEMPERATURAS REFRACTARIO DE CUBA    |
| 18 | SENSORES REFRACTARIO CUBA           |
| 19 | TEMPERATURAS REFRACTARIO DEL CRISOL |
| 20 | SENSORES REFRACTARIO CRISOL         |

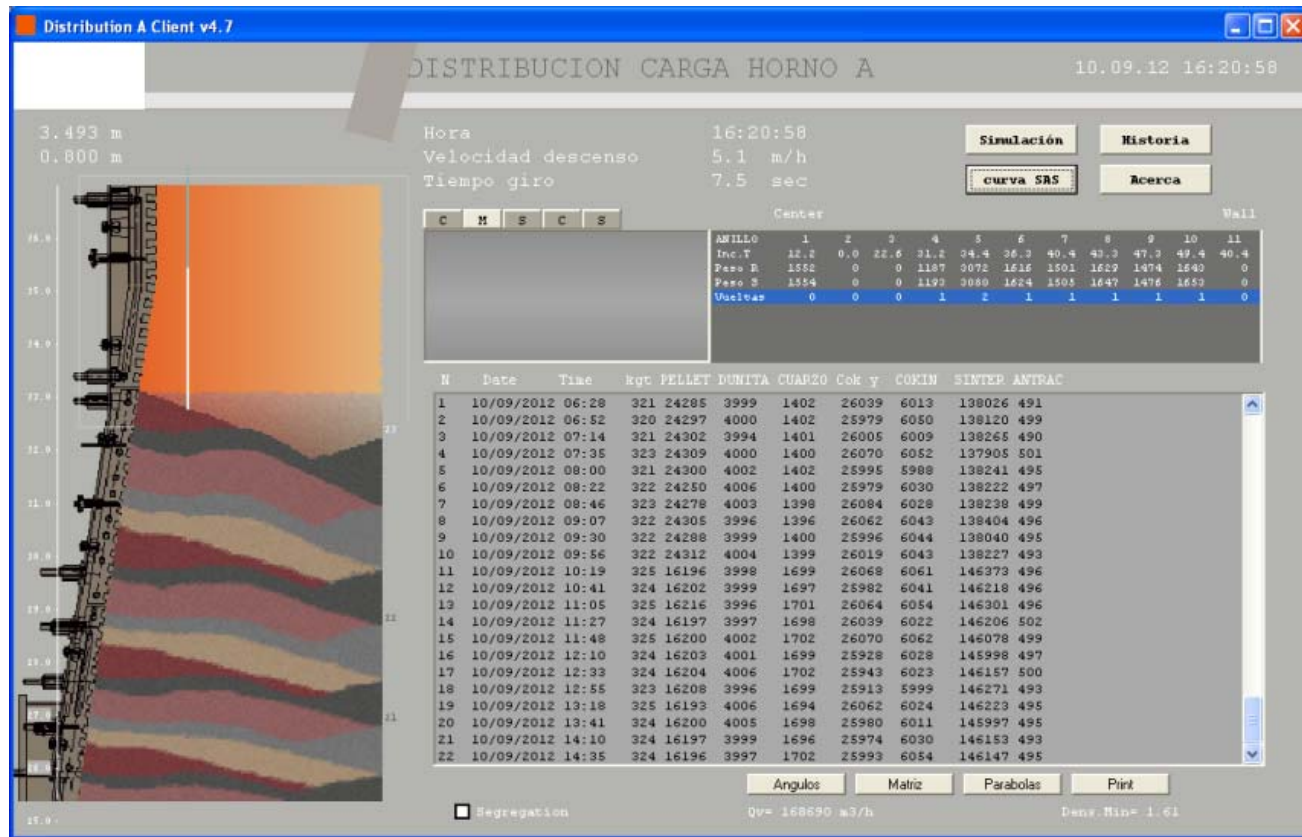


# Modelos matemáticos: Nivel 2

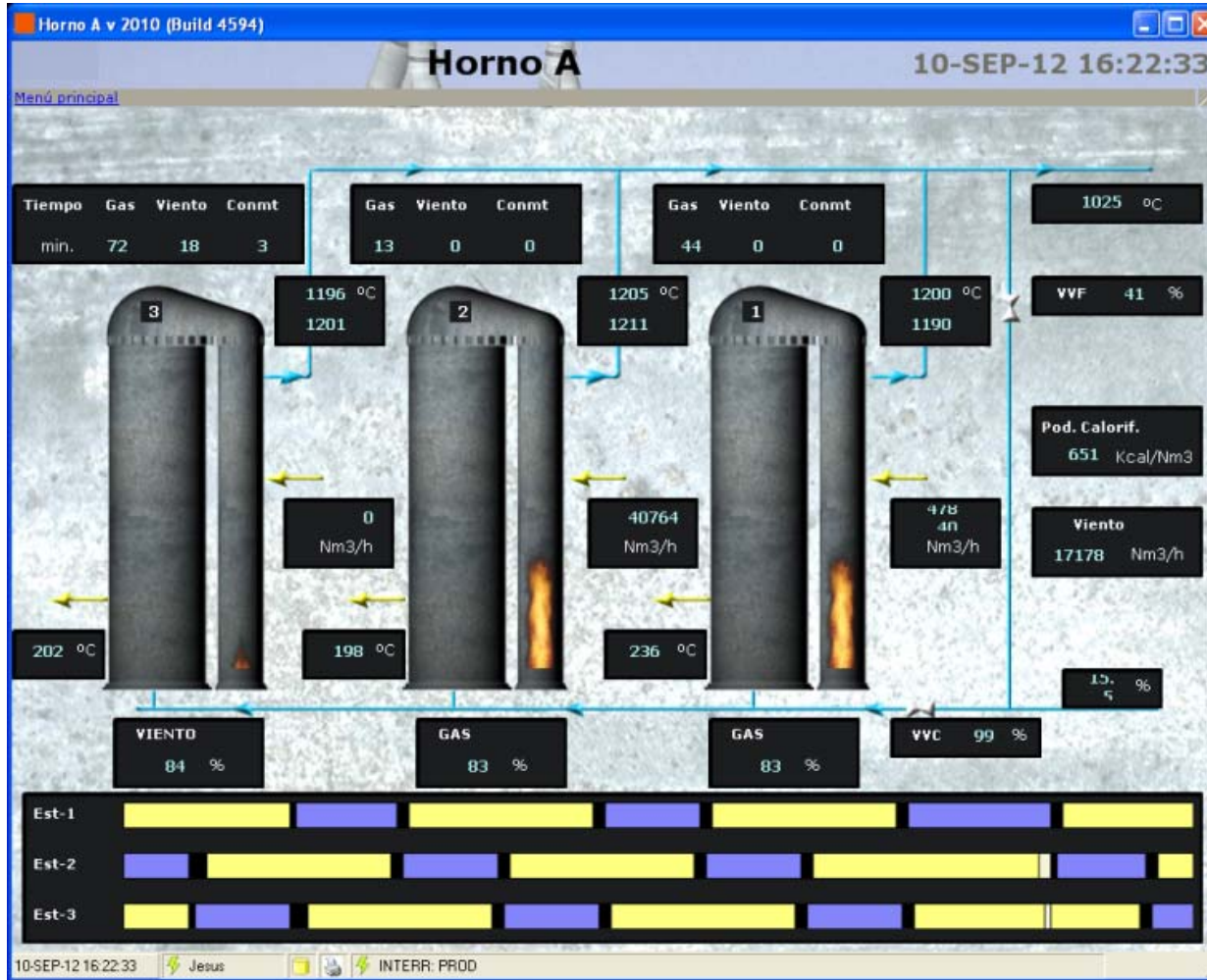
- **Cálculo de la carga**
- **Consigna de gas de las estufas**
- **Cálculo térmico**, control de inyección de carbón y vapor:
  - **Modelos estáticos** (ej. MMHF). Necesitan una constante supervisión por parte del operador para definir puntos de referencia.
  - **Modelo dinámicos**. Se autoajustan, no necesitan supervisión pero trabajo inicial mayor.



