

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



“ OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ACERO LÍQUIDO
EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO”

Informe de Ingeniería

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA**

Presentado por

José Alberto, BERNA TAMAYO

LIMA – PERÚ
2001

“A Hermiliano y Emma, mis padres que me apoyan y alientan permanentemente.”

“A Fanny, Valeria y Gabriela, mi esposa e hijas por su amor, paciencia y apoyo incondicional”

Índice

INTRODUCCIÓN	2
1. Acería eléctrica	4
1.1. Elaboración de aceros en hornos eléctricos de arco	5
1.2. Evolución de las etapas de producción de acero en hornos eléctricos de arco	6
2. Hornos de ultra alta potencia	8
3. Optimización del arco eléctrico para la fusión de chatarra	12
3.1. Relación, impedancia, reactancia y resistencia	14
3.2. Longitud de arco	17
3.3. Índice de erosión del refractario	18
3.4. Cálculo del máximo daño ala chatarra	20
4. Características de la producción de acero liquido en hornos eléctricos de ultra alta potencia con el uso de hierro esponja	21
4.1. Principales consideraciones para el uso de hierro esponja en hornos eléctricos de arco	22
4.1.1. La ganga	22
4.1.2. El carbón	24
4.1.3. Grado de metalización	25
4.2. Diseño de la carga	28
4.2.1. Carga por batch	29
4.2.2. Alimentación continua	30
5. Uso de energía química en los hornos eléctricos de ultra alta potencia	32
5.1. Empleo de oxígeno	32
5.1.1. Quemadores oxifuel	33
5.1.2. Inyección de oxígeno	34
5.1.3. Optimización del uso del carbón	35
5.1.3.1. Aporte de energía	36
5.1.4. Post combustión	36
5.1.4.1. Aporte de energía de la post combustión	37
5.1.4.2. Transferencia de energía	37
5.2. Limitaciones del uso de la energía química	38
6. Escorias en hornos eléctricos	41

6.1. Escoria espumosa	41
6.1.1. Condiciones básicas para la formación de escoria espumosa	42
6.1.2. Espumación	42
6.2. Viscosidad de la escoria	43
6.2.1. Características de las escorias en hornos eléctricos	44
6.3. Generación de gas	44
6.4. Determinación de los niveles de saturación de MgO por el uso de los sistemas CaO-MgO-SiO ₂ -FeO	45
6.5. Diagramas isotérmicos de solubilidad	49
6.6. Variación de los diagramas isotérmicos con la basicidad	52
6.6.1. Efectos de la alúmina	54
6.6.2. Efecto de la temperatura sobre la solubilidad del MgO	54
6.7. Diseño y evaluación de la composición de la escoria	55
7. Aplicación de las mejoras	57
7.1. Control del carbón	57
7.2. Control de la escoria espumosa	60
7.2.1. Mecanismos de la transferencia de calor durante la alimentación continua	61
7.2.2. Mecanismo de control ambiental	62
7.3. Control de ingreso de energía	62
7.4. Control ambiental	63
8. Resultados obtenidos	64
8.1. Balance de energía	64
8.2. Balance de hierro	65
8.3. Índices alcanzados	65
9. Conclusiones	66
10. Apéndice	69
BIBLIOGRAFIA	75

TEMA:

***"OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
CERO LÍQUIDO EN HORNOS ELECTRICOS
DE ARCO"***

Autor: José Alberto BERNA TAMAYO

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la tarea de las acerías eléctricas es la producción de aceros de calidad con costos competitivos para el mercado.

Es por ello que se realizan permanentes esfuerzos para la optimización de los procesos en los hornos eléctricos.

Un análisis de la distribución de costos de producción orienta la dirección de los esfuerzos a realizar.

El costo de palanquilla compuesto de costos directos e indirectos, señala que la materia prima involucra casi el 50% del costo total, esta fuerte dependencia orientaría a la búsqueda de una chatarra de menor valor, sin embargo la escasez de esta, así como necesidades de calidad obligan al uso de sustitutos como los prereducidos(hierro esponja) de mayor precio, lo que exige el máximo provecho posible de la carga metálica, en términos siderúrgicos, aumentar el rendimiento metálico.

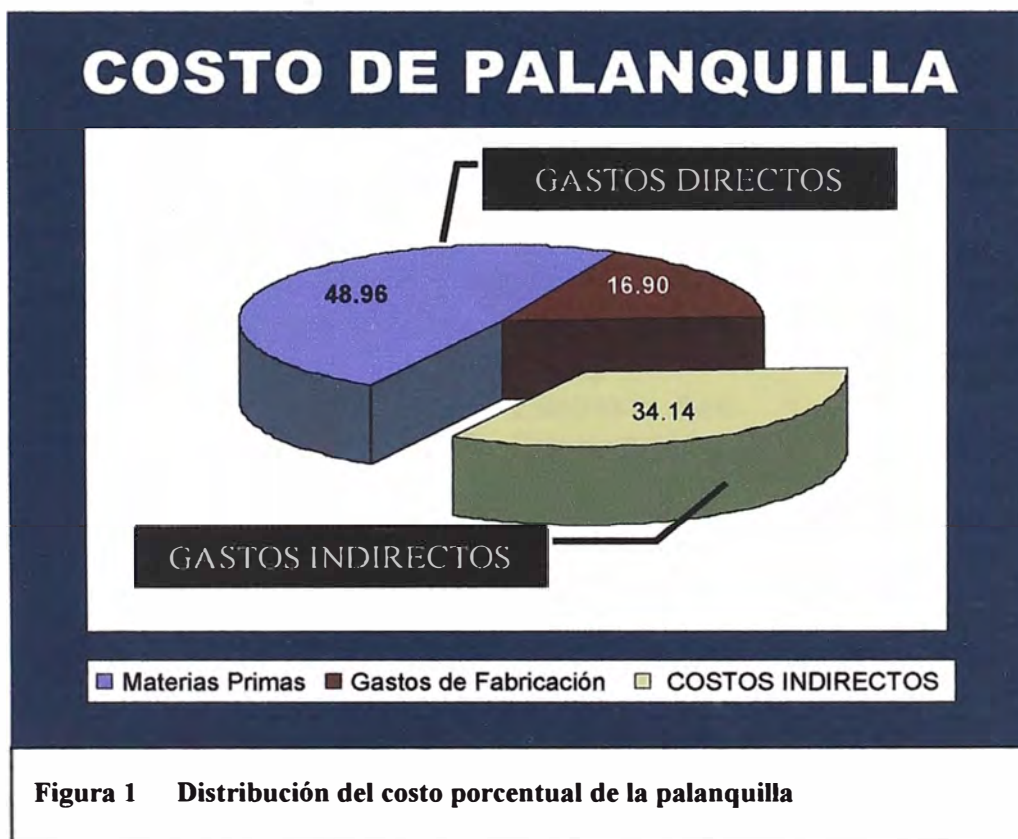
Los costos indirectos en su mayoría costos fijos, representan el 34% del costo total, los que están relacionados con la productividad, es decir, un incremento de producción reducirá el valor de los costos indirectos.

Respecto a los gastos de fabricación, ellos involucran la eficiencia operativa en el uso de recursos para la transformación como es el caso de la energía eléctrica.

Bajo estos criterios el desarrollo de los hornos eléctricos ha mantenido la idea de elevar la productividad con una disminución del consumo de energía eléctrica con un máximo aprovechamiento de la materia prima. Así, surgen los criterios de ultra alta potencia, que acompañados de la metalurgia secundaria en el horno cuchara ha causado una revolución en los hornos eléctricos. La ultra alta potencia posibilita un alto ingreso de energía eléctrica al horno con la finalidad de realizar una fusión rápida; esto involucra el uso de arcos eléctricos con mayores voltajes y de mayor longitud, lo que exige una alta capacidad para poder aprovechar adecuadamente el alto ingreso de energía; aquí es importante el desarrollo de la práctica de “*escoria espumosa*” que permita proteger a los refractarios del arco eléctrico, a la vez que hace eficiente la transferencia de energía del arco a la carga metálica. Mas aún una práctica adecuada de “*escoria espumosa*”, permite un incremento en el rendimiento metálico.

Adicionalmente el uso de escoria espumosa en el proceso de fabricación de acero líquido en el horno eléctrico permite aprovechar el aporte de la energía química producida por el uso de oxígeno.

El presente trabajo señala los principales conceptos del uso de ultra alta potencia para la fusión de una carga compuesta por un alto porcentaje de hierro esponja con una adecuada práctica de escoria espumosa que permita a su vez el aprovechamiento de la energía química producida por el uso de oxígeno.



1. ACERÍA ELÉCTRICA

Los hornos eléctricos fueron originalmente diseñados para la producción de acero a partir de la chatarra, es por ello, que su producción estaba orientada a la fabricación de aceros estructurales así como los de alta aleación debido a sus contenidos de residuales (Cr, Ni, Mo, Sn, Cu, etc.) dejándose a la producción de aceros por convertidores la fabricación de aceros de bajo carbono. Sin embargo con el tiempo, las necesidades del mercado, escasez de chatarra, así como posibilidades tecnológicas y disponibilidad de recursos naturales (minerales de hierro, carbón, gas natural, etc.) posibilitaron el desarrollo del hierro esponja, lo cual ha permitido que acerías eléctricas puedan elaborar aceros de calidades similares que las producidas por convertidores (tubos, planchas, alambres, etc.).

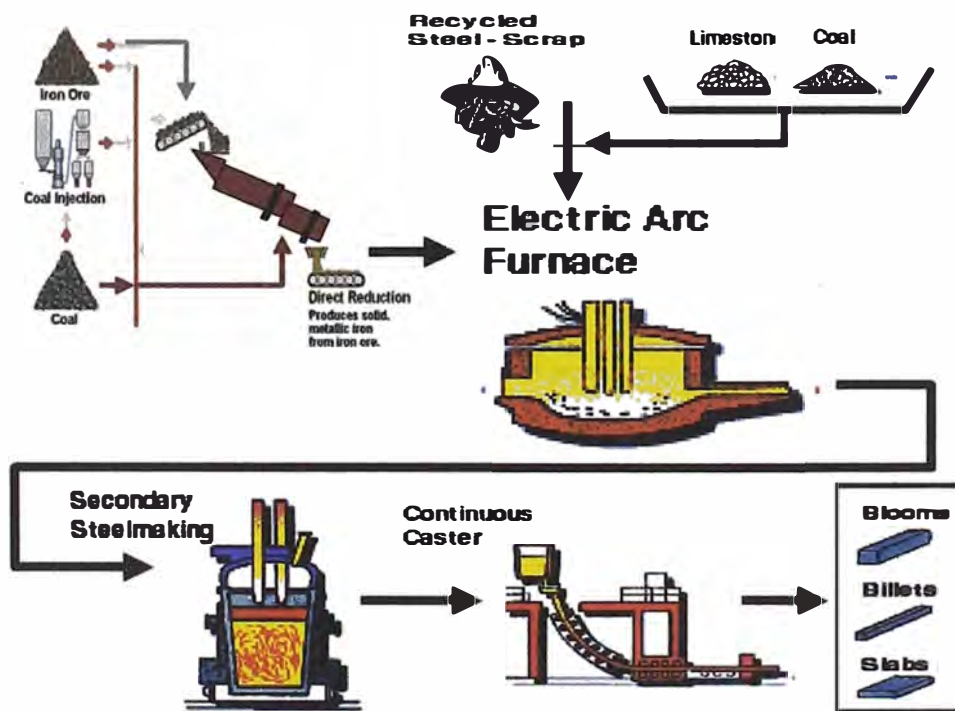


Figura 2. Diagrama de flujo de una acería eléctrica.

Una acería eléctrica está básicamente constituida por las instalaciones de los hornos eléctricos, horno cuchara, la colada continua e indudablemente el parque de industrialización de la chatarra. Pero además, en muchas acerías es común encontrar instalaciones adyacentes a las del horno eléctrico para producción de hierro esponja, el cual sustituye parcial o totalmente a la chatarra en la carga del horno eléctrico. Cabe señalar que en instalaciones modernas para la elaboración de aceros de cada vez más

exigente calidad deben considerarse estaciones de desgasificación del acero como la R-H, VOD, VRD u otras.

La potencialidad de producción de una acería eléctrica siempre estará en función de la potencialidad de producción del horno eléctrico y el acompañamiento debido de las otras instalaciones. La figura 2 presenta un esquema de una acería eléctrica básica conjuntamente con un horno de producción de hierro esponja.

1.1. ELABORACIÓN DE ACERO LÍQUIDO EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO

La fabricación de acero líquido en hornos eléctricos de arco consiste en: la transformación de la carga metálica (chatarra, pre-reducidos y/o arrabio) en acero líquido de calidad determinada, como consecuencia de la transferencia de calor del arco eléctrico generado en el interior del horno debido a la diferencia de potencial generada entre la chatarra y el electrodo de grafito cuando se alimenta a través de éste energía eléctrica.

La fabricación de acero líquido en hornos eléctricos a podido ser considerada una posibilidad tecnológica rentable cuando se establecieron las técnicas de alta y ultra alta potencia que posibilitaron una mayor productividad al disponer de un mayor ingreso de energía eléctrica al circuito del horno eléctrico, disminuyendo los tiempos de fusión y los consumos de energía eléctrica.

Conjuntamente a esto y con el fin de mantener elevados estándares de productividad los hornos eléctricos han evolucionado con el fin de utilizar el aporte de la energía química a través del uso del oxígeno para reducir el consumo de la energía eléctrica y elevar la velocidad del proceso; a todo esto se suma el establecimiento de practicas adecuadas de escoria espumosa.

La filosofía de fusión rápida y mínimo tiempo de afino en el horno eléctrico empujo al desarrollo del horno cuchara como parte del sistema de ultra alta potencia.

Más actual es el desarrollo de sistemas de precalentamiento de chatarra a través del aprovechamiento de los gases calientes que salen del interior del horno.

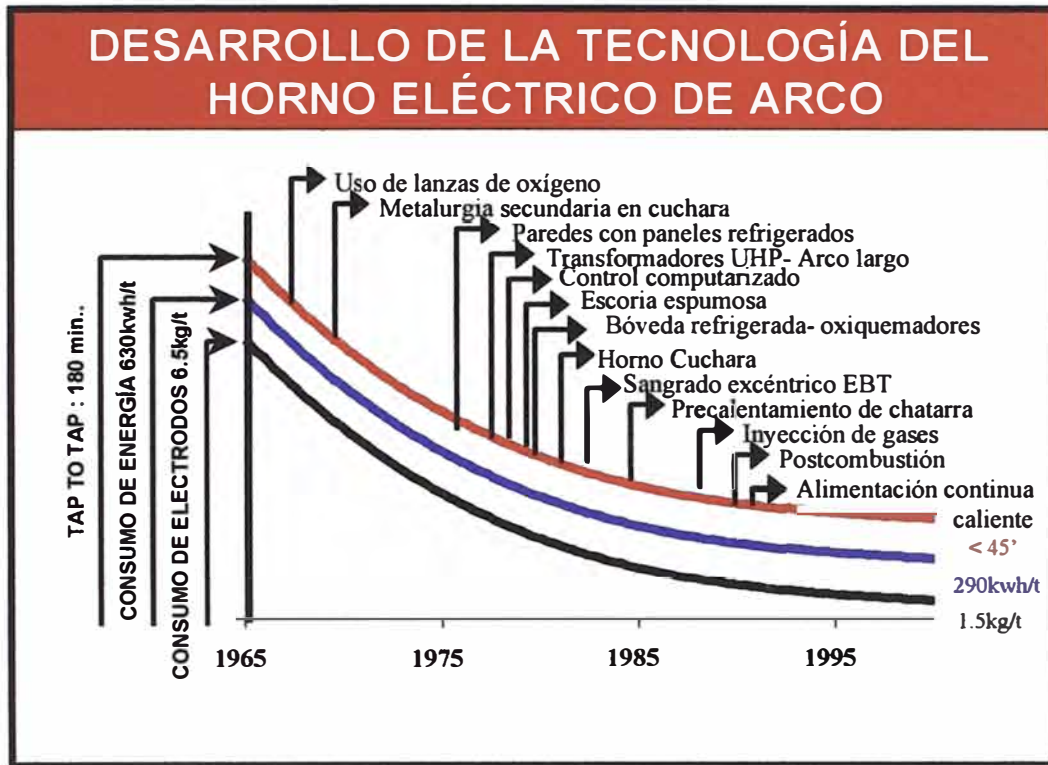


Figura 3

La figura 3 muestra en esquema la evolución tecnológica de los hornos eléctricos su mejora en productividad y en la disminución del consumo de la energía eléctrica.

1.2. EVOLUCIÓN DE LAS ETAPAS DE PRODUCCIÓN DE ACERO LÍQUIDO EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO

Desde sus inicios el proceso en el horno eléctrico tiene dos *etapas* marcadas: la primera conocida como fusión y la segunda llamada afino.

La **fusión** es un proceso netamente oxidante en donde la chatarra por efecto del calor liberado por el arco eléctrico complementada con un aporte de energía química por acción de inyección de oxígeno es transformada a su fase líquida. Luego de ello cuando el metal esta totalmente líquido se procede al **afino**, que es el refinado del acero líquido, este en muchos casos básicamente se refiere a procesos de defosforación (oxidante) y desulfuración (reductor) así como la puesta a punto de la temperatura y la composición química (recarburación y adición de ferroaleantes).

Posteriores avances permitieron reducir los tiempos de proceso en el horno eléctrico; uno de ellos fue el desarrollo de la metalurgia secundaria o metalurgia de cuchara lo que posibilito que cierto grado de desulfuración, ajuste fino de la

composición química, así como la modificación de la forma de las inclusiones se realice en la cuchara, esto indudablemente permitió sangrar aceros con un mayor contenido de azufre pero a la vez exigía que del horno eléctrico se sangrara el acero con una temperatura elevada para compensar las pérdidas de energía causadas por las reacciones endotérmicas de la desulfuración, pero aún así la disminución de tiempos de proceso (tap to tap) fue marcada.

Un tremendo impacto sobre la productividad lo ha tenido la incursión del horno cuchara en los procesos del horno eléctrico, pues a permitido transferir gran parte del afino al horno cuchara, a excepción de la defosforación, que por sus requerimientos termodinámicos indudablemente tendrá que realizarse en el horno eléctrico o con mayor exigencia aún en el control de la carga al horno.

El uso del horno cuchara a posibilitado realizar sangrados con menor temperatura, esto reduce el tiempo de proceso e incrementa la productividad (ver fig. 4) reduciendo los costos fijos. Como lo mencionamos anteriormente el horno cuchara es el complemento necesario del horno eléctrico para sistemas de ultra alta potencia.



Figura 4

2. HORNOS DE ULTRA ALTA POTENCIA (UHP)

Los hornos de ultra alta potencia son los que han gestado una mayor productividad por la disminución de los tiempos de fusión y del consumo de energía eléctrica.

Pero, ¿cual sería la definición de un horno de ultra alta Potencia?

Esta es una clasificación arbitraria, la cual es utilizada para identificar a los hornos que operan con una alta potencia eléctrica específica ya sea activa o aparenta, (kW/t o kVA/t).

Los cálculos para el tiempo de fusión(ver apéndice) considerando un consumo específico para la fusión de la chatarra en 380 kWh/t y asumiendo diversos valores del

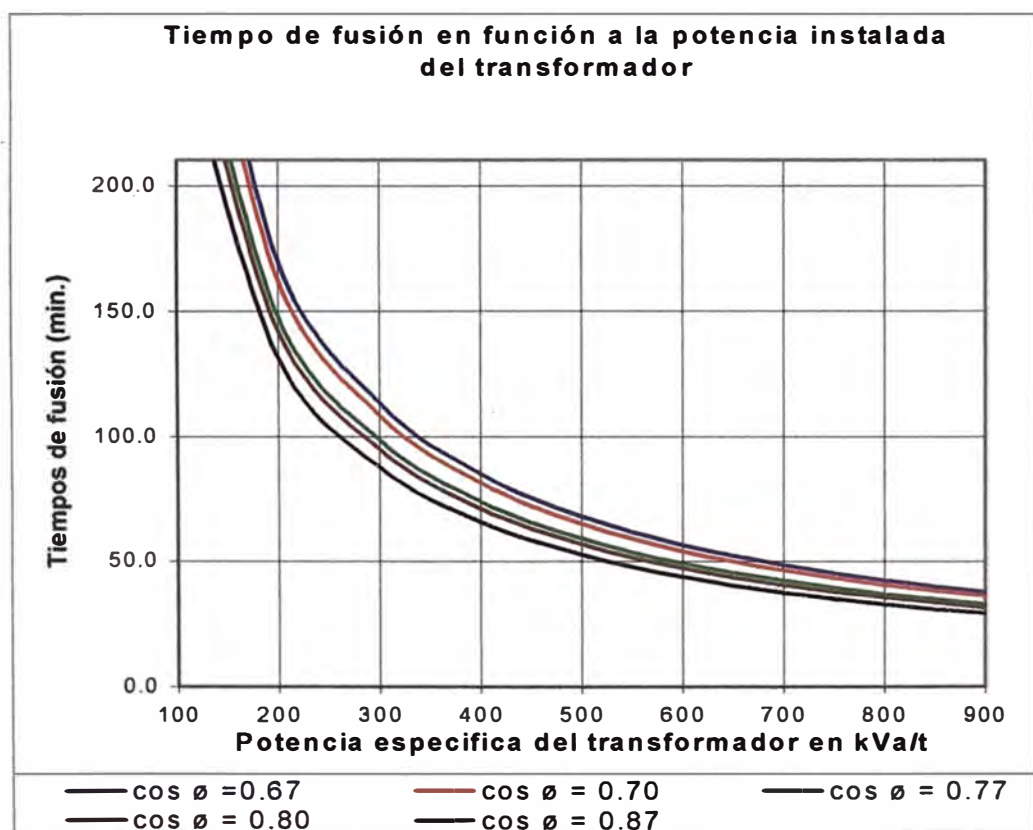


Figura 5

Cos ϕ (factor de potencia) llevaron plantear el gráfico mostrado en la figura 5. Como se indica en la figura es evidente que la curva es continua y no se aprecia ninguna discontinuidad que pudiera señalar la diferencia entre lo que sería alta potencia (HP) o ultra alta potencia (UHP). Sin embargo se observa que el uso de elevadas potencias

específicas en el horno eléctrico de arco traerán como consecuencia una disminución en el tiempo de fusión, es así que por ejemplo el incrementar la potencia específica de 400 a 600 kVA/t significa una reducción del tiempo de fusión en aproximadamente 20 minutos, sin embargo incrementar la potencia específica en 200 kVA/t desde 650 kVA/t no reducirán el tiempo de fusión en la misma proporción. Así la determinación de valor mínimo de potencia específica el cual señala la diferencia entre el uso de alta potencia o ultra alta potencia (UHP) es puramente arbitrario. Esta clasificación para algunos autores varia en función al tamaño del horno, esto básicamente debido al daño ocasionado a las paredes refractarias del horno.

Rateos de potencia específica de hornos eléctricos de arco en la actualidad y su clasificación en potencia normal, alta potencia y ultra alta potencia.

	TAMAÑO DEL HORNO		
	Mayores a 100t	40 a 90 t	Hasta 35t
Potencia Normal en kVA/t	150 a 250	150 a 300	200 a 350
Alta potencia en kVA/t	300 a 600	400 a 700	450 a 750
Ultra alta potencia en kVA/t	650 a 900	750 a 1000	

Tabla 1

En el caso de Aceros Arequipa se cuenta con un transformador de 45MVA para un horno de 43.5t lo que establece una relación potencia carga de 1034.5 kVA/t lo que lo señala como uno de los más potentes del mundo.

En síntesis la principal diferencia entre los hornos de ultra alta potencia (UHP) y los de potencia normal y de alta potencia es la **mayor productividad con menores tiempos de fusión y consumos de energía.**

Los principales criterios de una practica de UHP son:

1. La carga es fundida lo más rápido posible
2. Durante el tiempo de horno conectado para la profundización de los electrodos la energía suministrada debe ser lo más alta posible.
3. Los periodos de desconexión o tiempos muertos, cuando no se suministra energía deben ser lo más cortos posibles.

Adicionalmente al segundo punto antes mencionado algunos autores señalan que la **potencia activa promedio debe ser alta**, desde el inicio de la colada hasta el sangrado. Como el suministro de energía eléctrica es reducido durante el afino y finalización de la colada, **la potencia promedio es menor que la potencia máxima** que teóricamente puede ser alcanzada, entonces la relación de la potencia efectiva promedio a la potencia efectiva máxima debería ser mayor o igual a 0,7. Esto involucra tener pequeños tiempos de afino. Así mismo la relación entre el tiempo conectado (power on) y el tiempo entre volcado y volcado (tap to tap) debe ser mayor o igual a 0,7. **La figura 6 muestra un diagrama de máximo uso del horno eléctrico, esto es para esquemas de uso de alimentación continua de hierro esponja**

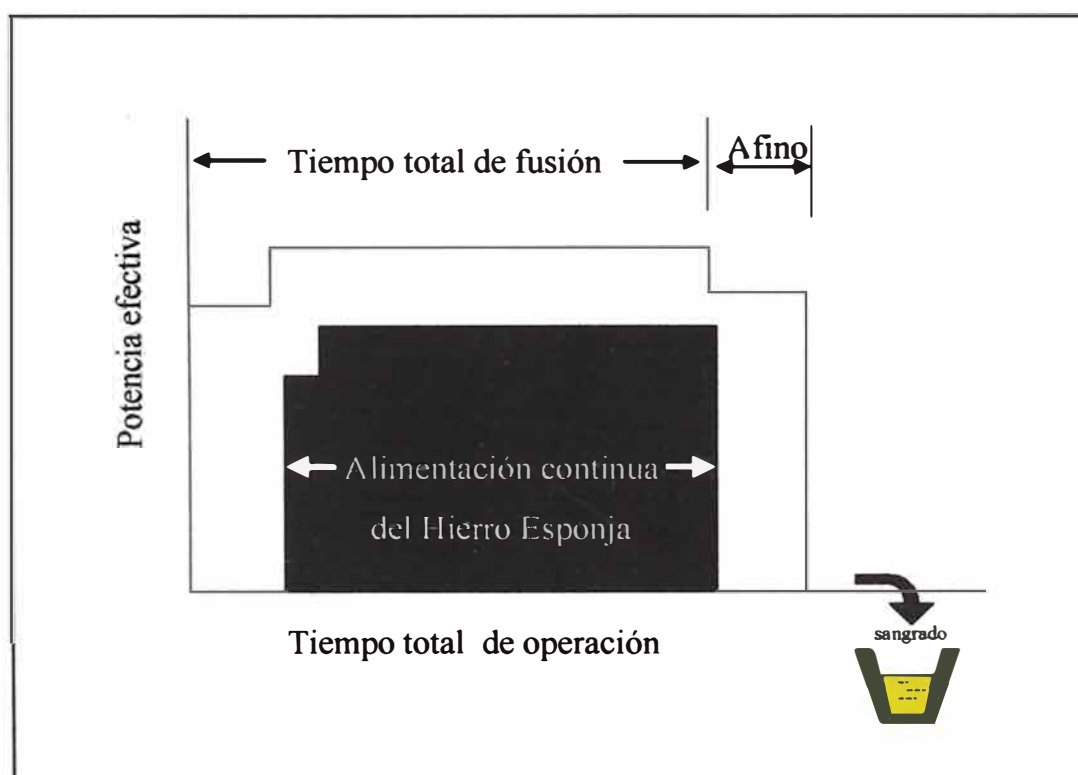
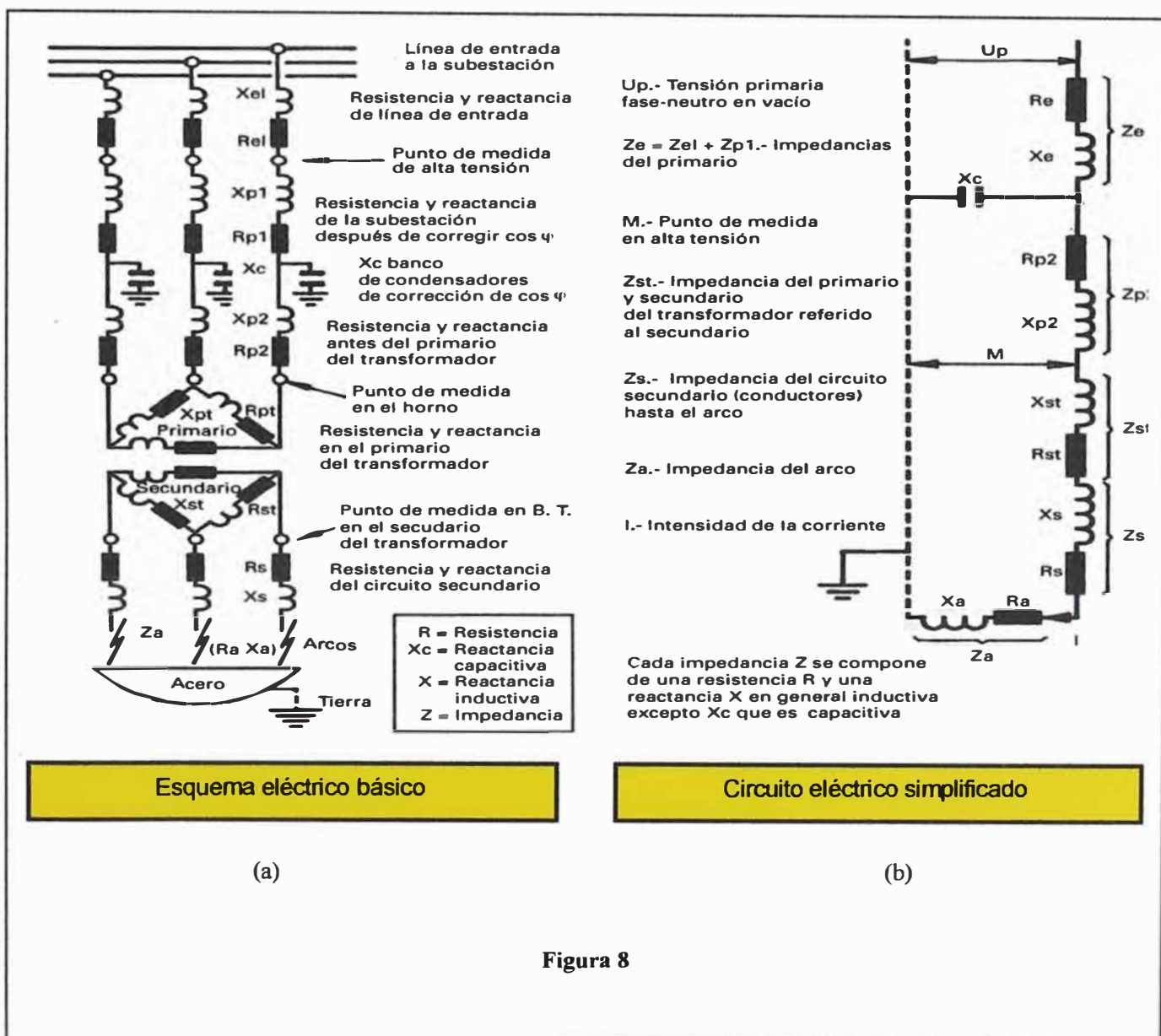


Figura 6: Diagrama de fusión con mínimos tiempo de desconexión

3. OPTIMIZACIÓN DEL ARCO ELCTRICO PARA LA FUSIÓN DE CHATARRA

El circuito básico de en un horno eléctrico de arco está compuesto por las reactancias y resistencias eléctricas del sistema de alimentación al primario del transformador (patio de llaves, subestación, etc.), por las reactancias y resistencias del primario y secundario del transformador, por la reactancia de los condensadores de compensación del $\cos \varphi$ y por las reactancias y resistencias eléctricas del circuito secundario así como las del arco eléctrico, esto puede apreciarse en la figura 8.

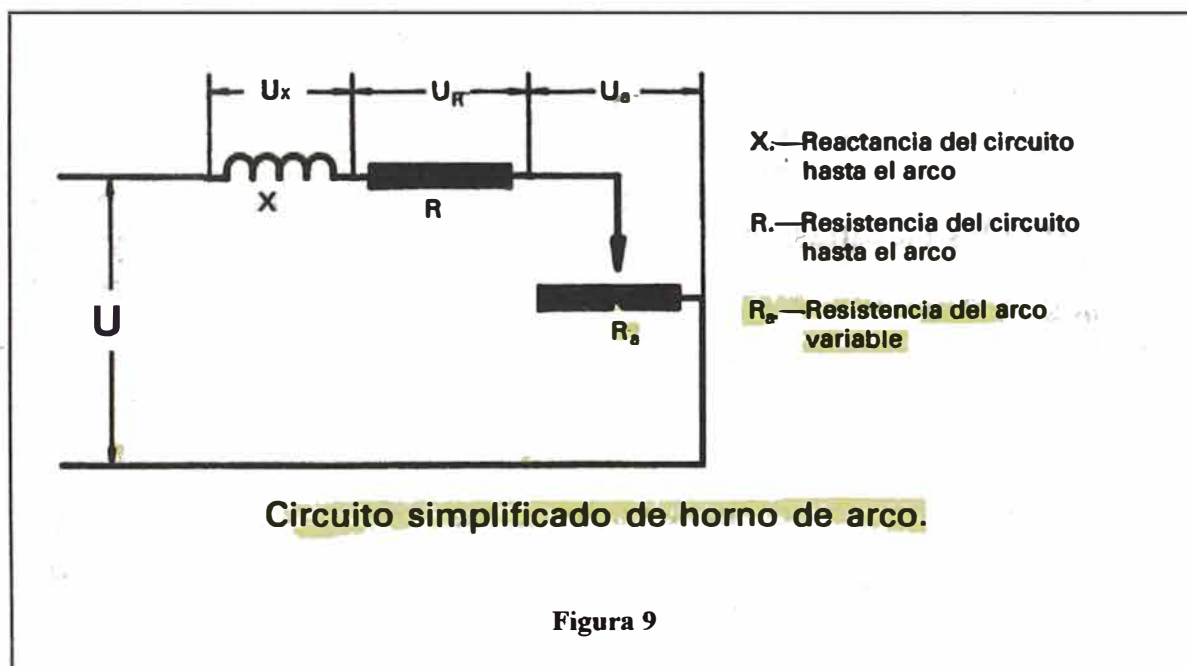


R = Resistencia
 Xc = Reactancia capacitiva
 X = Reactancia inductiva
 Z = Impedancia

Up.- Tensión primaria fase-neutro en vacío
 $Z_e = Z_{e1} + Z_{p1}$.- Impedancias del primario
 M.- Punto de medida en alta tensión
 Z_{st} .- Impedancia del primario y secundario del transformador referido al secundario
 Z_s .- Impedancia del circuito secundario (conductores) hasta el arco
 Z_a .- Impedancia del arco
 I.- Intensidad de la corriente
 Cada impedancia Z se compone de una resistencia R y una reactancia X en general inductiva excepto Xc que es capacitiva

Con la finalidad de entender el funcionamiento del circuito se consideran las tres fases perfectamente equilibradas y así podemos estudiar el circuito monofásico mostrado en la figura 8b.

Es frecuente simplificar el circuito del horno eléctrico por sus resistencias y reactancias equivalentes y a la vez suponer que el arco eléctrico se comporta como una resistencia variable con una reactancia nula (fig. 9), sin embargo se deberán tener en cuenta las correcciones necesarias para considerar la reactancia del arco que depende básicamente de la intensidad del arco o del circuito secundario.



3.1. RELACIÓN IMPEDANCIA, REACTANCIA Y RESISTENCIA

Estos tres elementos constituyen la oposición al paso de corriente a través de un circuito de corriente alterna. La relación entre estos elementos de oposición para el flujo de corriente se muestra mediante un triángulo rectángulo

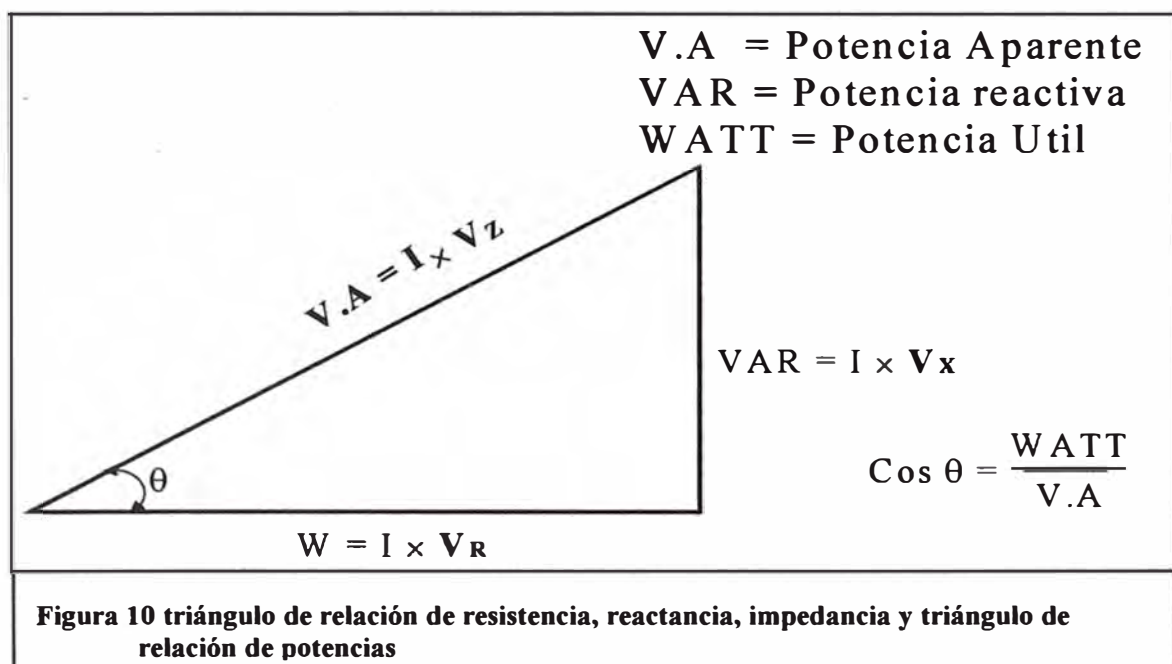
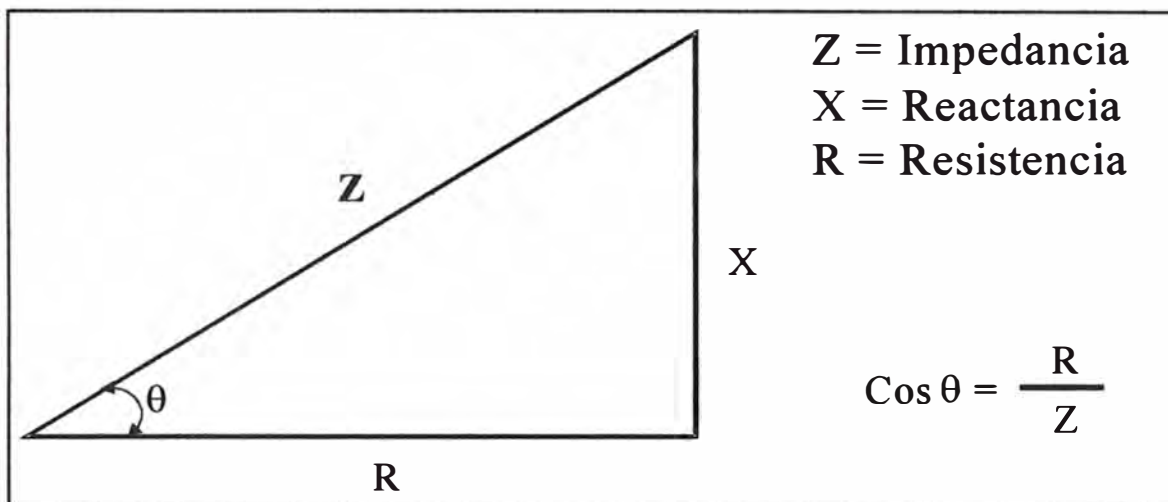


Figura 10 triángulo de relación de resistencia, reactancia, impedancia y triángulo de relación de potencias

Por definición la potencia eléctrica es el producto del voltaje por la corriente en amperes y las unidades de potencia son: Volt-amperes, Volt-amperes reactivos y watts, dependiendo del elemento de oposición al flujo de corriente que se trate. Entonces podemos relacionar las distintas magnitudes haciendo uso del mismo triángulo rectángulo (fig. 10).

Desde estos conceptos nosotros podremos construir las curvas de potencia para la potencia activa.

Para ello partiremos determinando la potencia aparente y la potencia reactiva. Para nuestro transformador de 45MVA existen diferentes escalas de voltaje en el secundario, basándonos en la filosofía de los hornos de ultra alta potencia, entonces importara un alto ingreso de energía eléctrica al circuito del horno por lo que analizaremos el comportamiento de la operación para el voltaje más alto en el secundario 828 V.

Como se aprecia en la tabla 3 la potencia aparente se calcula para este caso utilizando el valor de voltaje constante y para diversos valores de I, podremos establecer la variación de la potencia aparente como una línea recta en función de la intensidad (fig. 11).

Para el cálculo de la potencia reactiva lo que importará es conocer la Reactancia del circuito, por ahora la consideración inicial es que el arco eléctrico esta propiciando una Reactancia nula. Entonces importara la Reactancia del transformador y la Reactancia del circuito desde la salida del secundario del transformador hasta el arco eléctrico.

La Reactancia del transformador se encuentra en la placa y la Reactancia del secundario es un valor medido en corto circuito, cabe mencionar que la Reactancia del transformador puede ser regulada, así podremos trabajar desde un 30% hasta un 100% de la Reactancia del transformador, este se regula de acuerdo a las características operacionales (tipo de chatarra, atmósfera del horno O₂, tipo y cantidad de escoria, etc.), en nuestro caso el trabajo sé esta realizando para el 80% de Reactancia.

Parámetros de operación			
R del circuito	X _{secundario}	X _{transformador(80%)}	X
0,451 mΩ	4,350 mΩ	4,110mΩ	10,840 mΩ

Tabla 2

El valor de la potencia activa se calculará con los valores de las otras potencias mencionadas

Potencia Aparente	$\sqrt{3} VI$	V= voltaje (cte.)	Línea recta
		I variable	
Potencia Reactiva	$3 I^2 X$	(X ≈ Cte.) Reactancia	Parábola
		I Variable	
Potencia Activa	$\sqrt{\left(\text{Potencia}_{\text{aparente}}\right)^2 - \left(\text{Potencia}_{\text{Reactiva}}\right)^2}$	R = R _{circuito} + R _{arco}	Curva
		I variable	
Perdidas del circuito	$3 I^2 R_{\text{circuito}}$	R _{circuito} = cte.	Parábola
		I variable	
Potencia del arco	$\left(\text{Potencia}_{\text{Activa}}\right) - \left(\text{Perdidas del Circuito}\right)$	V= voltaje (cte.)	Curva
		I variable	

Tabla 3

El cálculo de la potencia en el arco eléctrico se establecerá entre la diferencia de la potencia activa menos las pérdidas eléctricas en el circuito. Estas pérdidas eléctricas son calculadas a partir de la resistencia del circuito, esta se mide en corto circuito con los electrodos sumergidos en el baño líquido.

Según la gráfica obtenida (fig. 11) La potencia activa que se desarrolla en la resistencia total del circuito tiene un valor máximo de 32 MW con un valor de corriente promedio de 32 KA (aprox.). Este es el punto de máxima transferencia de energía al circuito del horno eléctrico y a la vez es el lugar de intersección de las curvas de potencia activa y reactiva donde el factor de potencia es 0.7071.

Pero el máximo aprovechamiento de la potencia en el proceso de fabricación de acero líquido será indudablemente con la máxima transferencia de calor al sistema, es decir con la máxima potencia en el arco (30MW), y esto ocurre según el gráfico a una corriente de 30KA aproximadamente con una factor de potencia mayor a 0.7071 donde la potencia activa es mayor que la reactiva.

De la figura 11 también podremos señalar que indudablemente las pérdidas eléctricas disminuyen al bajar la corriente de operación, entonces en la máxima potencia de arco también conseguimos tener menores pérdidas eléctricas que en el máximo de la potencia activa.

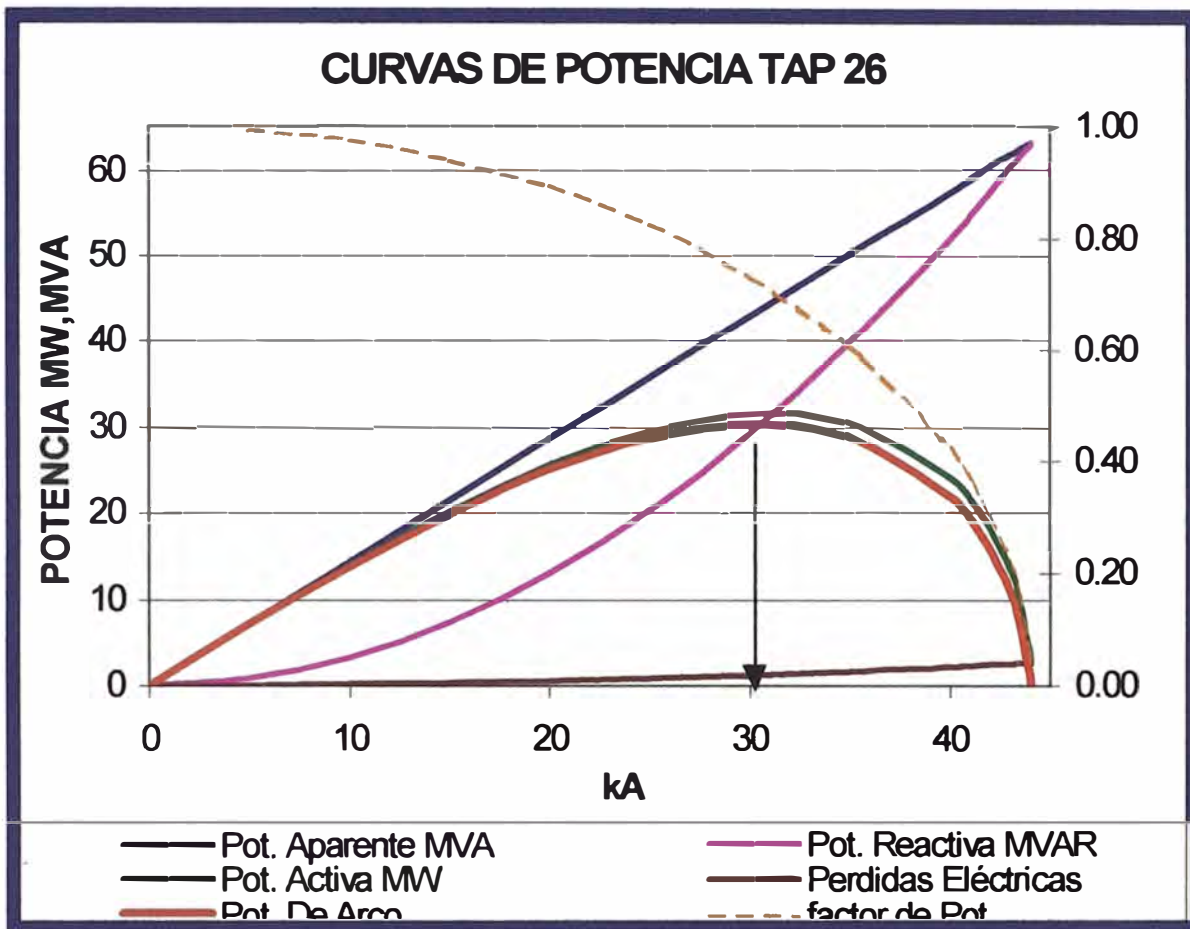


Figura 11

3.2. LONGITUD DE ARCO

Una vez conocidos los parámetros de operación es posible calcular teóricamente la longitud del arco de operación, este puede ser realizado a través de la siguiente relación:

Consideraciones:

- 1.- La distribución de energía a lo largo del arco es prácticamente constante de un orden de 12 V/cm.
- 2.- La caída de voltaje anódica más catódica es igual a 30 V.

Entonces:

$$V_a = 30 + 12 \times L_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Y

$$\text{Potencia de arco} = 3I \times V_a \quad \text{Ecuación 2}$$

Remplazando 2 en 1 y ordenando tendremos:

$$L_a = \frac{\text{Potencia de arco}}{36 \times I} - 2,5 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$$\begin{aligned} L_a &= \text{Longitud del arco} \\ I &= \text{Intensidad de corriente} \\ V_a &= \text{Voltaje del arco} \end{aligned}$$

De la ecuación 3 podremos construir la curva de la longitud del arco en función de la corriente para un determinado voltaje de operación. (Figura 12). Arcos más largos serán obtenidos con un menor amperaje y con un mayor voltaje del arco.