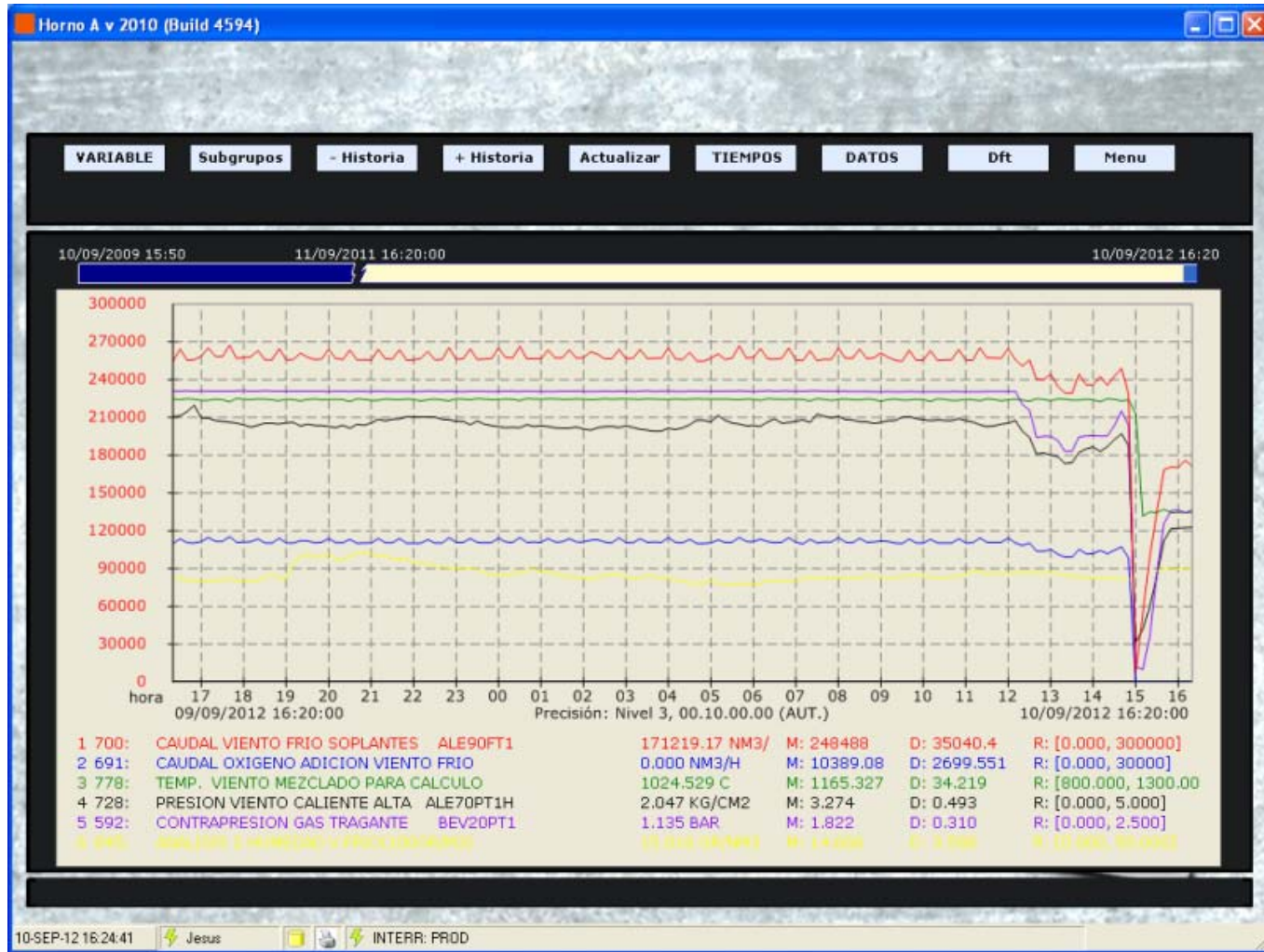
# Distribución de la carga



# Control de estufas



# Curvas



---

# Bibliografía

- Principles of Blast Furnace Ironmaking: Theory and Practice. Anil Kumar Biswas. ISBN 0949917087
  - Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction. ISBN 978-1-60750-040-7
  - THE IRON BEAST FURNACE Theory and Practice. ISBN 0-08-023258—2
-