3.3. INDICE DE EROSIÓN DEL REFRACTARIO

El índice de erosión del refractario es una guía que cuantifica los efectos de la potencia y longitud del arco sobre el desgaste del refractario de la pared del horno. Este índice de erosión es directamente proporcional al cubo del voltaje entre fases e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (a) entre el arco eléctrico y la pared refractaria.

$$R_F = \frac{E^3}{X_{op} \times a^2} \times F \quad (W.V / cm^2) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$$F = 0,1708 \times \left(\text{Cos}^2 \phi \text{ Sen} \phi - \frac{2 \text{ Sen}^2 \phi \text{ Cos} \phi}{\text{Tg} \theta} - \frac{\text{Sen}^3 \phi}{\text{Tg}^2 \theta} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

- E = Voltaje secundario entre fases
- X_{op} = Reactancia de operación por fase
- a = Distancia del arco (punta del electrodo) a la pared
- ϕ = Angulo de fase en el primario del transformador del horno durante su funcionamiento
- θ = Angulo de fase en el primario del transformador del horno cuando el electrodo esta

cortocircuitado en el baño

Así con esta relación construimos la curva de daño a las paredes refractarias (R_F), *aquí es interesante analizar que durante la etapa de fusión con arco largo, que de acuerdo con su efecto se convierte realmente en el índice de daño a la chatarra (CH_F), ya que en esta etapa las paredes del horno están cubiertas por una pantalla de chatarra.* Esta energía por unidad de superficie (de chatarra) hace que se tenga una mayor velocidad de fusión, razón por el cual el criterio para optimizar la operación de fusión en el horno eléctrico es trabajar con un arco largo en el punto de máximo daño a la pared refractaria (en este caso chatarra).

En este punto óptimo de proceso, es decir, cuando teórica y prácticamente del daño a la pared (chatarra) tiene su valor máximo, los distintos parámetros en el horno se observarán como: mayor longitud de arco, mayor

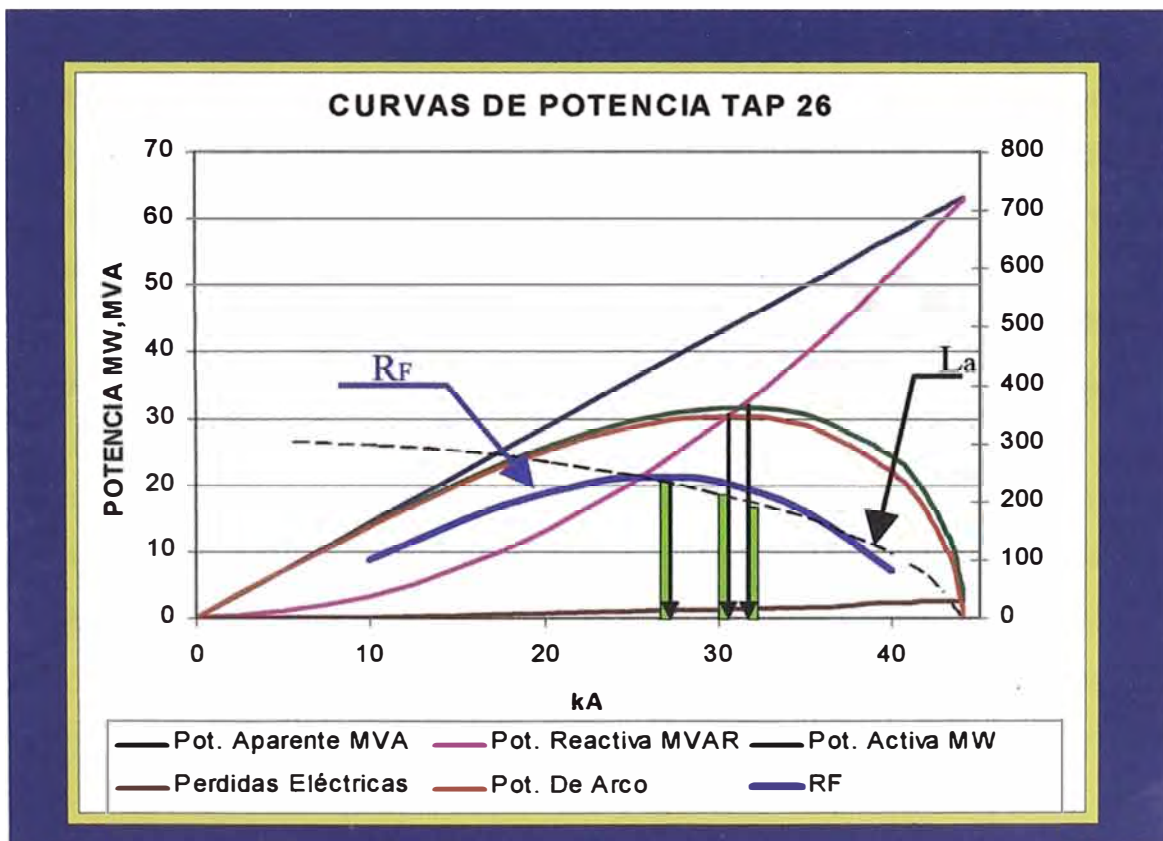


Figura 11

factor de potencia, menor corriente de fase, menores pérdidas eléctricas, menor consumo de energía eléctrica, menor consumo de electrodos y mayor productividad.

3.4. Cálculo del máximo daño a la chatarra

Para nuestro caso un transformador de 45 MVA los cálculos indicaron según el gráfico que para 828V trabajando con una Reactancia del transformador al 80% a 27 KA tenemos el máximo daño refractario en 245 KW V/cm². Para este valor de corriente el punto optimo tendrá una potencia de arco de aproximadamente 29.5 MW, para una potencia activa de 31MW y una potencia reactiva de 22MVAR.

En la figura 11 se ha sobrepuesto la curva de longitud de arco así como la del máximo daño refractario, esto nos permite visualizar la ubicación del punto optimo para la fusión de chatarra, el cual ocurre a una potencia menor a la máxima activa. Con referencia a la longitud del arco se puede apreciar que este es mayor en el punto de máximo daño, es decir un arco largo propiciará el beneficio de la fusión rápida.

Los cálculos para el establecimiento de estos puntos óptimos establecen parámetros para la regulación automática, que permita mantener en una posición adecuada a los electrodos durante la fusión, de tal forma que permita tener la intensidad deseada en el voltaje establecido para cada tap, tratando de obtener la fusión más rápida posible.

Durante la alimentación continua de Hierro esponja la cual es realizada en etapa de baño plano el concepto de máxima fusión varia hacia el de máxima potencia en el arco que posibilite la más pronta fusión, conforme se vaya alimentado este, lo cual exigirá dar las condiciones para poder transferir adecuadamente el calor del arco al baño esto es una buena práctica de “escoria espumosa”.

4. CARACTERISTICAS DE LA PRODUCCIÓN DE ACERO LIQUIDO EN HORNOS ELECTRICOS DE ULTRA ALTA POTENCIA CON EL USO DE HIERRO ESPONJA

El hierro esponja obtenido por reducción directa desde el mineral de hierro es utilizado como carga metálica en los hornos eléctricos de arco sustituyendo parcial o totalmente a la chatarra.

El hierro esponja es el producto obtenido por la reducción del mineral de hierro (óxidos de hierro) vía carbón o gas natural, es decir por la eliminación de una gran cantidad de oxígeno del mineral de hierro, obteniendo un producto metálico sólido de alto grado de metalización.

El grado de metalización del hierro esponja es la medición de la eficiencia de reducción de los óxidos de hierro del mineral el cual esta ligado a la tecnología usada en al proceso así como a la eficiencia operacional.

$$\text{Grado de Metalización (\%)} = \frac{\% \text{de hierro metalico en el hierro esponja}}{\% \text{de hierro total en el hierro esponja}}$$

Ecuación 6

Los productos de reducción directa básicamente son dos: el DRI (Direct Reduced Iron) y el HBI (Hot Briquetted Iron), el DRI es el producto obtenido de los hornos de reducción directa, el cual puede ser pellets reducidos o trozos de mineral reducidos, dependiendo del tipo de carga a los hornos de reducción, mientras que el HBI es el mismo hierro esponja que ha sufrido un proceso briquetado en caliente, es decir una compresión en caliente, elevando su densidad aparente de 3,5 a 5,5 t/m³.

Durante el proceso de reducción directa la mayor parte de los óxidos de hierro son reducido a hierro metálico, lo que no sucede con otros óxidos más estables que acompañan al mineral (ganga), como la almunia, sílice, fosforo y otros óxidos, los cuales se mantendrán en el producto final, y elevarán su concentración en un 50% aproximadamente con respecto a su contenido en la materia prima. Dependiendo del proceso de reducción utilizado el hierro esponja variará su contenido de carbón y su metalización. De aquí se reconoce que las propiedades del DRI dependen fuertemente de la materia prima, del proceso de reducción directa usado y de los parámetros de operación utilizados,

4.1. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL USO DEL HIERRO ESPONJA EN HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO

Bajo el criterio de la tecnología de ultra alta potencia, debe mantenerse el criterio de fusión rápida, bajo consumo de energía y el máximo aprovechamiento de la carga (rendimiento), es así que en la utilización del hierro esponja como parte de la carga metálica al horno eléctrico siempre importará tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La ganga (en cuanto a cantidad y la composición de esta)
- El contenido de carbón
- El grado de metalización

4.1.1. La ganga:

El nivel de constituyentes tales como la sílice, alúmina y otros óxidos contenidos en el hierro esponja son determinados por los materiales de alimentación.

Tanto el contenido total de la ganga así como su composición son importantes para el operador de hornos eléctricos de arco, la cantidad de ganga contenida afectará el consumo de energía eléctrica requerida y el rendimiento metálico (cuanto mayor es el contenido de la ganga tanta más energía se requiere y cuanto menor la recuperación de hierro por tonelada de DRI cargada.

A medida que aumenta la cantidad de ganga en el DRI, este desplaza a otros constituyentes. Dado que el hierro es el principal constituyente, será el contenido de hierro el que más disminuya por ciento a por ciento.

Por lo general los procesos en los hornos eléctricos son procesos básicos, con una relación de basicidad "V" en la escoria del horno eléctrico de 1 a 2,5, donde la relación de basicidad "V" es la relación de los componentes básicos respecto a los componentes ácidos de la escoria.

$$\text{Basicidad "V"} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad \text{Ecuación 7}$$

El contenido de ganga en el DRI señalará la cantidad de Cal o Cal dolomítica que deberá emplearse para neutralizar la ganga en el horno eléctrico. Indudablemente estas adiciones afectarán las operaciones en el horno – fluidez, espumabilidad, viscosidad de la escoria, defosforación y desulfuración.

La tabla 4 ilustra de esta relación para diversas composiciones representativas de hierro de reducción directa producidos por diferentes procesos, usando diferentes reductores y diferentes materiales de alimentación. A valores bajos de la basicidad “V” se requerirá más cal en el horno, lo que significara un mayor consumo de energía para fundirla. En la tabla los valores resaltados con amarillo destacan a los valores característicos obtenidos en la planta de reducción directa de la corporación Aceros Arequipa S.A. en Pisco.

	Basado en Gas				Basado en carbón	
	Horno de Cuba			Lecho Fluidizado	Solera Rotatoria	Horno Rotatorio
	Planta 1	Planta 2	Planta 3			
%Hierro total	94.30	92.70	91.80	93.00	90.00	93.00
%Hierro Metálico	88.30	85.70	85.40	85.00	81.90	85.56
Grado de metalización	93.60	92.40	93.00	91.40	91.00	92.00
%FeO	7.70	9.00	8.20	10.30	10.40	9.60
% Carbono	1.00	0.40	1.50	1.00	2.00	0.10
%P	0.03	0.07	0.01	0.08	0.06	0.03
%S	0.01	0.01	0.003	0.025	0.15	0.05
%SiO ₂	1.10	1.30	4.10	1.25	2.90	3.00
%Al ₂ O ₃	0.60	1.10	0.30	1.10	1.60	1.70
%CaO	0.70	1.10	0.20	0.025	0.15	0.10
%MgO	0.30	0.10	0.20	0.22	0.10	0.10
Basicidad: "V" = $\frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$	0.6	0.5	0.1	0.1	0.06	0.1
Cu, Ni, Cr, Mo, Sn.	Trazas en todos los casos					

Tabla 4

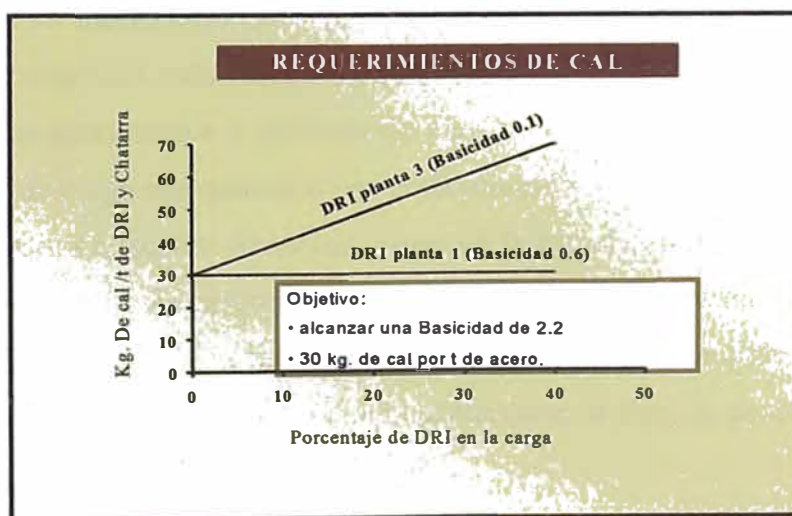


Figura 13

4.1.2. El Carbono:

El contenido de carbono en el hierro esponja es importante ya que parte de este servirá como combustible, que al reaccionar con el oxígeno en el horno eléctrico reducirá el consumo de energía eléctrica.

Cabe señalar que la mayoría del carbono presente en el hierro esponja esta como Fe_3C , el cual tiene una menor temperatura de fusión, lo que posibilita que la alimentación continua del hierro esponja se inicie más temprano en los DRI de menor contenido de carbono.

El proceso de carburación del hierro esponja en la actualidad, solo es conseguido en los procesos de reducción directa basados en gas natural, en donde el carbono puede ser aumentado hasta cerca del 5 por ciento.

En el caso de las briquetas el contenido máximo de carbono se puede encontrar por debajo del 2 por ciento.

Sin embargo, a medida que el carbono es aumentado, desplaza a otros constituyentes, ya que el total no puede exceder del 100 por ciento, por lo que 2 por ciento más de carbono significará cerca de 2 por ciento menos de hierro y el rendimiento del hierro recuperado por unidad cargada será menor. En efecto se podría estar pagando precios de unidades de hierro por carbono, por lo que se debe determinar si esto tiene sentido económico en las operaciones, usando los costos. Un indicador será tanto el porcentaje de hierro total y el grado de metalización.

Habitualmente las plantas de reducción directa basándose en gas natural, obtienen un hierro esponja con un contenido de carbono entre 1,1 a 2% de C, pero el contenido máximo de carbono estará definido por un punto en que los beneficios económicos y técnicos de altos niveles de carbono contenido en un material de carga son anulados por el disminuido rendimiento metálico.

La corporación Aceros Arequipa viene en la actualidad experimentando del uso de un hierro esponja carburado importado, el cual contiene entre 1,5 a 2,0%C, lo cual ha marcado una reducción importante en el consumo de energía, ya que también este tipo de carga se adapta gratamente al tipo de proceso desarrollado en la acería.

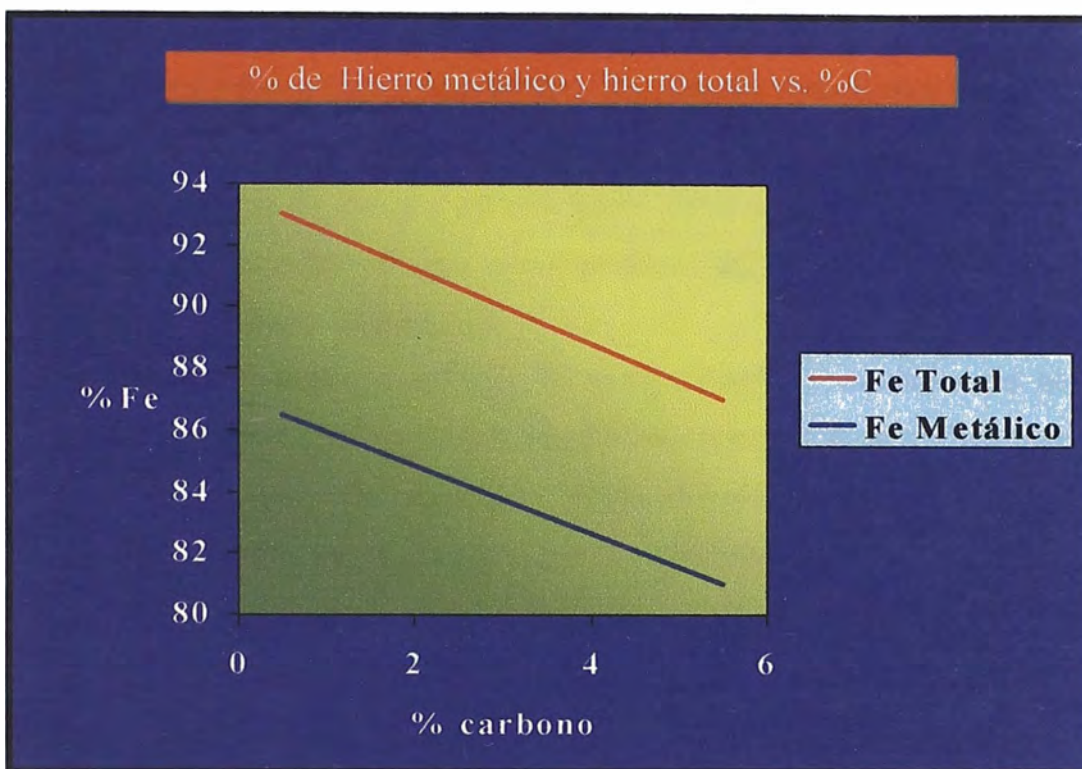


Figura 14

4.1.3. Grado de Metalización

El grado de metalización ha sido definido previamente como la relación del hierro metálico respecto al hierro total. La diferencia entre ellos es hierro no reducido, que puede ser considerado como existente en la forma de FeO. Este FeO requiere energía de calentamiento y energía adicional para aquella porción que es reducida a Fe en el horno de arco. Nuevamente cuanto más elevado el FeO (o menor la metalización) tanta más energía se requerirá

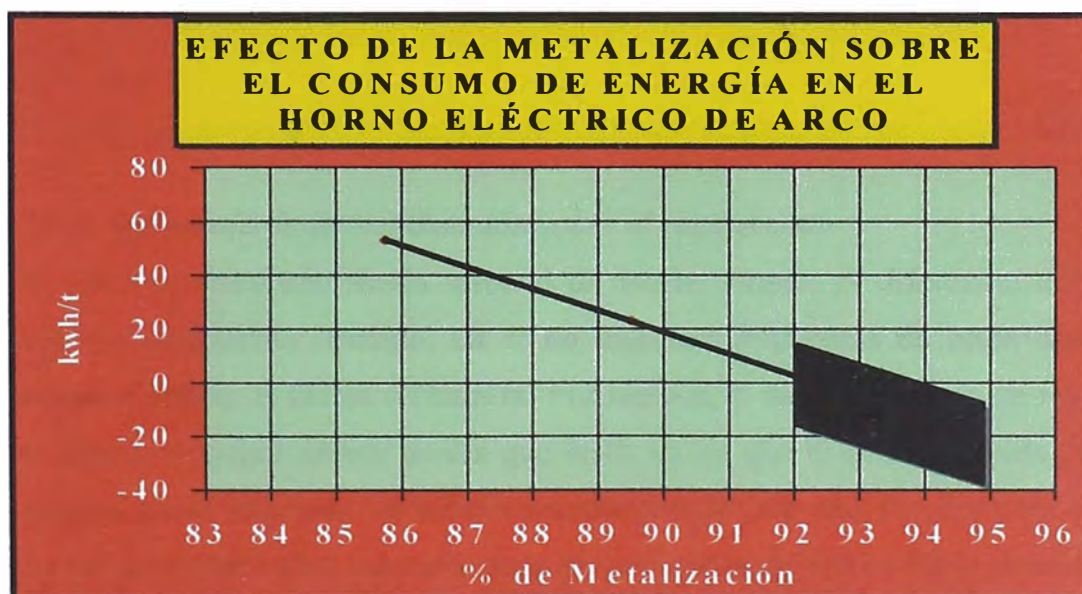


Figura 15 Efecto de la metalización sobre el consumo de energía

El gráfico en la figura 15 fue desarrollado para ilustrar el efecto de la metalización sobre el consumo relativo de energía. Esta figura fue aplicada por la midrex, la cual es una ilustración cualitativa del efecto de la metalización sobre el consumo de energía, en este punto cabe resaltar que la pendiente de la línea se vera afectada tanto por la composición del DRI así como por el proceso empleado en el horno eléctrico.

La metalización también afectará la recuperación de unidades de hierro. La figura 16 ilustra el efecto sobre el rendimiento relativo. Esta gráfica muestra una pendiente ascendente con respecto al grado de metalización, lo que señala que a una mayor metalización mayor será el rendimiento obtenido en el horno eléctrico

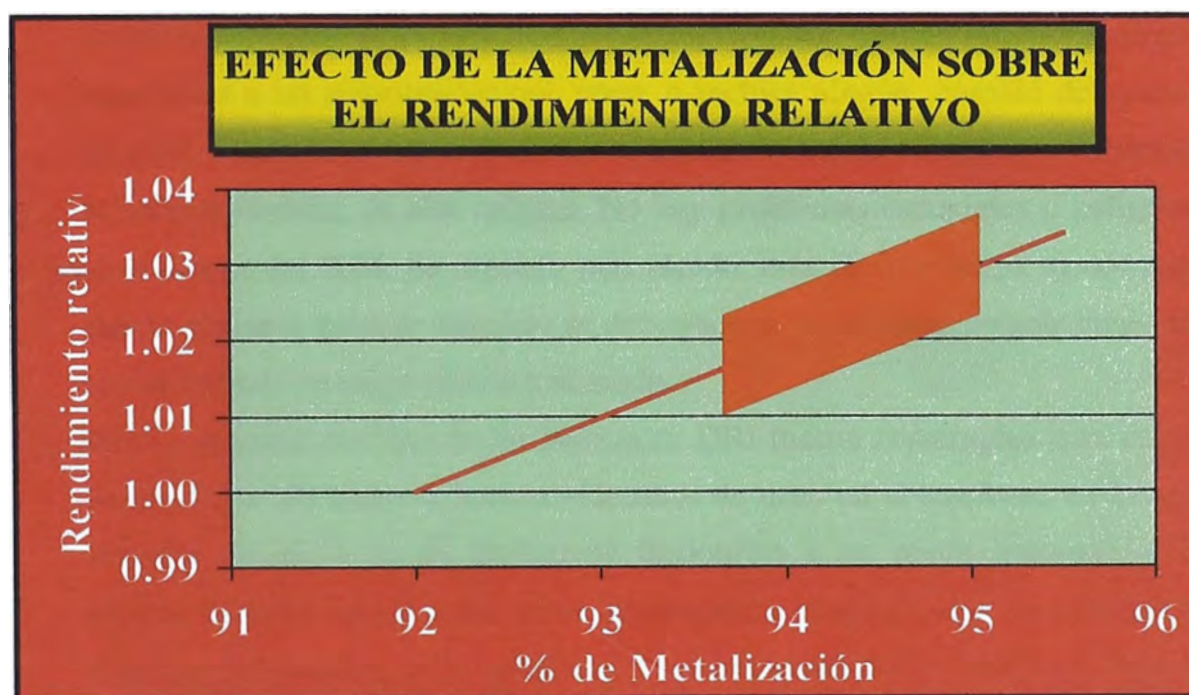


Figura 16 — Influencia de la metalización sobre el rendimiento

El DRI es elaborado desde mineral de hierro virgen. A diferencia del hierro convencionalmente fundido, en el no ingresan impurezas de otros materiales como el coque, la caliza o chatarra. Por tanto si el mineral es bajo en residuales el hierro esponja también tendrá que serlo, es así que el hierro esponja contiene solo trazas de residuales metálicos como el Cu, Ni, Cr, Mo, Pb, Zn, y Sn.

La tabla 5 muestra las características físicas típicas del DRI y HBI. Nótese que la densidad aparente del DRI es mucho mayor que la mayoría de la chatarra, y que la densidad del HBI es aun mayor.

Tabla 5
Características físicas típicas

	DRI	HBI		
forma física	pelets/trozos	briquetas		
Densidad aparente (g/cm ³)	3,5	5,0	a	5,5
Densidad volumétrica (t/m ³)	1,6 a 1,9	2,4	a	2,8
Tamaño (mm)	4 a 20	30 x 50 x 110		

El **HBI** es *un* material de carga moderno previsto para ser un sustituto de, o usado en combinación con chatarra. Es el producto de tecnología mejorada de hierro directamente reducido específicamente enfocada al mercado mercantil. Las destacadas características químicas y físicas del HBI lo hacen un material ideal para muchas aplicaciones. Estas características pueden rendir significativos beneficios a las siderúrgicas con poco, o incluso ningún cambio de operación. El **HBI** es usado como si fuera un material de chatarra limpio, consistente, de tamaño calibrado, de alta calidad. No hay problemas especiales o peligros que sean únicos del **HBI**. Se maneja más rápido, más fácil, y ocupa menos espacio que la chatarra, estando húmedo se deben tomar las mismas precauciones que se toman cuando se carga chatarra húmeda.

Históricamente, muchas de las plantas de DRI fueron construidas para abastecer de unidades de hierro a hornos eléctricos de *arco* en ubicaciones en las que la chatarra de acero no es fácilmente disponible a un precio **razonable**. Estas plantas de **DRI** fueron construidas adyacentes a acerías, como subsidiarias de la empresa siderúrgica. Nos referimos a estas plantas como cautivas. Para estas acerías, el bajo contenido de residuales del DRI puede no ser requerido para los grados de acero que se producen.

Algunas de estas plantas siderúrgicas fueron originalmente construidas para producir barras de refuerzo de concreto, sin embargo, la disponibilidad del **DRI** ha permitido a algunas de estas plantas elevar de grado su línea de productos. Así muchas plantas, fueron construidas teniendo como su principal producto a las barras de refuerzo. Pero a través del tiempo, con las plantas de reducción directa suministrando hierro con bajos residuales a los HEA, han evolucionado a productores de grados de acero más elevados, particularmente de alambros y de barras de calidad especiales. Como ejemplo, muchas plantas ahora son

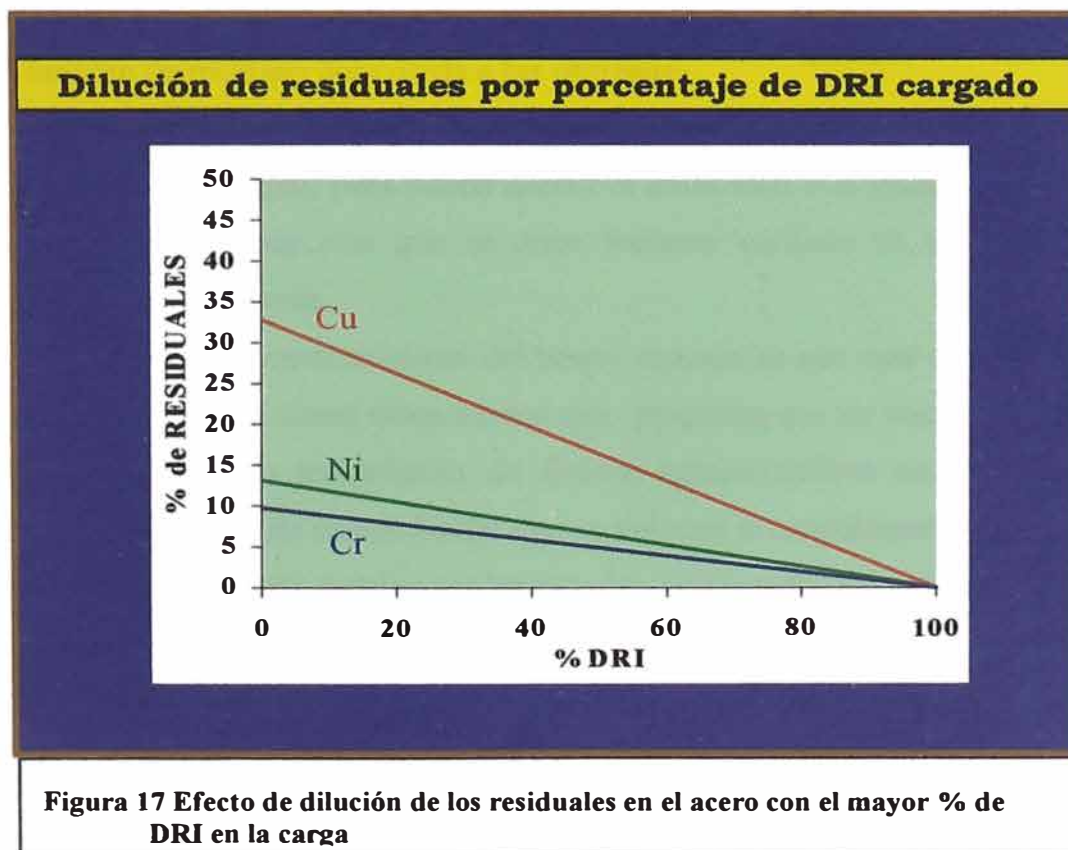
importantes productores de alambón para alambres de **refuerzo** y talones de neumáticos (tire cord and tire bead), de productos planos para la industria automotriz, de tuberías sin costura para diversos fluidos en la industria química y petrolera, etc.

Las plantas de hornos eléctricos generalmente usan HBC, DRI o una combinación de ambos para uno, o una combinación de tres objetivos:

- 1) Necesitan el material para producir aceros de **alta calidad** de bajos residuales,
- 2) Lo usan para diluir los niveles de residuales a niveles comercialmente aceptables usando chatarra local o disponible.
- 3) Dependiendo de los costos relativos y disponibilidad de otros materiales de carga pueden usarlo por las unidades de hierro

4.2. DISEÑO DE LA CARGA

Indudablemente el diseño de la carga al horno eléctrico esta sujeto a criterios muy importantes como el costo de la materia prima, la disponibilidad de materiales y el porcentaje de residuales en el producto final.



Considerando que los niveles de residuales en el hierro esponja son casi cero, y conociendo los valores aproximados de los contenidos de residuales para distintas calidades de chatarra, se podrá calcular la proporción mínima necesaria para obtener el nivel de residuales solicitados en la calidad final del acero, es decir que el hierro esponja juega un papel importante para diluir las impurezas aportadas por la chatarra.

Pero un criterio adicional a lo señalado es la óptima carga en función a ***la forma de cargar el DRI al horno eléctrico para el mejor aprovechamiento energético y de máximo rendimiento en el menor tiempo de proceso.***

Así señalaremos algunos criterios que posibilitaran obtener el menor consumo de energía en función del criterio de fusión rápida de un sistema de ultra alta potencia.

4.2.1. CARGA POR BATCH

La carga en batch es realizada en las cestas conjuntamente con la chatarra, lo que permite elevar la densidad aparente de la carga al horno, ya que la densidad del hierro esponja así como de la briqueta es mayor que la de la chatarra convencional, comúnmente alimentada al horno. La densidad aparente de la chatarra es de suma importancia en los hornos eléctricos, pues esta definirá el número de recargas por colada a ser utilizadas.

La forma en como es preparada la cesta para el carguio al horno juega un papel muy importante, pues puede definir el éxito total o el fracaso de la fusión de la carga. Es por ello que se pone bastante cuidado en la forma de la preparación de la cesta.

Una de las características del hierro esponja es que este contiene óxidos de hierro, sílice así como otros óxidos que propician que se vuelva "*pegajoso*" cuando alcanza su temperatura de fusión, aglomerándose en algunos casos formando bloques de difícil fusión que se colocan principalmente en los puntos fríos del horno, como pueden ser las paredes refrigeradas del horno u otros, por ello durante la preparación de las cestas se trata de que el DRI esté diluido en la chatarra, por lo cual se carga en forma intercalada con la chatarra, a la vez que se cuida que el DRI no sea cargado en forma de pila pues esto podría propiciar que cuando se cargue la cesta al horno, el hierro esponja se desplace hacia las paredes formando bloques que se adhieran a ellas, propiciando así una difícil fusión, pues estas pueden caer al baño líquido cuando presumiblemente ya este

por alcanzar la temperatura de sangrado. Lo que puede originar reacciones violentas por la generación abrupta de gases, lo cual es bastante peligroso.

Es por ello que el carguio del DRI por cestas alcanzara una cantidad máxima a cargar, que dependerá de la densidad y calidad de la chatarra, la forma de la cesta, del diámetro del horno, etc. Para determinar esto se suele realizar pruebas para determinar la mejor proporción a alimentarse en cestas, cabe señalar que muchas acerías optan por cargar en cestas hasta un 40% de DRI.

4.2.2. ALIMENTACIÓN CONTINUA

Indudablemente la necesidad de elevar el consumo de DRI en el horno eléctrico precipita la búsqueda de la mejor forma de alimentarlo, de tal forma que facilite una rápida fusión y un bajo consumo de energía, así surge el uso de la alimentación continua por la cual se logra alimentar el DRI al horno conforme este se vaya fundiendo.

El hierro esponja tiene similares características a la chatarra para su fusión y por esto puede hacer un buen arco con el electrodo, pero una característica propia es que este funde mejor cuando está inmerso en un baño de metal fundido donde la mayor transferencia de energía para su fusión toma lugar por conducción de calor hacia el DRI desde el baño fundido.

Según los últimos conceptos de alta productividad en hornos eléctricos es necesario reducir los tiempos de desconexión del horno durante la colada, esto posibilita tener menores pérdidas de energía y a la vez un mejor aprovechamiento energético en el horno. Otro aspecto es la importancia de reducir las recargas en una colada, pues cada apertura del horno para cargar una cesta con chatarra indudablemente causara una cuantiosa perdida energética.

Así en las acerías que utilizan como carga habitual más de 25% de prereducidos es común la utilización de sistemas de alimentación continua.

En la actualidad se conoce dos tipos de alimentación continua de prereducidos, una es la carga fría y la otra es la carga caliente, el cual es utilizado por las acerías que cuentan con un horno de reducción directa adyacente a ellos.

La alimentación continua del hierro esponja debe proveer un control confiable del rateo de alimentación y asegurar la descarga del prereducido en el área del delta de los electrodos. La alimentación continua debe traer como consecuencia

potenciales ahorros en el tiempo de colada, energía y consumo de electrodos así como un incremento de la productividad.

El rateo de alimentación debe ser regulado de acuerdo al estado de la fusión de la chatarra en el horno, donde la alimentación continua debe tratar de lograr una inmediata fusión del hierro esponja como este ingrese al baño.

Muchas experiencias de uso de alimentación continua de hierro esponja frío reportan un rateo de alimentación entre 27 a 35 kg/min/MW, sin embargo como en el caso de Aceros Arequipa mejoras implementadas en el proceso, como una practica adecuada de escoria espumosa ha permitido alcanzar rateos de trabajo de 45 kg/min/MW.

Esquema de fusión para alimentación continua de hierro esponja

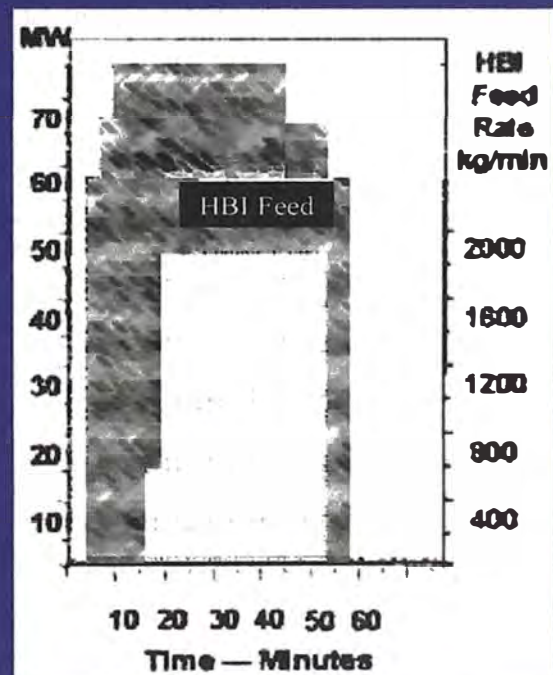
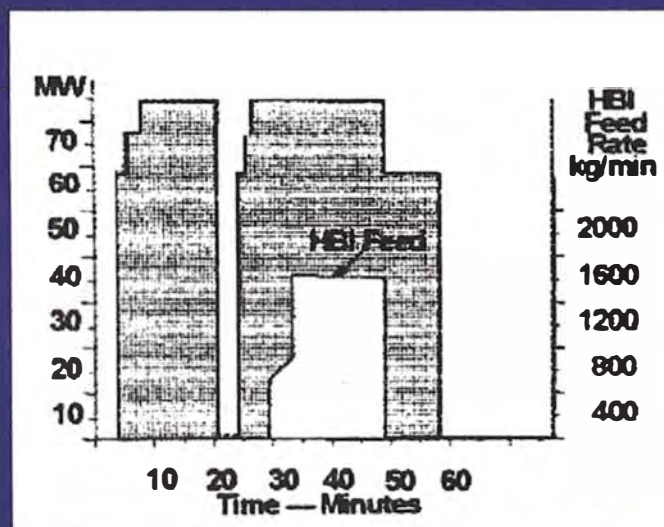


Figura 18 diagrama de fusión con esquema de alimentación continua

5. Uso de energía química en los hornos eléctricos de ultra alta potencia

El uso de energía química en los hornos eléctricos de arco esta asociado con el uso de oxígeno y carbono, basados principalmente en las reacciones de descarburación y/o combustión.

El empleo de oxígeno en los hornos eléctricos empezó aproximadamente en los años 50, y su uso inicial era como agente descarburante en el afino siendo los consumos muy limitados.

En la actualidad en los hornos modernos el empleo de energía química esta asociado con el uso de quemadores Oxy-fuel, lanzas de oxigeno y post combustión. Esta aplicación del oxígeno a permitido disminuir el consumo de energía eléctrica, debido al suplemento de energía química. El reducir el consumo de energía en el horno permite disminuir el tiempo de horno conectado por colada (power on), disminuyendo el tiempo de proceso (tap to tap), lo que posibilita el incremento de la productividad.

El aprovechamiento de la energía química no tan solo significara el uso de carbón y oxígeno en el proceso de fusión, sino también estará marcado por la búsqueda de la más eficiente transferencia de calor.

5.1. EMPLEO DE OXÍGENO

El empleo de oxígeno es con la finalidad de generar reacciones exotérmicas de oxidación en el interior del horno con elementos presentes en la chatarra como Al, Mn, Si, C, etc., lo que permitirá aligerar el proceso al aprovechar el calor generado por estas.

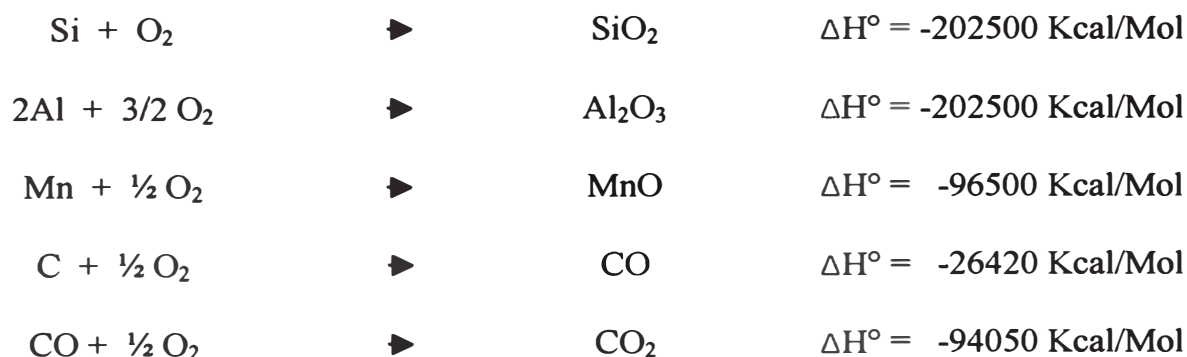


Tabla 6 Principales reacciones asociadas ala energía química en el horno eléctrico.

Para procesos donde el uso de hierro esponja es intensivo el calor aportado por reacciones con Al, Si, Mn son mínimas comparado con el efecto del carbono.

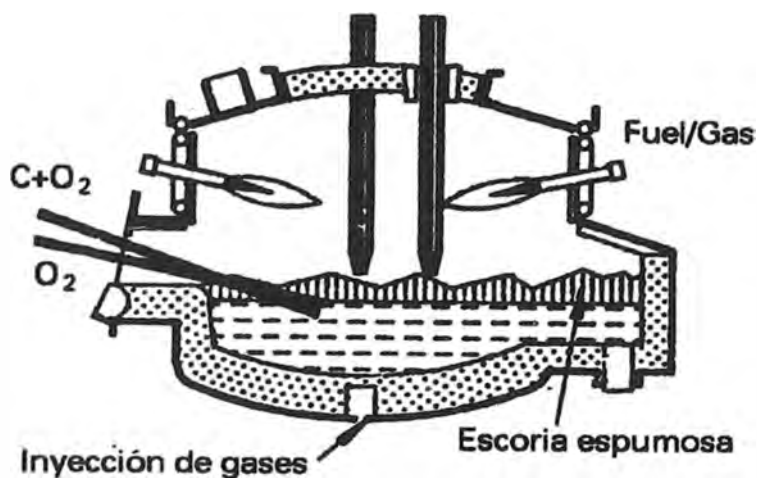


Figura 19

5.1.1. Quemadores Oxy-fuel

Los quemadores Oxy-fuel son fuertemente empleados en procesos de un mix de carga de alto porcentaje de chatarra.

Los quemadores habitualmente están colocados en las paredes del horno en la zona de los paneles refrigerados sobre la línea de escoria.(fig.19)

En los quemadores que emplean combustibles líquidos, gas natural, o

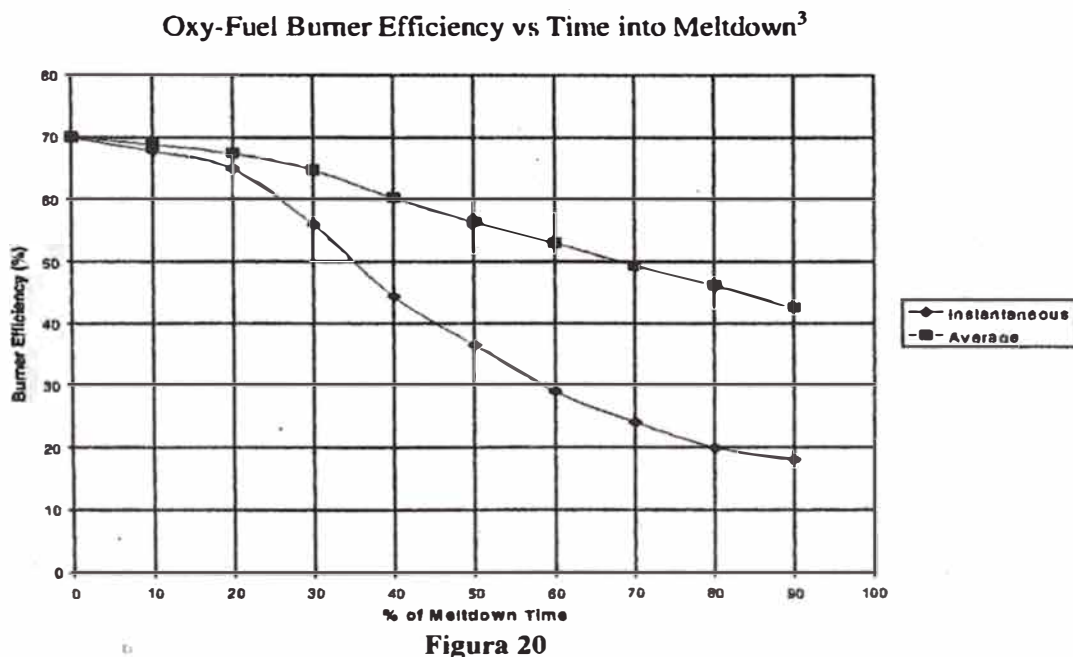


Figura 20

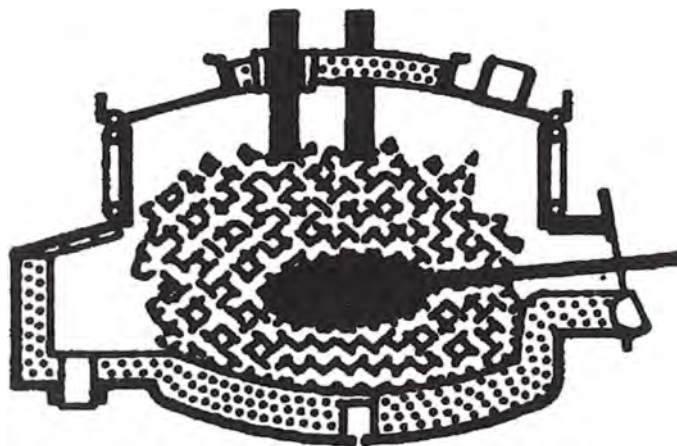
sólidos se enriquece el aire de combustión con oxígeno, lo que posibilita conseguir una mayor temperatura de llama y posibilitar de esta manera la transmisión de energía hacia la chatarra.

La transferencia de energía desde la llama hacia la chatarra es principalmente por convección de los gases y conducción de calor a través de la chatarra, como es previsible la eficiencia de transferencia de energía es alta en los inicios de la fusión debido a que la llama es rodeada por la chatarra, disminuyendo esta conforme la chatarra vaya sumergiéndose en el metal líquido(ver figura 20), hacia la etapa de baño plano los quemadores suelen ser apagados.

Esto evidencia la poca conveniencia de la utilización de quemadores para procesos con mix de carga de bajo porcentaje de chatarra.

5.1.2. INYECCION DE OXIGENO

Es el método más importante y mayormente usado para la utilización de oxígeno en los hornos eléctricos, la inyección puede ser manual o automatizada e inclusive con chorros supersónicos.



La oxidación de la chatarra genera energía

Figura 21

A través de este método el oxígeno es inyectado hacia el interior del horno desde el inicio de la fusión por acción de lanchas consumibles (tubos). En la actualidad esta inyección puede ser conseguida adicionalmente con

lanzas no consumibles fijas en los paneles del horno que pueden facilitar chorros supersónicos de mayor penetrabilidad en el acero.

Lo que se busca en esta tecnología es que el oxígeno reaccione lo más pronto posible como se inicie la colada con los elementos presentes en la chatarra para lograr su aporte energético, debido a esto es que intencionalmente se coloca en las cestas de chatarra una cierta cantidad de carbón (fig.21) que permita reaccionar el carbono con el oxígeno, esto es lo que ha posibilitado el uso intensivo del oxígeno.

5.1.3. **OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL CARBÓN:**

Es importante señalar que la forma de alimentación del carbón al horno definirá el aprovechamiento de la energía química de la reacción de combustión.

El carbón alimentado al horno reaccionara con el oxígeno inyectado. Si el carbón es alimentado durante la operación de fusión a través del orificio superior de la bóveda que es utilizado para la alimentación continua se tendrá que la reacción se produce sobre la chatarra o sobre la escoria si fuera el caso, permitiendo que los gases calientes de la reacción que son los que transfieren la energía escapen por los ductos sin dejar la energía en el sistema, a la vez de considerar que parte del carbón reaccionara con el aire presente en el horno, bajando su eficiencia.

Con la inyección de carbón pasa algo similar. Primeramente al inyectar el carbón durante la fusión este no logra penetrar adecuadamente entre la chatarra y parte es perdido por la succión del ducto, además que la reacción sería casi superficial bajando el aprovechamiento de los gases.

La mejor utilización del carbón para la inyección de oxígeno es cargarlo al horno a través de las cestas, esto posibilita que la reacción de combustión se propicie desde la parte inferior del horno y que los gases calientes en su camino a los ductos dejen su energía en la chatarra, adicionalmente se tendrá que como el carbón esta en la parte baja de la carga parte de este se disuelve en el acero lo que posibilita que durante la etapa de baño plano se tenga un acero carburado y que la inyección de oxígeno propicie una descarburación elevando la temperatura del acero.

5.1.3.1. Aporte de energía

El aporte de energía de la reacción de descarburación pudo ser analizado en el siguiente balance térmico:

1).- $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$			
ENTRADA		SALIDA	
Hc	0.000	Hco(298 a 1853)	11906.635
0.5 Ho ₂	0.000	Q	14513.365
H° ₂₉₈ CO	26420.000		
	26420.000		26420.000
			Calor disponible en Kwh/kg C 1.406

Tabla 7 Cálculo de la entalpia de la reacción de combustión del carbón

Para el balance mostrado se considero la temperatura de proceso igual a 1580°C, el carbón alimentado y el oxígeno inyectado estuvieron a temperatura ambiente (25°C).

Analizando el balance térmico se tiene que por cada kilo de carbono fijo que reaccione en el interior del horno se producirá una energía de 1.4 kwh, esto considerando si se logra un 100% de eficiencia de transferencia de energía.

5.1.4. POST COMBUSTION

La Post combustión es la reacción del CO con O₂ para generar CO₂ dentro del horno eléctrico lo que puede proveer energía adicional económicamente eficiente.



Esta reacción produce cuatro veces el calor neto de la descarburación convencional, utilizando la energía disponible del combustible CO que se genera en el horno, y que de otra forma se escapa por la extracción de humos donde se quema aumentando la temperatura de los ductos.

La post combustión es una tecnología interesante para aquellas siderúrgicas que buscan aumentar la productividad, reducir el consumo de energía eléctrica, aumentar los niveles de carbono de la carga y bajar la temperatura de los ductos.

Esta tecnología, relativamente simple de adoptar, consiste en la adición de lanzas subsonicas de oxigeno por encima del baño metálico. *La*

clave del éxito radica en asegurar que el calor generado en la post combustión se transfiera eficientemente a la chatarra y al baño metálico.

La cuantificación del grado de post combustión es a través del rateo de post combustión, el cual es señalado por:

$$\text{Rateo de post - combustion} = \frac{\%CO_2}{\%CO + \%CO_2}$$

5.1.4.1. Aporte de energía de la Post combustión.

CO + 1/2 O ₂ = CO ₂			
ENTRADA		SALIDA	
H _{CO(298-1853)}	11906.635	H _{CO(298 a 1853)}	19007.749
0.5 H ₂	0.000	H ^{°298} CO	26420.000
H ^{°298} CO ₂	94050.000	Q	60528.886
	105956.635		105956.635
		Calor disponible Kwh/kg de C	5.865

Tabla 8 Cálculo de la entalpia de post combustión

Para este balance se considera que el monóxido se encuentra a la temperatura de proceso esto es a 1580°C y que el oxígeno para la reacción ingresa a temperatura ambiente.

Es evidente que la post combustión podría realizarse con aire, pero este sería totalmente deficiente puesto que el aire viene acompañado de una cantidad de Nitrógeno que entraría a temperatura ambiente y en la salida llevaría una determinada cantidad de calor reduciendo el calor disponible.

Analizando los resultados de este balance se aprecia que la cantidad de energía producida por kilo de carbón en esta reacción sería aproximadamente de cuatro veces que la producida en la descarburación.

5.1.4.2. **Transferencia de energía:** Para la eficiente utilización de la post combustión el oxígeno debe ser inyectado en el momento preciso y en proporción a las emisiones de CO, es por ello que en muchos casos en acerías modernas se cuenta con analizadores de gases que temporal o permanentemente pueden ayudar en esta determinación. Similar a los oxiquemadores, la eficiencia de transferencia de energía en la post combustión disminuye conforme avanza la colada, especialmente en

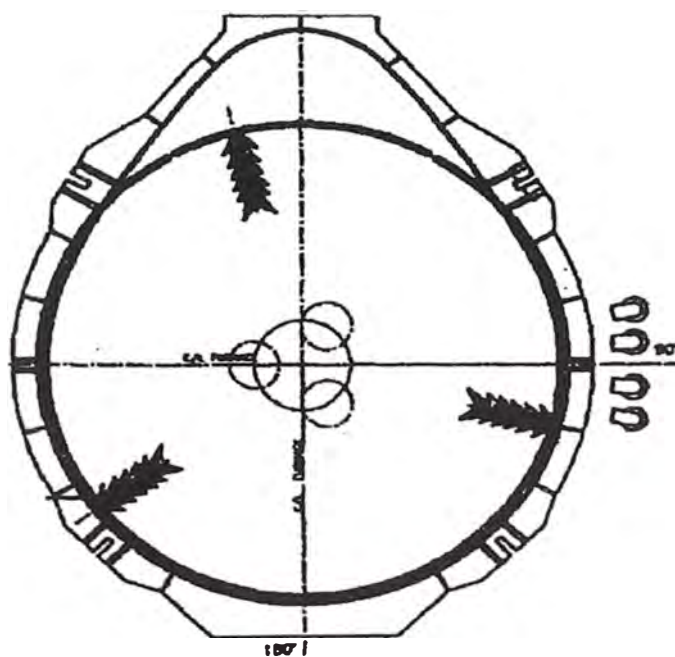
condiciones de baño plano. Por ello es que en estas condiciones es importante un control delicado de la altura de la escoria y del control de la locación y velocidad del oxígeno de post combustión.

5.2. LIMITACIONES EN EL USO DE LA ENERGÍA QUÍMICA

Durante el tiempo en que se viene utilizando oxígeno en los hornos eléctricos de arco se aprecia que de la energía global total usada (Eléctrica más química), el porcentaje de energía química va incrementándose marcadamente. Sin embargo, la consideración de fusión rápida involucra necesariamente el uso de la energía eléctrica, pues, el uso de cien por ciento de energía química siempre es menos eficiente que el 100 de energía eléctrica, puesto que el arco eléctrico posee una alta densidad de energía, comparada con un horno con 100% energía química que involucra la formación de gases, los cuales se expanden por la temperatura requiriéndose de un mayor espacio para poder entregar eficientemente la energía a la chatarra.

Sin embargo el uso de la energía química como un suplemento energético para el horno eléctrico a través del uso de oxígeno viene cobrando una mayor importancia con el paso de los años, debido a lo señalado anteriormente de reducir el consumo de energía eléctrica y elevar la productividad.

La principal limitación sobre el uso de energía química será la capacidad



Puerta de desescoreo

Figura 22 Lanzas colocadas en los puntos fríos del horno

de inyectar el oxígeno requerido asociado al combustible fósil (carbón) en el momento y el tiempo disponible y la capacidad para completar la reacción y transferir eficientemente esa energía a la chatarra o al baño.

Elevar el consumo de oxígeno implica tener mayor cantidad de puntos desde donde inyectar el oxígeno, habitualmente solo a través de la puerta de desescorreo se conseguía esto, en la actualidad se cuenta con modernos desarrollos de lanzas supersónicas que garantizan la inyección de oxígeno desde las paredes del horno. (fig. 22)

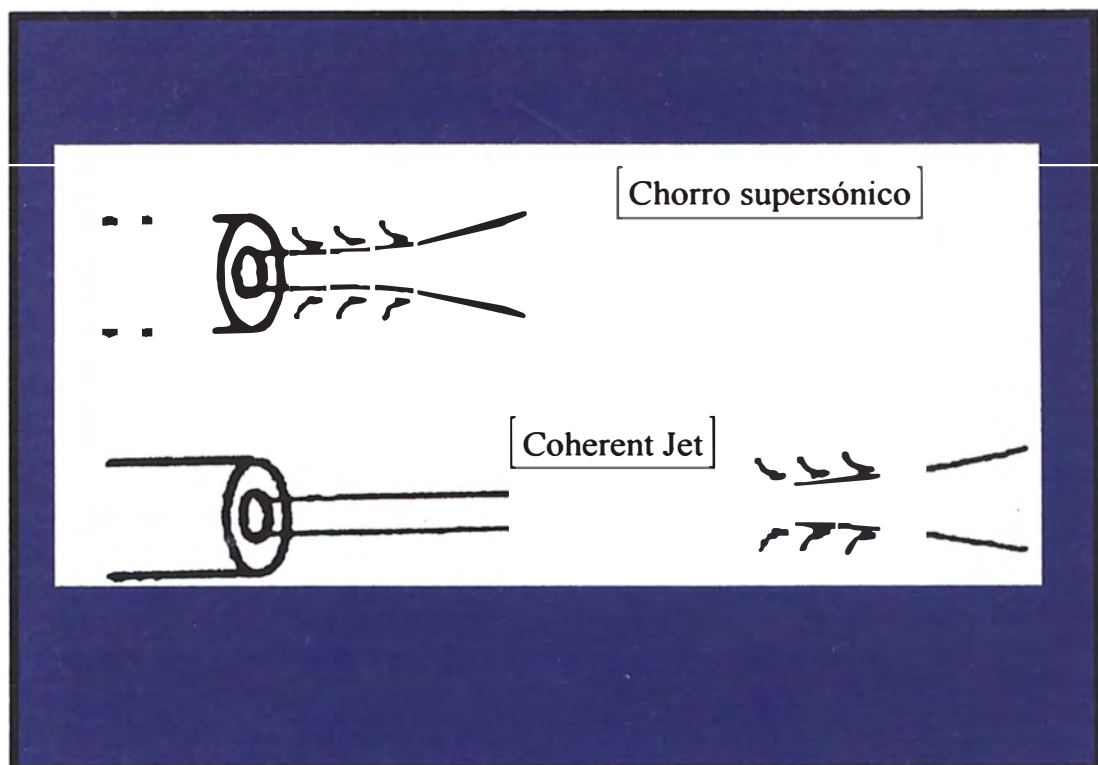


Figura 23

Aquí la condición es tener un chorro de oxígeno lo suficientemente largo y potente que permita penetrar adecuadamente sobre el baño y causar la reacción con el carbón en el interior del acero líquido. (fig. 23, 24 y 25)

Un ejemplo de esto es el coherent jet un sistema desarrollado por "PRAXAIR" el cual es una lanza que produce un chorro supersónico, en el que el chorro de oxígeno es recubierto superficialmente por una película de gas natural que propicia que este aumente su longitud sin perder su "coherencia" es decir sin que se expanda (fig.23) lo que da la posibilidad que el chorro penetre al acero causando la descarburación en el interior del baño permitiendo una eficiente transferencia de energía.

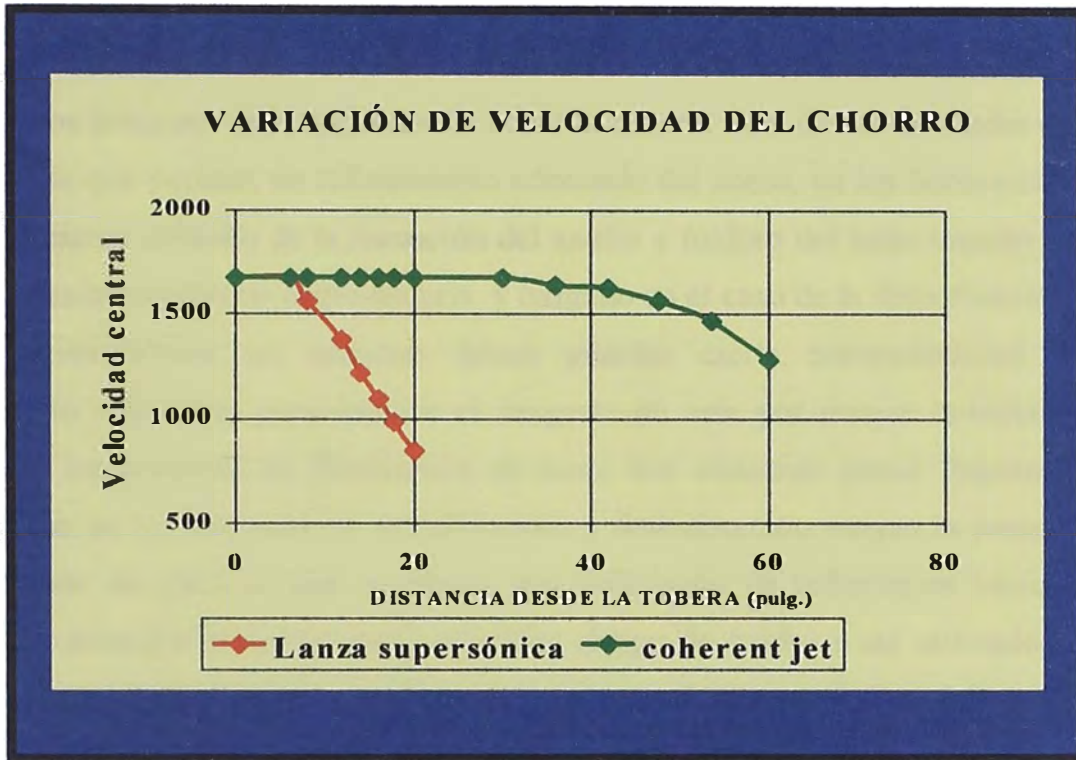


Figura 24 comparación de la velocidad con respecto al grado de penetración del coherent jet y una lanza supersónica

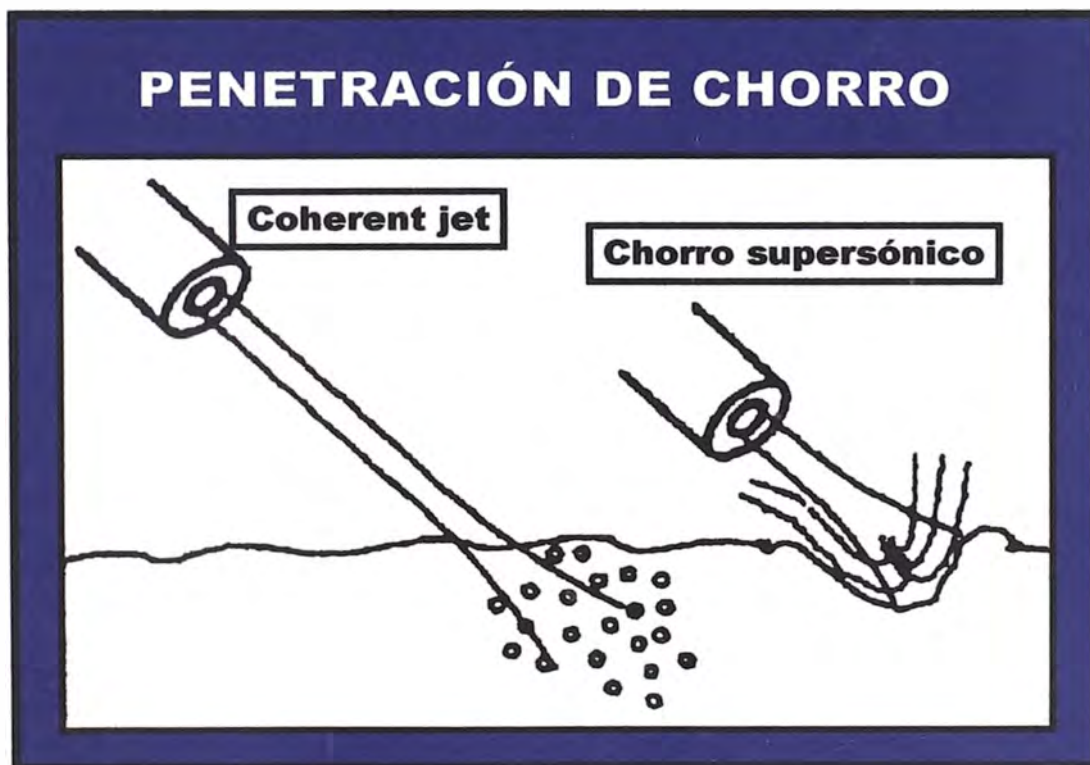


Figura 25 Esquema de efectividad en la penetración de coherent jet

6. ESCORIAS EN HORNOS ELECTRICOS

En los procesos de fabricación de acero la escoria trata de ser un medio colector de impurezas que permita un refinamiento adecuado del acero, en los hornos eléctricos este refinamiento consiste de la remoción del azufre y fósforo del baño líquido a través de reacciones heterogéneas acero-escoria y oxígeno en el caso de la defosforación.

Adicionalmente las escorias deben guardar cierta compatibilidad con el revestimiento refractario para reducir el desgaste de este por ataque químico, así la mayoría de los procesos de fabricación de acero son conocido como “básicos”, esto debido a que en los procesos de desulfuración y defosforación exigen la presencia de alto contenido de CaO, lo que involucra una utilización de refractarios básicos. Los términos de acidez o basicidad están referidos al tipo de óxidos a ser utilizados, como ejemplos de óxidos básicos en la naturaleza son conocidos el CaO, MgO, etc., y de óxidos ácidos la SiO₂ (sílice)

La mayoría de recubrimientos refractarios en la fabricación de acero están constituidos por óxidos de magnesio(MgO), y óxidos de calcio(CaO). Para el caso de los hornos eléctricos es común el uso de ladrillos de magnesita electrofundidos, los cuales contienen carbono en su composición, estos ladrillos han demostrado ser en el tiempo los de mejores resultados en los hornos eléctricos.

Así las escorias de hornos eléctricos están principalmente constituidos por óxidos de Calcio, óxidos de magnesio, sílice, alúmina, etc., y en la actualidad no solo tienen la responsabilidad de ayudar en el refinamiento del acero sino además de contribuir en una eficiente transferencia de energía en el horno, lo cual es conseguido por la formación de la escoria espumosa.

Este capítulo describe las características más importantes en el establecimiento de una práctica de la escoria espumosa.

6.1. ESCORIA ESPUMOSA

Cuando en los hornos eléctricos se generan gases como en la descarburación, estos al salir del acero tienen que atravesar la fase escoria y si las condiciones son las adecuadas la escoria retendrá las burbujas de gas por un tiempo determinado, lo que ocasionará que se incremente el volumen de la escoria reteniendo a los gases, este fenómeno es conocido como “escoria espumosa”.

El principal beneficio en tener una escoria espumosa es que esta recubre el arco eléctrico, lo que posibilita en elevar la eficiencia térmica del arco, diversos autores señalan que el utilizar escoria espumosa en baño plano permite elevar la eficiencia térmica del arco de 50 a un 80%.

6.1.1. **Condiciones básicas para la formación de escoria espumosa:** La formación de escoria espumosa precisa de dos condiciones principales:

- a) Una adecuada viscosidad en la escoria que permita retener a las burbujas por el mayor tiempo posible.
- b) La generación de suficiente gas que permita la formación de las burbujas a ser retenidas.

6.1.2. **Espumación:** El grado de espumación de una escoria esta cuantificado por el índice de espumación, el cual es el tiempo de viaje o retención del gas en la escoria.

La espumación de un líquido es caracterizado por el índice de espumación Σ

$$\Sigma = \frac{h}{V_g^s} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

h = altura de espuma

V_g^s = velocidad superficial del gas (cm/s)

El índice de espumación a mostrado tener la siguiente relación empírica para la viscosidad (η), densidad (ρ) y tensión superficial (σ) de la escoria:

$$\Sigma = \text{constante} \cdot \frac{\eta}{\sqrt{\rho\sigma}} \quad (9)$$

6.2. VISCOSIDAD DE LA ESCORIA

La viscosidad afecta la velocidad con la cual las burbujas penetran la capa de escoria y el grado en el que escurre la delgada película líquida, el cual es uno de los mecanismos crítico dominante de una espuma. En la práctica la presencia de una fase sólida no disuelta en la escoria líquida incrementa la viscosidad efectiva, como ha sido descrito teóricamente por Roscoe:

$$\eta_e = \eta \cdot (1 - 1.35 \cdot \Theta)^{-5/2} \quad (10)$$

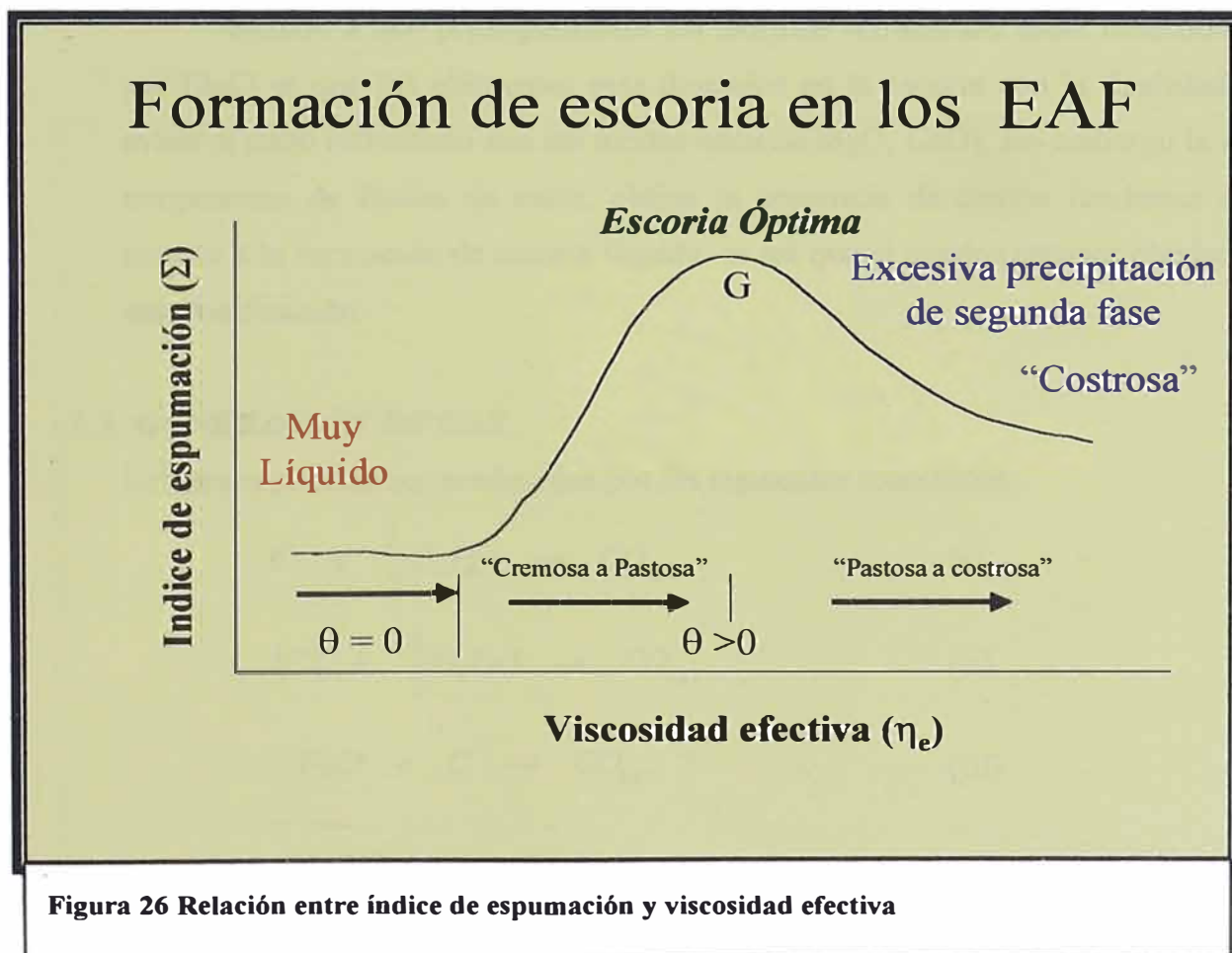
donde:

η_e = viscosidad efectiva

η = viscosidad de la escoria líquida

Θ = fracción de volumen de la fase sólida

Un incremento de la viscosidad efectiva debido a una cantidad limitada de partículas no disueltas podría incrementar la espumabilidad de la escoria de acuerdo a las ecuaciones 9 y 10.



La gráfica 26 muestra que con el incremento de la viscosidad efectiva se tiene un efecto marcado en el índice de espumación elevándolo hasta alcanzar un punto máximo, esto debido a que las burbujas de gas son retenidas por un mayor tiempo lo que posibilita el aumento de la estabilidad de la espuma, sin embargo cuando la escoria comienza a alcanzar una mayor saturación el incremento de la viscosidad es tal que no permite una adecuada formación de burbuja.

6.2.1. Características de las escorias en hornos eléctricos

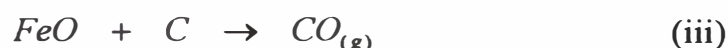
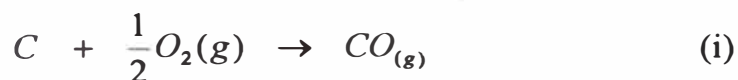
Tipo de óxido	Oxido	Punto de fusión
Refractario	% MgO	2800
	% CaO	2600
Fúndente	% FeO	1370
	% MnO	1850
	% Al ₂ O ₃	2030
	% SiO ₂	1720

Tabla 9

Debido a que principalmente los ladrillos refractarios están constituidos por MgO es que los elementos más deseados en la escoria con la finalidad de evitar el daño refractario son los óxidos básicos (MgO, CaO), sin embargo la alta temperatura de fusión de estos, obliga la presencia de ciertos fundentes que ayuden a la formación de escoria líquida, es así que el cuadro anterior obedece a esa clasificación.

6.3. GENERACIÓN DE GAS

Los gases podrían ser producidos por las siguientes reacciones:



Las primeras dos reacciones obedecen a la inyección de oxígeno lo que posibilita la formación y evolución de monóxido de carbono, la primera es la inyección conjunta de carbón con oxígeno, la segunda es la reacción de

descarburación donde el oxígeno reacciona con el carbono disuelto en el acero. Cabe señalar que la generación de monóxido desde el acero líquido es conducente a la espumación, debido a que el gas proviene en pequeñas burbujas que se distribuyen uniformemente en toda la escoria.

La tercera reacción es la que se produce en la escoria

La inyección sola del oxígeno puede causar una pobre generación de espuma ya que si la reacción (ii) va acompañada de la siguiente reacción:



Habrà un incremento de la temperatura, a parte de una disminución de la viscosidad de la escoria por el incremento del FeO.

6.4. Determinación de los niveles de saturación de MgO por el uso de los sistemas CaO-MgO-SiO₂-FeO

La figura 27 muestra la Sección isotérmica a partir de los sistemas ternarios del sistema cuaternario CaO-MgO-SiO₂-FeO en contacto con hierro metálico en 1600°C.

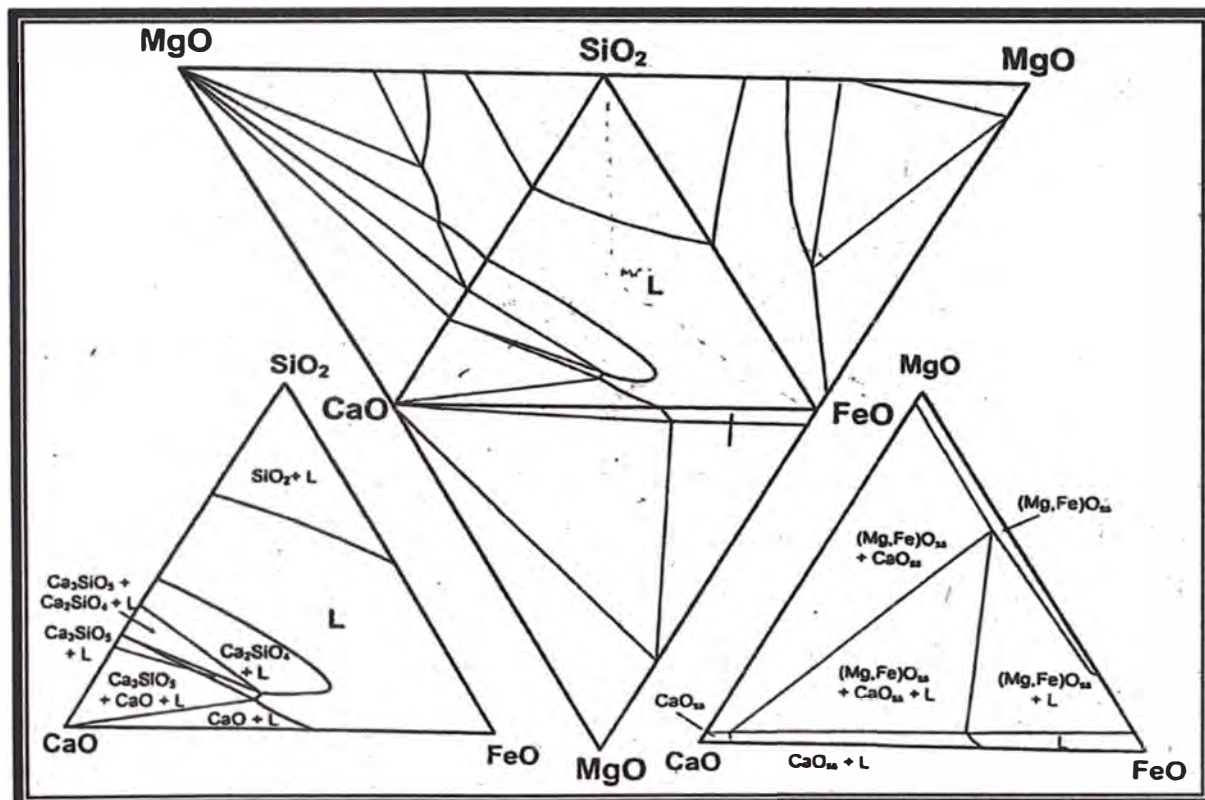


Figura 27: Sección isotérmica a partir de los sistemas ternarios del sistema cuaternario CaO-MgO-SiO₂-FeO en contacto con hierro metálico en 1600°C.

Este sistema representa a los principales componentes dentro de las escorias de horno eléctrico y es por tanto un buen sistema de referencia para definir las.

El sistema CaO-FeO-SiO_2 esta caracterizado por tener un amplio campo totalmente líquido y una área de gran estabilidad del Ca_2SiO_4 dentro de este campo los fundentes son el SiO_2 y el FeO . En el caso del sistema CaO-FeO-MgO este es característico por una pequeña zona totalmente líquida situada en el vértice del FeO y una amplia solución sólida entre MgO y FeO , esta solución sólida $(\text{Mg,Fe})\text{O}_{\text{ss}}$ es llamada magnesio-wustita (MW), en este sistema el fúndente es el FeO y los refractarios el CaO y el MgO .

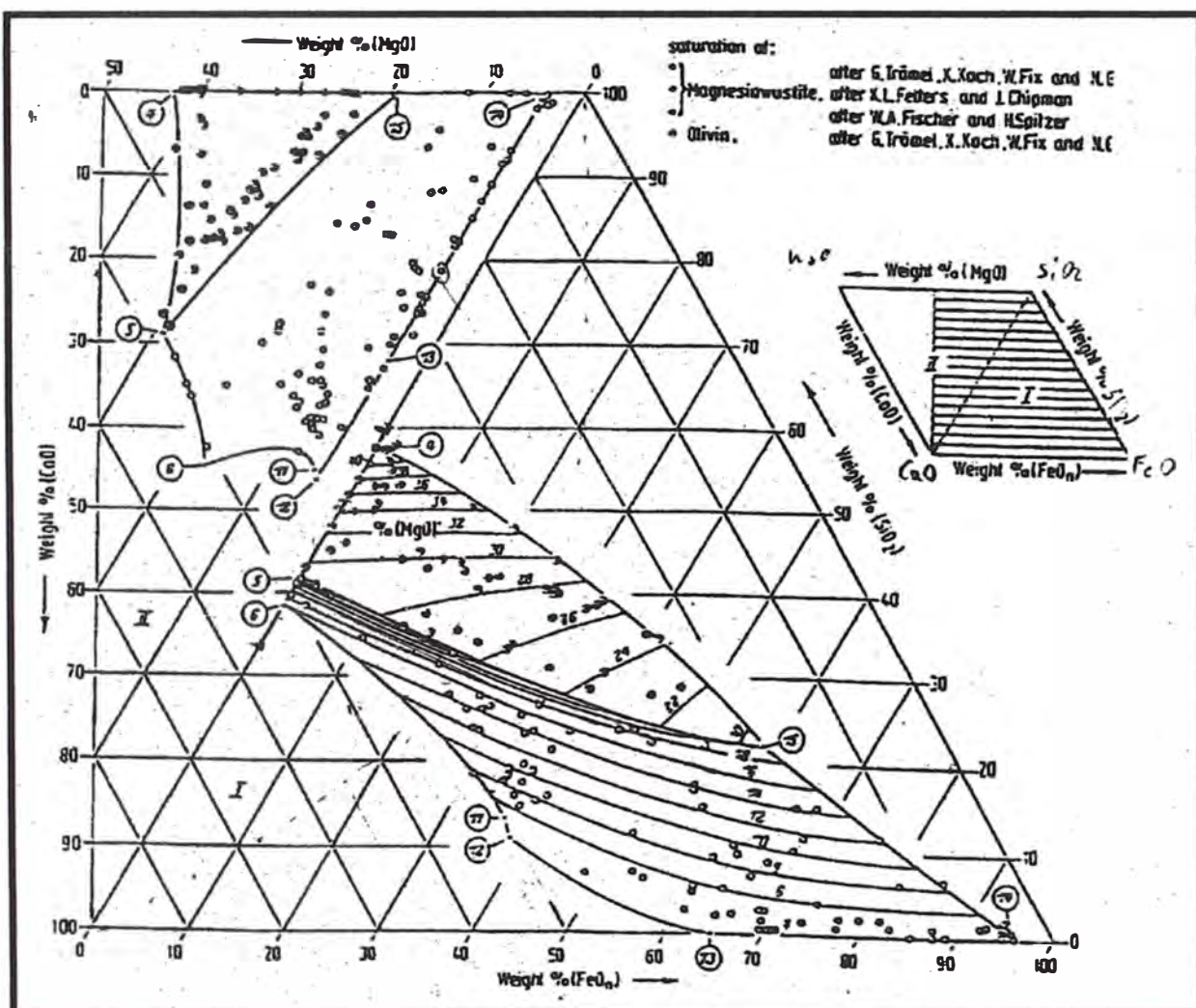


Figura 28 líneas de saturación del MgO basado en las soluciones sólidas $(\text{Fe,Mg})\text{O}$ y $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ en el sistema $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ en contacto con hierro metálico a 1600°C

La posición de las líneas de saturación del CaO y del MgO en este sistema son muy importante pues definirán los puntos en los cuales se tendrá la precipitación de partículas sólidas en la escoria. Las líneas de saturación del MgO basado en las

soluciones sólidas $(\text{Fe,Mg})\text{O}$ y $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ en el sistema $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ en contacto con hierro metálico han sido proyectadas sobre el sistema CaO-FeO-SiO_2 como muestra en la figura 28.

En este gráfico 28 se puede notar el incremento de la solubilidad del MgO conforme aumenta el contenido de SiO_2 en la escoria, además se aprecia que para una basicidad constante la solubilidad del MgO disminuye conforme aumente el FeO . De aquí podemos entender la tremenda diferencia de los fundentes, la sílice propicia el incremento de solubilidad del MgO en la escoria convirtiéndola en agresiva para el refractario, lo contrario ocurre con el FeO el cual al incrementarse reduce la solubilidad del MgO .

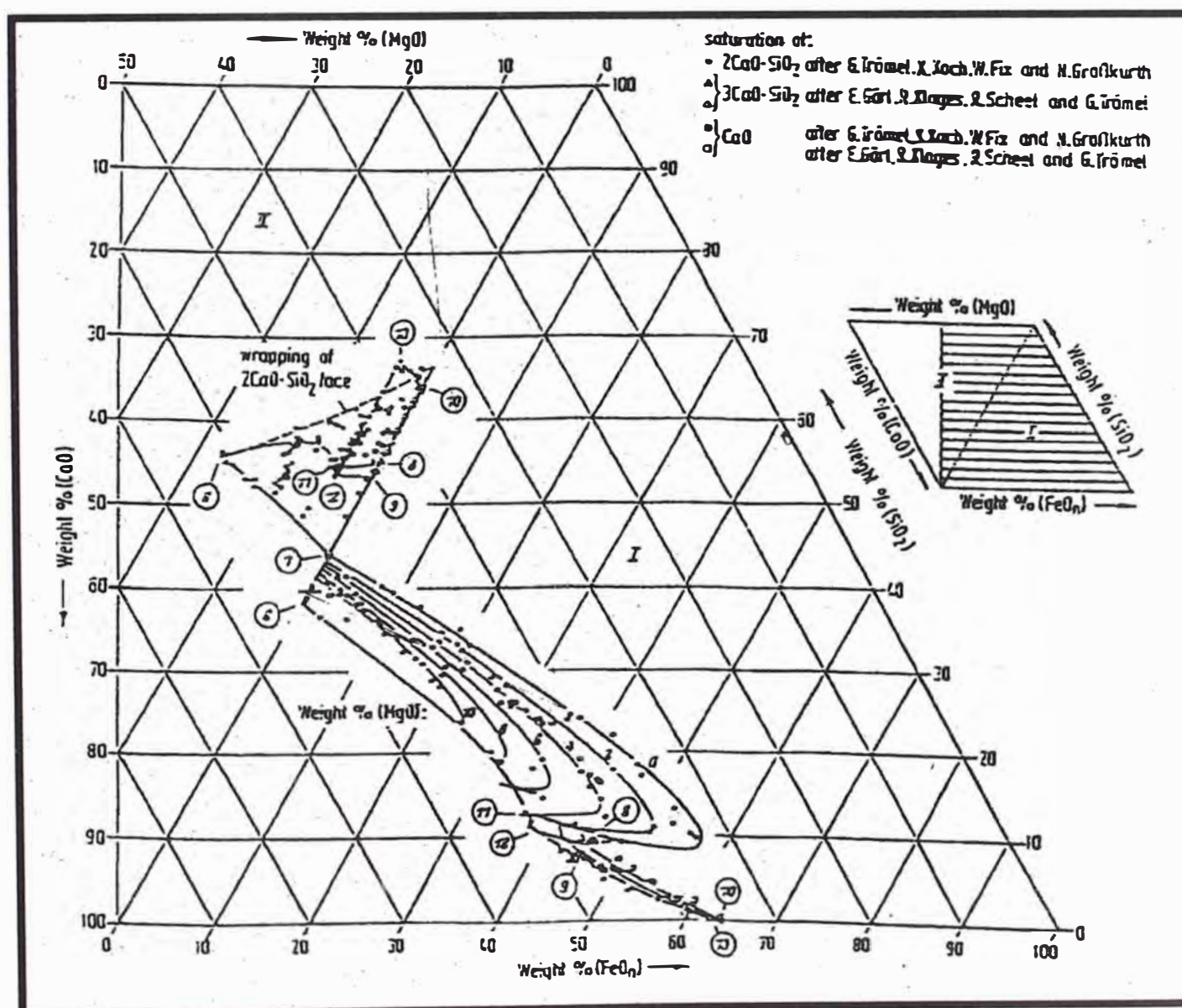
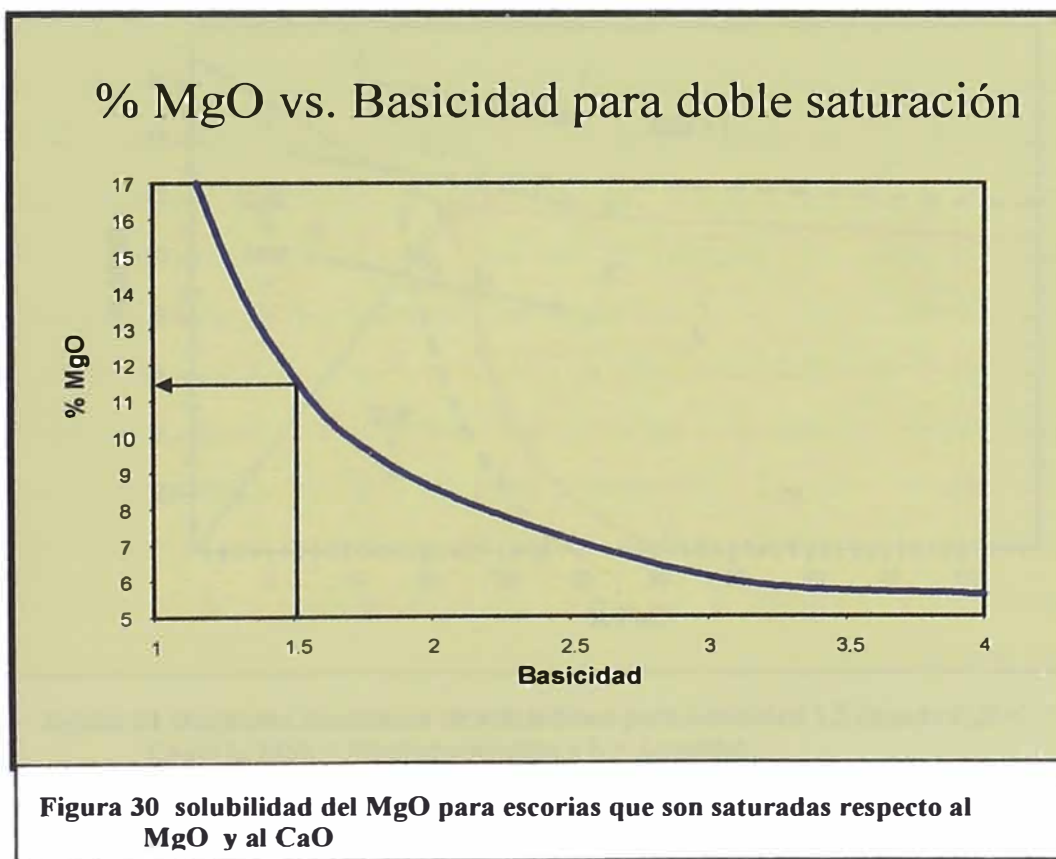


Figura 29 líneas de saturación del CaO basado en las soluciones sólidas $(\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ y Ca_3SiO_5) en el sistema $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ en contacto con hierro metálico a 1600°C

De igual forma se ha proyectado las curvas de saturación del CaO basado en fases (Ca_2SiO_4 y Ca_3SiO_5) en este sistema. Como se ve en la figura 29 los niveles de saturación del CaO en estas escorias están entre el rango de 42 a 45 %, pero en la mayoría de escorias de hornos eléctricos no se alcanzan estos niveles convirtiéndose en no saturadas en CaO.

De las figuras 28 y 29 y de los sistemas ternarios limítrofes CaO-MgO-SiO₂ y CaO-MgO-FeO pudieron ser determinados los puntos de saturación dual (Ca_2SiO_4 y (Fe,Mg)O). El contenido de MgO en la saturación dual es mostrado gráficamente en la figura 30 como función de la basicidad binaria ($B_2 = \% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2$) a 1600°C. Como se puede apreciar el límite de saturación del MgO disminuye conforme aumenta la basicidad. Por tanto los datos de la figura son muy importantes, pues define la cantidad mínima de MgO que requiere la escoria para ser compatible con el refractario para una basicidad específica.



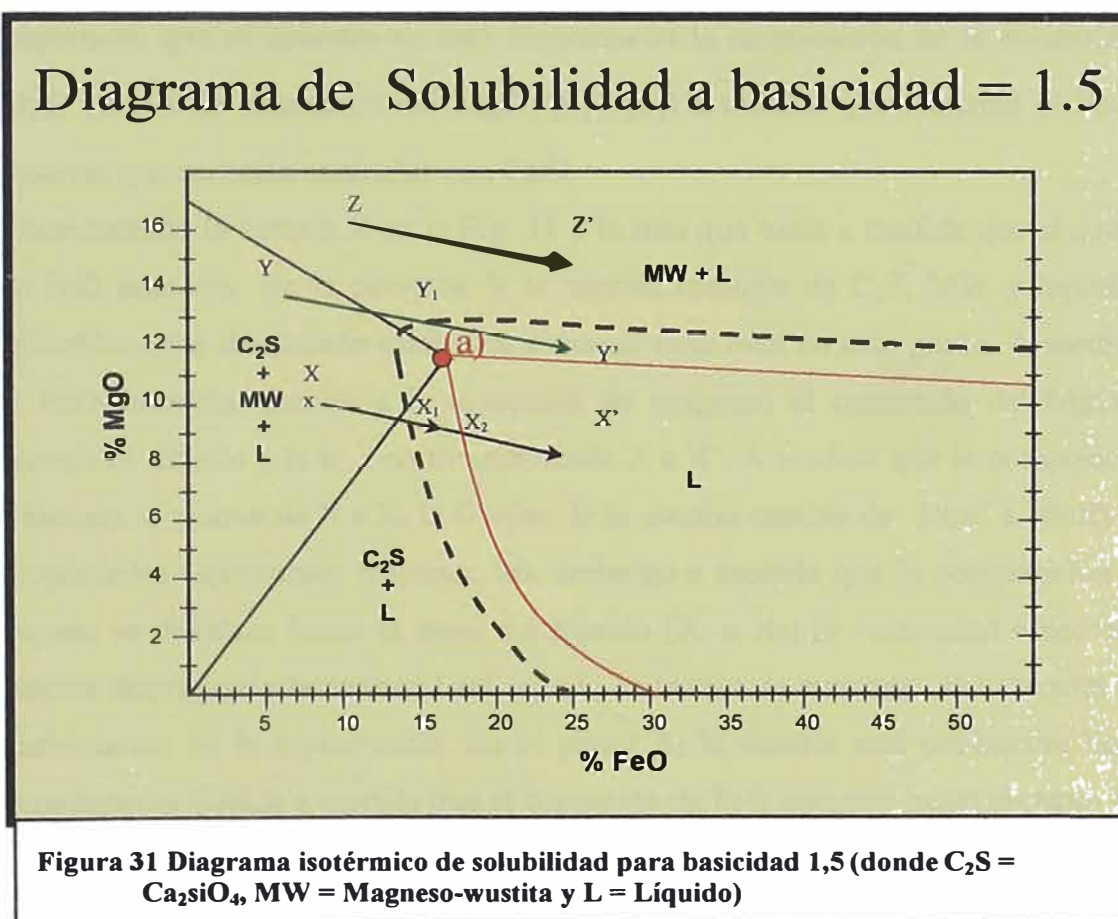
Una característica importante de este gráfico es que señala las condiciones necesarias de contenido en MgO en la escoria para poder trabajar con basicidades bajas, lo cual es de suma importancia debido a que un propósito en los procesos de hornos

eléctricos es la de generar la menor cantidad de escoria, a lo que se puede llegar con el incremento de MgO en la escoria.

6.5. Diagramas isotérmicos de solubilidad

El gráfico 30 muestra que bajo esas condiciones difícilmente se puede referir a las características de espumación en los hornos eléctricos. Como se mencionó anteriormente el FeO es el principal componente fúndente de la escoria y tiene un fuerte impacto sobre las propiedades de espumación.

Así los datos obtenidos en la gráfica 30 fueron utilizados para construir mapas de relación de fases como función del contenido de MgO y FeO a una basicidad constante, los cuales son llamados **diagramas isotérmicos de solubilidad**.



El punto (a) en este diagrama es el punto de saturación dado con respecto al MgO. (MW) y CaO (C_2S) sobre la superficie del líquido, y ha sido determinado a partir de la Fig. 30. Las líneas del liquidus “curvas de saturación” se originan en el punto (a) y esta definida como (a)-(b) y (a)-(c) para la saturación del MgO y CaO respectivamente. Las curvas de saturación y las líneas de estabilidad de fase han sido generadas a partir del *sistema* CaO-MgO-SiO₂-FeO y sus ternas de menor orden. La

línea punteada que delimita la región de liquidus es una línea inferida para escorias con características máximas de espumación, por ejemplo *óptima* viscosidad efectiva debido a la presencia de partículas de 2da. fase (punto [G] en Fig. 26)

La Fig.31 se caracteriza por una gran área del liquido. Las escorias que caen dentro de esta área tendrán pobres propiedades de espumación debido a la baja viscosidad de la escoria y la falta de partículas de 2da. Fase ($\Theta = 0$). La posición de las curvas del liquidus es muy importante ya que ella muestra la máxima cantidad de FeO que puede tolerar antes que la escoria se vuelva totalmente Liquida. También se aprecia claramente en este diagrama, la relación entre el nivel de FeO y la cantidad del liquido en la escoria. A medida que el FeO disminuye, también lo hace la fracción de liquido mostrando claramente el efecto fúndente del FeO. Otra característica importante que se muestra en este diagrama es la disminución de la solubilidad del MgO (curva de saturación del MgO) [a] - [b]) a medida que aumenta el FeO para escorias que no están saturadas con CaO.

Considerando la escoria X en la Fig. 31 y la ruta que toma a medida que el contenido de FeO aumenta. En la posición X la escoria consiste de C_2S , MW y liquido y es probablemente demasiado dura para espumar muy bien en este punto. A medida que el FeO aumenta (debido a la inyección de oxígeno) el contenido del MgO de la escoria es diluido y la escoria avanza desde X a X'. A medida que la composición de la escoria se mueve de X a X₁ la fluidez de la escoria cambia de 'dura' a 'fluffy' y las propiedades espumantes mejoran. Sin embargo a medida que la composición de la escoria se desplaza hacia la línea del liquido (X₁ a X₂) la viscosidad efectiva de la escoria disminuye y la cantidad del liquido en la escoria aumenta.. Esto resulta en una disminución de la espumación. En el punto X₂ la escoria está totalmente liquida y permanecerá liquida a medida que el contenido de FeO aumenta hasta el punto X'.

La composición inicial de la escoria (X) esta saturada en MgO pero a medida que el contenido del FeO aumenta, la escoria se vuelve no saturada poniéndose agresiva para los refractarios del Horno.

Considerando la escoria "Y" de la Fig. 32 y la ruta que sigue la composición del liquido a medida que aumenta el contenido del FeO en la escoria. El contenido inicial del FeO en la escoria Y es igual a la escoria X es decir escoria "dura" y baja propiedad espumante. A medida que aumenta el FeO y la composición del liquido sigue la ruta Y a Y₁, las características espumantes de la escoria mejoran. Sin embargo

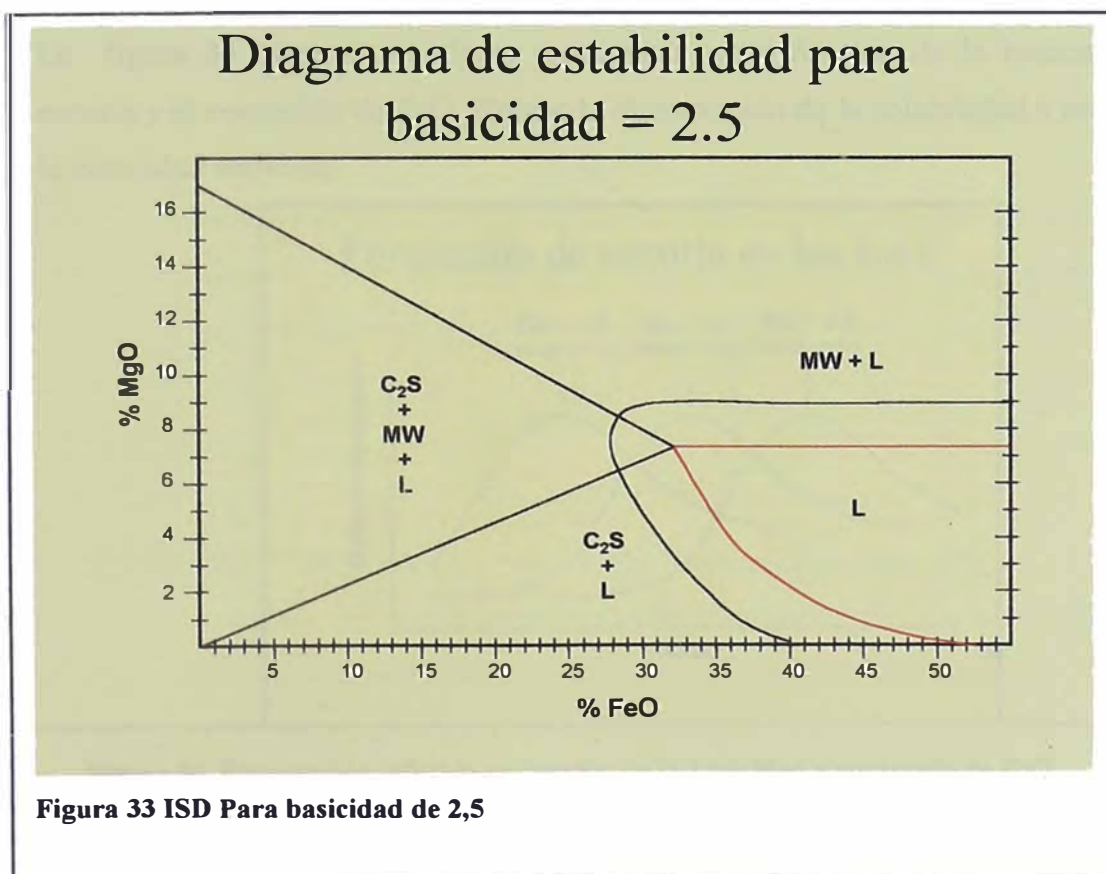
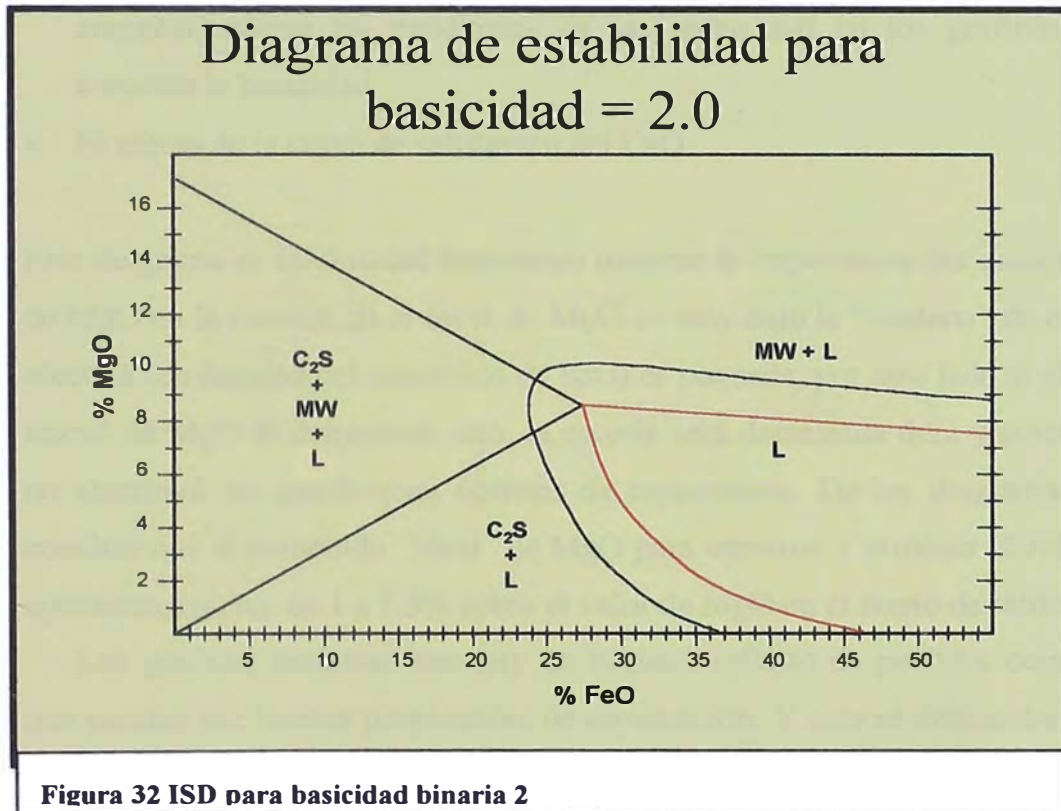
a medida que la composición de la escoria se mueve desde Y_1 a Y' las buenas propiedades espumantes se mantienen debido a la presencia de partículas de MW en la 2da Fase. Este contrasta con la escoria X_2 y X_1 , las cuales son totalmente liquidas en este nivel de FeO. No solamente la escoria Y es totalmente compatible con los refractarios a lo largo de todo el intervalo de composición (saturada en MgO), si no también las propiedades espumantes son mucho menos sensitivas al contenido de FeO. La “ventana” de espumación para la escoria Y es significativamente mayor (desde 8 hasta mas del 20% FeO) y para la escoria X (desde 8 hasta 17% de FeO). También como la escoria Y tiene la capacidad de espumar sobre un rango mayor de composición, la inyección del carbón para reducir FeO puede ser más efectiva en esta escoria que en la escoria X .

Considerando la escoria Z en la Fig. 31. El contenido inicial del MgO es demasiado alto lo cual conduce a tener bajas propiedades de permanece casi “dura” inclusive si el contenido del FeO significativamente.

El ISD presentado en la Fig. 31 muestra claramente el efecto del FeO y MgO sobre la relación de fases y por lo tanto sobre las propiedades espumantes de la escoria. No solamente es importante el contenido del MgO en términos de compatibilidad con el refractario si no también es muy importante para las propiedades espumantes. El ISD también muestra la diferencia entre las condiciones de espumación en el laboratorio y en el EAF. En el primero se adicionan partículas sólidas en la escoria liquida, aumentando gradualmente la viscosidad efectiva de la escoria, mientras que en las condiciones reales del EAF se hace al revés. En el EAF las escorias son inicialmente duras debido a la adición de Oxidos refractarios en la carga y luego se vuelven gradualmente mas liquidas a medida que los fundentes (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO) son generados por la inyección de oxigeno.

6.6. VARIACIÓN DE LOS ISD CON LA BASICIDAD

Los mismos principios en construir el ISD para basicidad de 1,5 fueron utilizados para construir estos diagramas a mayores basicidades a 1600°C. (ver figuras del 32 al 33).



Las características más importantes de este diagrama de estabilidad isotérmico son:

- Disminución del área líquida a medida que aumenta la basicidad de la escoria
- Necesidad de mayores niveles de FeO para alcanzar la línea líquidus.
- Disminución de la solubilidad a medida que aumenta la basicidad de la escoria.
- Menor efecto del FeO sobre la curva de saturación a medida que la basicidad aumenta, nótese las pendientes de las rectas a-b en los gráficos conforme aumenta la basicidad.
- El efecto de la curva de saturación del CaO

Este diagrama de estabilidad isotérmico muestra la importancia del contenido inicial de MgO en la escoria. Si el nivel de MgO es muy bajo la “ventana” de espumación efectiva (en función del contenido de FeO) es pequeña, por otro lado si el contenido inicial de MgO es demasiado alto, la escoria será demasiado dura y potencialmente no alcanzará las condiciones óptimas de espumación. De los diagramas se puede concluir que el contenido “ideal” de MgO para espumar y proteger el refractario es aproximadamente de 1 a 1,5% sobre el valor de MgO en el punto de saturación dual.

Los gráficos muestran que hay un numero infinito de posibles composiciones que pueden dar buenas propiedades de espumación. Y esto se demuestra pues en la industria los EAF suelen trabajar con basicidades desde 1.2 hasta 3 con niveles de FeO variando entre 10 y 40%

La figura 34 mostrara el efecto espumante como función de la basicidad de la escoria y el contenido de FeO. Nótese la disminución de la solubilidad a medida que la basicidad aumenta.

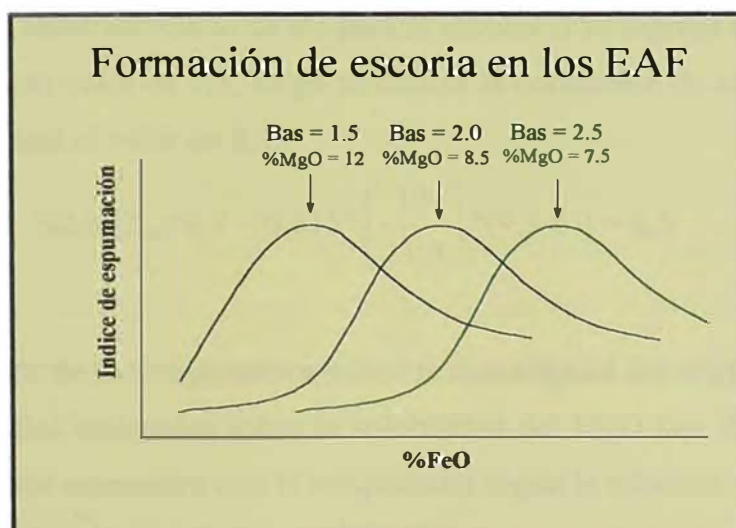


Figura 34 Espumación inferida en función de la basicidad y contenido de FeO

6.6.1. EFECTO DE LA ALUMINA

Diversos estudios han llevado a plantear la siguiente relación de corrección del grado de solubilidad con un incremento del contenido de Al_2O_3 .

$$\%MgO_{sat} = \%MgO_{Re\ ferencialconB3} - 0,615 * \left[\frac{\%Al_2O_3}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \right] * (\%MgO_{Re\ ferencialconB3} - 6)$$

$\%MgO_{Re\ ferencialconB3}$ = Obtenido en la figura 5 considerando el valor B3 como B2 (basicidad binaria)

Ejemplo:

Para una escoria B el 10% de SiO_2 ha sido reemplazada por una cantidad equivalente de Al_2O_3 Esto conducirá a una disminución de la solubilidad del MgO de 9.3%(escoria A) a 8,3%(escoria B)

	Escoria A	Escoria B
%MgO	9.3	8.3
%CaO	43.1	43.2
%SiO ₂	21.5	11.5
%Al ₂ O ₃		10
%FeO	26.1	27
$B_2 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$	2	3.8
$B_3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + Al_2O_3}$	2	2

Tabla 10

Con el valor calculado de B3 para la escoria B se ingresa al gráfico 30 y se obtuvo el valor de 9,3, luego se realiza la corrección de acuerdo a formula y nos dará el valor de 8,3.

$$\%MgO_{sat} = 9,3 - [0,615 * \left[\frac{10}{21.5} \right] * (9.3 - 6)] = 8,3$$

6.6.2. Efecto de la temperatura sobre la solubilidad del MgO

Estudios realizados sobre la solubilidad del MgO han llegado a plantear que este valor aumentara con la temperatura según la relación:

$$\%MgO_T = \%MgO_{ref} + (0,0175 * (T - 1600))$$

donde:

$\%MgO_T$: $\%MgO$ a la temperatura T en °C

$\%MgO_{ref}$: $\%MgO$ a 1600° de la fig.5

6.7. DISEÑO Y EVALUACION DE LA COMPOSICIÓN DE LA ESCORIA:

Con estas herramientas conocidas nos dispusimos a diseñar la composición de la escoria, esto paso por establecer un balance de carga considerando todos los elementos que aportasen a la formación de la escoria, esto involucro un conocimiento detallado de todos los materiales a ser usados en el horno (ver balance en apéndice), Nuestra ventaja: *“el uso de altos porcentajes de hierro esponja”* permite trabajar con cargas más controladas en su composición química, (trabajar con altos contenidos de chatarra por más altos esfuerzos en su clasificación siempre a tendido a una alta variabilidad en la composición), a parte que al conocer la ganga de la mayor parte de la carga se pueden establecer coladas más homogéneas en todos los aspectos del proceso.

Trabajar con pre-reducidos involucra tener en el interior del horno altos porcentajes de FeO en la escoria, y como dentro de la estructura de costos la materia prima juega un papel importante, establecimos un proceso altamente reductor, pero esto tiene que ser compatible con la necesidad de cierta cantidad de FeO para la espumación, adicionalmente trabajar con hierro esponja en altos porcentajes como 70%, involucra el uso de la alimentación continua y trabajar con baño plano, lo que obliga tener una espumación eficiente desde el inicio de la alimentación hasta el final de la colada.

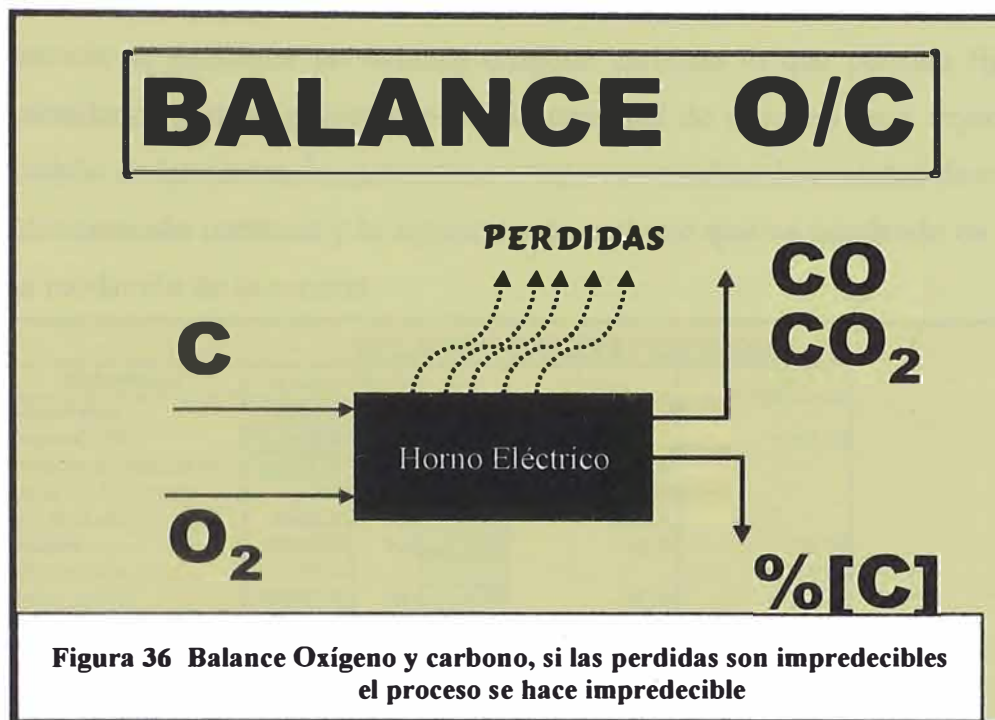
En sus inicios el proceso era de fusión convencional con una limitada espumación que propiciaba un cierto rebose por la puerta, lo que traía una variabilidad no controlada en la composición de la escoria pues como esta se iba evacuando, la adición de aditivos (cal) no propiciaba los efectos esperados y si se conseguía no podía ser un efecto repetitivo. En la actualidad durante toda la alimentación continua se mantiene el horno cerrado y solo se evacua la escoria en un solo momento en la colada que es después del fin de fusión. Esto a permitido tener un control de la variación de la composición química de la escoria durante toda la etapa de alimentación continua. A través de un balance realizado en una hoja de cálculo se puede inferir de forma aproximada la composición de la escoria para diversos momentos en función de los elementos y las etapas en que son añadidos al horno. Esto sin lugar a dudas permite un eficiente control de la espumación de la escoria. En general lo que se trata de hacer a través de los diagramas de estabilidad

es planteamos algunas ventanas de espumación (fig. 35) y tratamos de mantenemos en esta región. La cal dolomítica que estamos utilizando aún no tiene la calidad que se requiere, pero sin lugar a dudas hasta el momento es el mejor aportante de MgO con que contamos, esto de alguna manera ya limita el tenor de MgO a alcanzar, es por ello que nosotros tendemos al control de un rango de FeO de 10 a 17% para tener un % MgO que varía de 8 a 10 %.

El tener también tenores no muy elevados de FeO indudablemente contribuye con el cuidado del refractario, esto es debido a que el refractario tiene como ligante cierta cantidad de carbón lo cual lo pone en una situación de posible reacción con el FeO presente en la escoria, cuando este último tiene niveles altos y propicia sobre todo escorias fluidas que lavan el refractario.

BALANCE DE MATERIALES (ESCORIA)										
Materiales	Peso	Rend.	CaO		MgO		SiO ₂		FeO	
			%	Wt	%	Wt	%	Wt	%	Wt
Cal Dolomítica	1200	95	63.9	728.46	22.4	255.36	4	45.60		0.00
Cal Calcica	400	95	89.8	341.24		0.00	3.2	12.16		0.00
Chatarra	15150	100		0.00		0.00	?		2	303.00
Hierro esponja Nacional	18450	100	0.8	147.60	0.2	36.90	2.7	498.15	10.4	1918.80
Hierro esponja Importado		100	0.8	0.00	0.12	0.00	1.6	0.00	8.6	0.00
Briquetas	9900	100	0.8	79.20	0.6	59.40	1.17	115.83	9	891.00
Antracita	1600	90		0.00		0.00	4.2	60.48		0.00
Cascarilla	1000	80		0.00		0.00	0.4	3.20	91.8	734.40
Perdigones				0.00		0.00		0.00		0.00
Refractario(desgaste)	36.45		5	1.82	93	33.90	2	0.73		
				1298.32		385.56		736.15		3847.20
Basicidad Binaria			1.31213							
Composición química escoria al fin de Fusión										
CaO	33.00									
MgO	9.80									
SiO ₂	25.15									
FeO	11.30									
Fe°	3.00									
RESULTADOS OBTENIDOS										
Peso de Escoria generada una colada	3934.31									
Desgaste de refractario	36.45									
Silice en la chatarra	253.33									
FeO que se reduce	3402.62									

Tabla 11 Balance de materiales, cada uno de los materiales al horno y sus respectivas contribuciones a la escoria



Con la idea equivocada de que la espumación obedecía a tener altos grados de oxidación en la escoria, para que esta reaccione con el carbón, solo el 10% de la antracita total se alimentaba por cestas. La mayor cantidad de antracita era alimentada con los prereducidos por alimentación continua.

Problema: Deficiente transferencia de calor al producirse la reacción de combustión sobre la carga o sobre el acero fundido, generando gases que escapaban por los ductos, deficiente escoria espumosa por escoria fluida debido a la sobre oxidación (alto contenido de FeO) por lo misma alto deterioro a los refractarios y paneles refrigerados.

Solución:

1. Se realiza clasificación granulométrica del carbón(antracita), se separan en tres clases:

Denominación	Granulometría	Alimentación
Gruesa	>5 pulgadas	Alimentación continua y cestas
Granulada	5-10 mm	Sangrado
Fina	< 5mm	Inyección

El 50% de la carga de antracita es realizada en las cestas conjuntamente con la chatarra.

El proceso esta más controlado, con la ayuda del balance de materiales para la escoria se establece un balance oxigeno carbono lo que permite fijar algunas cantidades para el proceso, como la cantidad de oxigeno para inyección y el carbón de las cestas, lo que reduce a valores variables la cantidad de carbono por alimentación continua y la inyección de carbono que va quedando en función de la oxidación de la escoria

BALANCE OXIGENO CARBONO							
Materiales	Cantidad	Rendim	Ley	C (Kg)	O (Nm3)		
Antracita(kg)	1600.00	90	88.00	1267.20			
Oxigeno(Nm3)	1310.40	100	99.00		1297.30		
Consumo de Electrodo	1.60	kg/tAL		63.34			
C enel HE importado	0.00	100	2.10	0.00			
C en Briqueta	9900.00	100	1.35	133.65			
Chatarra	15150.00	100	0.20	30.30	-26.35		
defosforación	16.04				-14.49		
Acero Liquido	39585.00	100	0.10	-39.59			
FeO(kg)	3402.62	100	0.16		529.30		
				1454.901	1785.76		
RESULTADOS OBTENIDOS							
Oxigeno para combustion				1357.91			
Oxigeno para Post combustion				427.85			
CO producido				1860.12			
CO2 producido				855.70			
Ratio de Post Combustion				31.51			
				En la chatarra			
				Si	Mn	Al	
				%	0.1	0.45	0.02
				Wt	15.15	60.6	3.03
				O2	12.12	12.34	1.89

Tabla 12 Balance oxigeno carbono, para el control de la oxidación

- Se implemento en los puntos fríos, el uso de 2 lanzas de post combustión del tipo Doble Flow la cual cuenta con dos toberas una para flujo supersónico

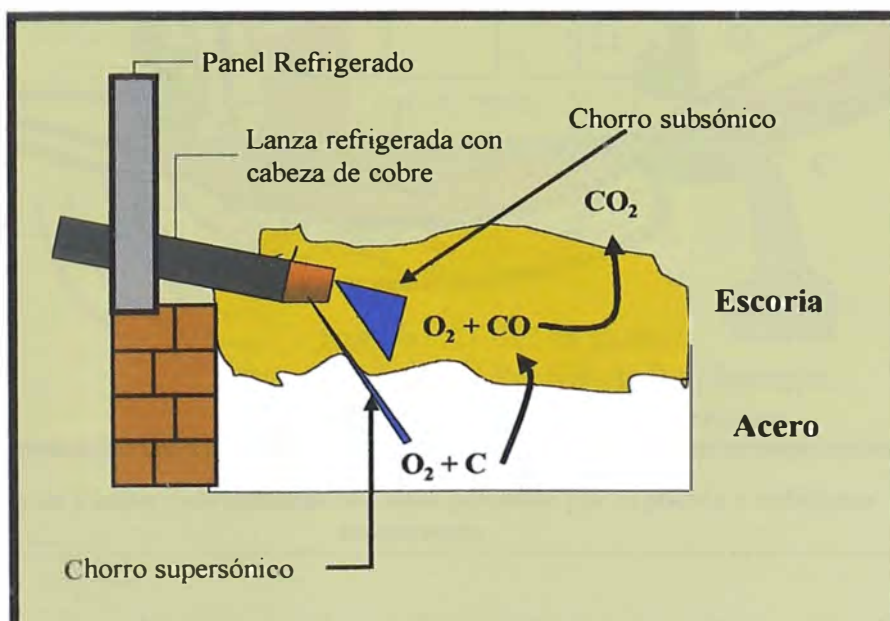


Figura 37 Lanza doble flow con dos toberas una para chorro supersónico y otra para subsónico

dirigida hacia el acero para la descarburación y otra con tobera para chorro subsónico dirigido hacia la escoria lo que posibilita realizar la post combustión.

7.2. Control de la escoria espumosa

La característica de emplear altos porcentajes de hierro esponja en la carga, obliga a trabajar durante gran parte del proceso con baño plano para la alimentación continua, inicialmente el proceso fue convencional donde la fusión se realizaba con la puerta abierta del horno y se conseguía una ligera espumación, lo cual causaba continuos reboses lo que generaba pérdidas en el rendimiento debido al arrastre de partículas metálicas, así mismo la deficiente espumación causaba el deterioro de los paneles refrigerados.

Con las mejoras en el tipo de carbón se consigue mejorar significativamente en la espumación pero no para todo el tiempo de alimentación, es así que aquí juega un papel importante el control del %FeO en la escoria y el control de las adiciones de cal conjuntamente con los pre-reducidos.

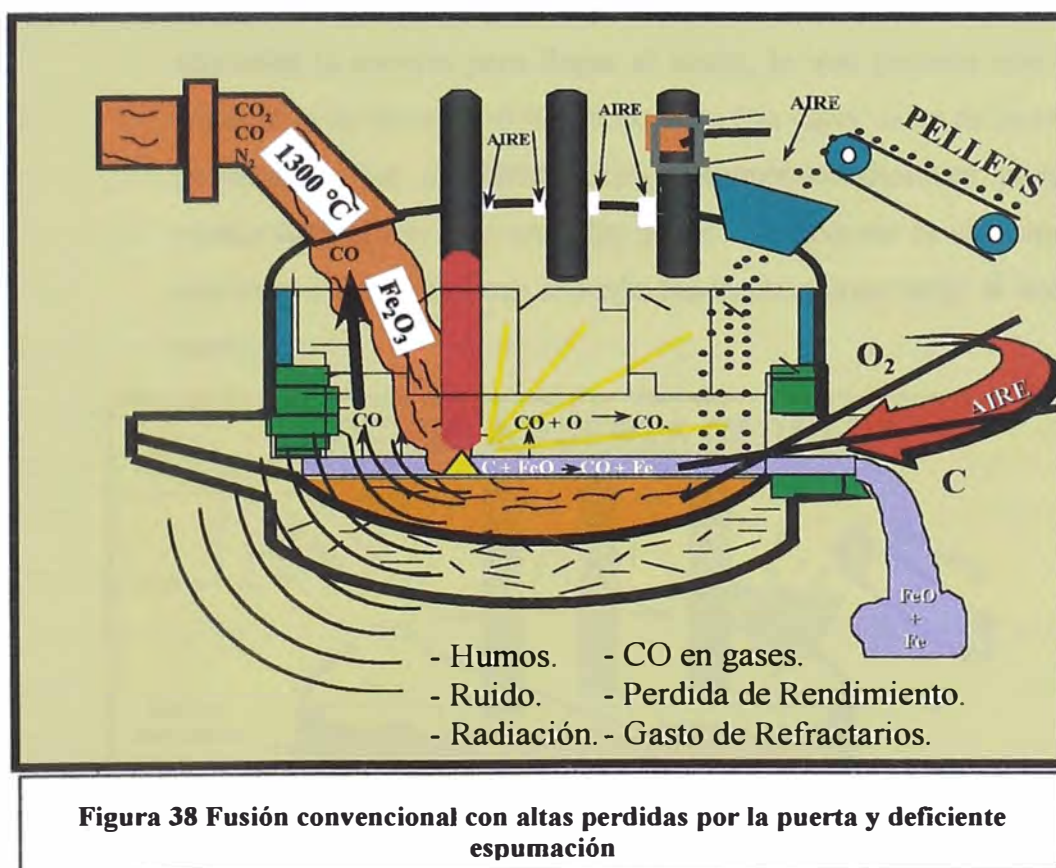


Figura 38 Fusión convencional con altas pérdidas por la puerta y deficiente espumación

Para esto se analiza el comportamiento de la escoria para diversos modelos de alimentación, a través de un balance de materia se trata de realizar la alimentación de materiales de tal forma de mantenernos en la ventana de espumación antes

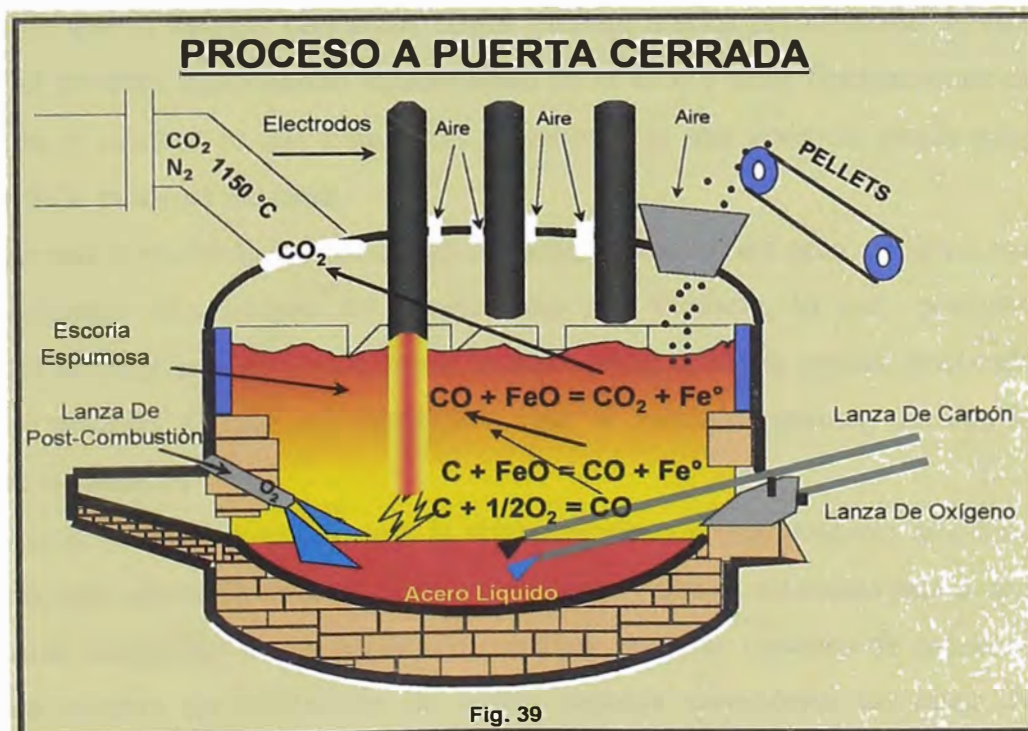
mencionada, en otras palabras se hacen esfuerzos por mantener un control sobre el FeO para la espumación.

Esto nos ha permitido trabajar con la puerta cerrada del horno (proceso patentado) evitando el ingreso de aire (variable no controlada) y de esta manera establecer un proceso más controlado y más uniforme.

7.2.1. Mecanismo de transferencia de calor durante la alimentación continua:

La posibilidad de trabajar con la espuma alta durante la alimentación continua permite:

- I. Poder trabajar con la máxima potencia en el arco eléctrico, lo que posibilita un alto ingreso de energía, reduciendo el tiempo de alimentación.
- II. La escoria retiene parcialmente el calor de los gases entonces como el hierro esponja es alimentado por la bóveda del horno tendrá que atravesar la escoria para llegar al acero, lo que permite que en el transcurso de la caída el hierro esponja frío capte calor de la escoria permitiendo un precalentamiento dándole condiciones para una rápida fusión, hay que recordar que el objetivo en la alimentación continua es que el hierro esponja funda en cuanto caiga al baño de acero.



7.2.2. Mecanismo de control Ambiental

La generación de una escoria espumosa alta durante gran parte del proceso permite que esta sirva como filtro para evitar las grandes emanaciones de polvo, indudablemente esto no evitará que el total de humos sea retenido por la escoria pero su contribución es marcada, pues durante la generación de escoria espumosa alta uno puede apreciar el cambio de coloración de los humos de rojos a blancos, disminuyendo la presencia de partículas en estos. Uno puede comparar el efecto de la situación anterior a la actual a través de un balance por hierro, donde uno encuentra que de tener entre 4 a 5 t de perdidas en los humos hoy a pasado a ser solo de 2t.

Además la post combustión ha posibilitado reducir nuestras emanaciones de monóxido de carbono al ambiente, es importante marcar que de solo un 8% de rateo de post combustión en los gases se ha logrado alcanzar aproximadamente un 32% de rateo de post combustión en la actualidad..

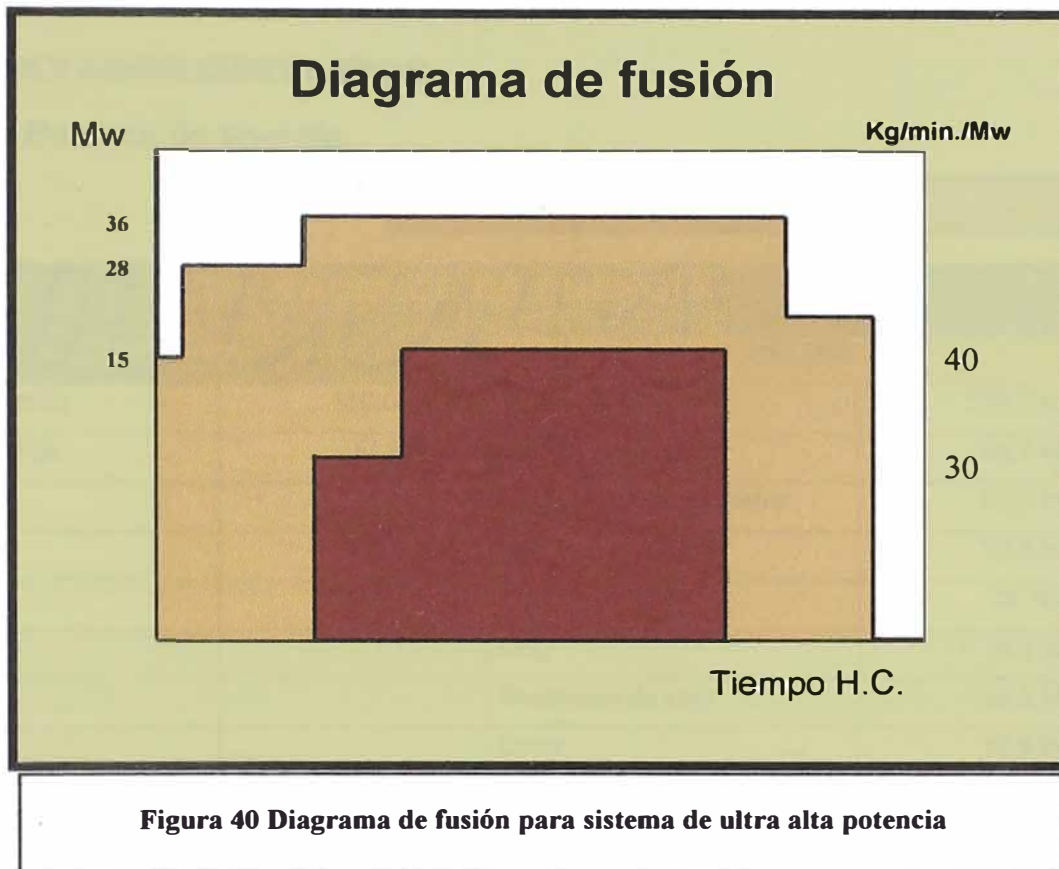
7.3. CONTROL DEL INGRESO DE ENERGÍA

Con el uso del transformador de ultra alta potencia se trato desde un principio el usar desde el inicio del proceso la máxima potencia disponible. Inclusive sé probo usar baja reactancia en el transformador para poder ingresar a la máxima potencia disponible, lamentablemente las características de la chatarra nacional produjeron que al trabajar con arcos largos hubiera mucha perturbación de este durante el proceso, provocando inestabilidad en el arco y altas fluctuaciones de energía en el mismo, lo que traía como consecuencia una potencia media muy distante de la potencia máxima.

También una revisión de los conceptos de la optimización del arco eléctrico nos llevo a plantear el concepto del mayor daño a la chatarra, lo que permitió establecer un programa de fusión donde se utilizaba la potencia optima para cada parte del proceso, la cual no significaba usar la máxima potencia durante la fusión de la chatarra.

La escoria espumosa durante la alimentación continua propicio más bien que se pudiera utilizar la máxima potencia del arco y que se alcanzara rateos que son récords mundiales de alimentación continua, muchos reportes de procesos con altos niveles de utilización de hierro esponja mencionan un rateo de

alimentación de hierro esponja de 30 a 35 kg/min/MW, en planta se ha podido alcanzar rates que están fluctuando de 38 a 43 kg/min/MW.



7.4. CONTROL AMBIENTAL

Como consecuencia de la aplicación de las mejoras los esfuerzos en el control ambiental por ahora están centrados en tres aspectos importantes:

- Por efecto de la utilización de escoria espumosa alta, reducir el contenido óxidos metálicos en los humos, pero indudablemente esto no es suficiente por lo que en el futuro se debe estar instalando un sistema de bag house.
- La utilización adecuada del carbón y oxígeno hace compatible la alta productividad con el cuidado del medio ambiente, por ello que elevar los rates de post combustión hará del proceso más eficiente y de mayor cuidado con el medio ambiente.
- El trabajar con índices de basicidad bajos permite disminuir la generación de escoria la cual se convierte en un desecho sólido que debe ser almacenado. Generar menos escoria hace compatible la alta productividad, la disminución de costos y el cuidado del medio ambiente, se reduce la necesidad de

recursos para manipular y almacenar la escoria generada, así como se tiene mayor disponibilidad de los terrenos de la empresa.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

8.1. Balance de energía

EFICIENCIA ENERGÉTICA= 66,5%

BALANCE DE ENERGÍA			
ENTRADA		SALIDA	
Energía Eléctrica	510,0 kwh/t	Acero líquido	379,7 kwh/t
Energía química	51,6 kwh/t	Escoria líquida	46,1 kwh/t
Hot Heel	37,0 kwh/t	Refrigeración de paneles	65,2 kwh/t
		Perdidas eléctricas	30,8 kwh/t
		CO	28,7kwh/t
		CO ₂	16,8 kwh/t
		Reducción de FeO	18,2 kwh/t
		Otros	18,8 kwh/t
Total	598,6 kwh/t	Total	598,6 kwh/t

De nuestro balance de energía podemos observar que hay puntos que son característicos de nuestro proceso, como la reducción del FeO. Tenemos que tener en cuenta que por el uso de altos porcentajes de hierro esponja en nuestra carga nosotros contamos con un alto grado de FeO, por lo cual gastamos una considerable cantidad de energía para reducirla. Esto también es aprovechamiento de la energía pues de otra manera esta cantidad podría estar en el rubro de perdida.

El rubro de otros, involucra altas perdidas inherentes al horno así como la cantidad de energía que se va en lo gases con el nitrógeno y el vapor de agua.

Para nuestro proceso la eficiencia energética tiene que ser cuantificada entonces como la energía para la producción de acero más la energía de reducción de óxidos entre el total de energía alimentada al horno.

8.2. BALANCE POR HIERRO

BALANCE POR HIERRO					
ENTRADA				SALIDA	
Material	Peso	Fet	En el Horno	Material	
Chatarra	15150	1	15150.00	Acero Liq. (91% Rend.)	39585.00
Hierro esponja Nacional	18450	0.931	17176.95	Escoria	
Hierro esponja importado	0	0.927	0.00	● Como FeO	345.78
Briquetas	9900	0.933	9236.70	● Como Fe°	118.03
Oxido de Hierro	1000	0.714	571.20	Perdidas en Humos	2086.04
Perdigones	0				
Total			42134.85		42134.85

De este balance se observa que el nivel de recuperación de hierro está bordeando 93,9% .

8.3. INDICES ALCANZADOS

INDICE	ANTES	AHORA
Consumo de energía	630 kwh/t	510
Tiempo tap to tap	65 min.	48 –50 min.
Rendimiento metálico	88 – 89%	91%
Ritmo de Producción	35 t/h	50 t/h
Rendimiento de Mn	89%	105%
Ferroaleaciones Si	60%	90%
Costo \$/t de palanquilla	300 \$/t	210\$/t

Los índices alcanzados muestran que la capacidad del proceso esta dentro de estándares internacionales de competitividad y que los logros establecidos en consumo de energía eléctrica y rendimiento metálico nos colocan en una posición de mercado liderazgo.

9. Conclusiones:

- La producción de acero vía hornos eléctricos es económicamente una posibilidad tecnológica desde la perspectiva de la alta productividad.
- La aparición del horno cuchara transforma al horno eléctrico en un reactor de fusión de la carga metálica, siendo la principal función del horno tratar de realizar la fusión de la carga en el menor tiempo posible, con el máximo rendimiento metálico y con altas eficiencias operativas.
- La posibilidad del uso de transformadores de ultra alta potencia permite altos ingresos de energía lo que posibilita la fusión rápida.
- La fusión rápida se logra cuando el arco causa “el mayor daño” a la chatarra, para ello no necesariamente se debe usar la máxima potencia durante todas las etapas del proceso, sino la más adecuada para cada una de ellas, esto permite tener una potencia media bastante cercana a la potencia máxima (criterio importante de procesos de ultra alta potencia).
- Conociendo algunos parámetros básicos de operación del horno eléctrico se puede inferir a través de un cálculo sencillo un valor aproximado del “mayor daño” a la chatarra, luego aplicando procedimientos de prueba y error alrededor de este valor pueden permitir encontrar el valor más óptimo de acuerdo a las características operacionales.
- La necesaria utilización del hierro esponja obliga a tener cuidado sobre tres criterios básicos: grado de metalización, ganga y contenido de carbón.
- Mientras mejor metalizado esté el hierro esponja, mejores rendimientos y menores tiempos de fusión así como menores consumos de energía serán obtenidos en el horno eléctrico.
- Un hierro esponja con mucha ganga generará en el horno eléctrico excesiva cantidad de escoria, esto se traduce en altos consumos de energía, cal, menores rendimientos, etc.
- El carbono en el hierro esponja juega un papel importante, puesto que este al quemarse en el horno contribuye a la generación de calor lo que contribuye en su fusión, reduciendo el consumo de energía eléctrica.
- La utilización de altos porcentajes de hierro esponja permite producir aceros de mayor grado (calidades especiales)

- El empleo de más de 20% de pre-reducido en la carga obliga el uso de alimentación continua. La fusión del hierro esponja es más eficiente cuando este es inmerso en el acero, donde la transferencia de calor para la transformación se da por conducción.
- El uso de la alimentación continua reduce los tiempos de desconexiones en el horno haciendo más eficiente el proceso.
- **El empleo de energía química en el horno eléctrico ha posibilitado reducir significativamente los tiempos de proceso.**
- Las técnicas de utilización de la energía química pasan por **la utilización eficiente del oxígeno**, el cual puede ser inyectado vía lanzas convencionales, lanzas supersónicas, lanzas de post combustión y a través de quemadores.
- Para un aprovechamiento adecuado de la aplicación del oxígeno debe buscarse la mejor forma de transferencia de energía, es así que de las diversas tecnologías existentes se deben seleccionar aquellas que se adapten a la característica del proceso y permitan la máxima transferencia de energía.
- Los momentos de utilización de cada una de estas tecnologías dentro del horno deben ser planeados en función de la máxima transferencia de energía.
- El carbón necesariamente debe acompañar al uso del oxígeno pero esto lo debe hacer en forma balanceada, el uso de balances carbón oxígeno es altamente necesario.
- El empleo de energía química está ligado principalmente a transferencias de energía por convección de gases calientes de abajo hacia arriba.
- El empleo de antracita en las cestas con la chatarra mejora la eficiencia térmica del proceso.
- El desarrollo de prácticas de escoria espumosa ha permitido reducir significativamente el consumo de energía, debido a incrementar la eficiencia del arco de 50% a 80%.
- Dos son las condiciones necesarias para la espumación: la generación de gas y la viscosidad adecuada de la escoria que posibilite el retener las burbujas de gas por el mayor tiempo posible.
- La presencia de partículas sólidas en la escoria permite incrementar la viscosidad efectiva, haciendo la espumación de la escoria más estable.
- Es importante la comprensión del papel de cada uno de los componentes de la escoria.

- El control del %FeO es determinante para lograr adecuadas prácticas de escoria espumosa.
- Se puede lograr excelente compatibilidad entre la escoria espumosa y el refractario, propiciando la formación de escorias sobre los puntos de saturación del MgO y el CaO y el respectivo contenido de FeO.
- El uso de los diagramas de isoestabilidad (diagramas isotérmicos de solubilidad), sirve como referencia para poder establecer composiciones de la escoria.
- El uso de balances y modelos de ecuaciones múltiples pueden ayudarnos a diseñar las adicciones necesarias para llegar a las composiciones objetivo establecidas en las “ventanas de espumación en los diagramas de Isoestabilidad”
- Haber establecido prácticas de escoria espumosa ha permitido que durante la alimentación continua (entiéndase baño plano) se puede alimentar energía a la máxima potencia, propiciando rateos elevados de alimentación. 42kg/min./Mw.
- La practica de optimización de las operaciones, encierra aspectos prácticos para el control sobre el impacto en el medio ambiente, la escoria espumosa reduce la emanación de humos, la post combustión reduce la salida de monóxido y el trabajo con basicidades bajas propicia la generación de menor cantidad de escoria.

10. APENDICE:

10.1. Calculo de las curvas de potencia:

Valores de las curva de potencia

aje fase =	828	% de reactancia =		80	valor de reactancia =	10.84	resistenci	0.451	a	100		
kA	MVA	MVA _r	MW	Perdidas Eléct	Pot. De Arco Xop	reactiva cor	activa corre	cos fi	F	RF	La	
5	7.17	0.81	7.12445303	0.034	7.091	26.83	2.01	6.88	0.99	0.01860297	39.3583185	36.892378
10	14.34	3.25	13.9678093	0.135	13.833	19.64	5.89	13.08	0.97	0.03474089	100.412734	35.9236369
15	21.51	7.32	20.2294516	0.304	19.925	16.36	11.05	18.46	0.94	0.04706766	163.278555	34.3981974
20	28.68	13.01	25.563504	0.541	25.022	14.38	17.25	22.91	0.89	0.0543375	214.556226	32.2532
25	35.85	20.33	29.5358151	0.846	28.690	13.00	24.38	26.29	0.82	0.05543695	242.024861	29.377989
30	43.02	29.27	31.5350753	1.218	30.317	11.98	32.34	28.37	0.73	0.04945554	234.377039	25.5716438
35	50.19	39.84	30.53743	1.657	28.880	11.18	41.07	28.86	0.61	0.03586949	182.204093	20.4206389
40	57.37	52.03	24.1552101	2.165	21.990	10.52	50.51	27.19	0.42	0.01524311	82.225913	12.7711181
41	58.80	54.67	21.6567642	2.274	19.382	10.41	52.48	26.51	0.37	0.01058886	57.7578857	10.6316878
42	60.23	57.37	18.3666867	2.387	15.980	10.29	54.48	25.69	0.30	0.00600622	33.1187341	8.06877953
43	61.67	60.13	13.6886845	2.502	11.187	10.19	56.50	24.70	0.22	0.00188968	10.530758	4.7267361
43.5	62.39	61.54	10.2573568	2.560	7.697	10.13	57.53	24.14	0.16	0.00038212	2.14059777	2.41516126
44	63.10	62.96	4.25105257	2.619	1.632	10.08	58.55	23.52	0.07	0.00043925	2.4733222	-1.46992136
44.06206	63.19	63.14	2.62706473	2.627	0.000	10.08	58.68	23.44	0.04	0.00100475	5.66105437	-2.49983457

10.2- cálculo de los valores de la curva de tiempos de fusión vs. Potencia efectiva

Calculo de la curva de tiempos de fusión vs. Potencia especifica

Cos phi	0.67	0.7	0.77	0.8	0.866
kVA/te	tiempo de fusión				
100	340.3	325.7	296.1	285.0	263.3
200	170.1	162.9	148.1	142.5	131.6
300	113.4	108.6	98.7	95.0	87.8
400	85.1	81.4	74.0	71.3	65.8
500	68.1	65.1	59.2	57.0	52.7
600	56.7	54.3	49.4	47.5	43.9
700	48.6	46.5	42.3	40.7	37.6
800	42.5	40.7	37.0	35.6	32.9
900	37.8	36.2	32.9	31.7	29.3
t = 380kwh/t/(potenc. Especifica * cos fi)					

10.3. Balance de materia:

BALANCE DE MATERIALES (ESCORIA)										
Materiales	Peso	Rend.	CaO		MgO		SiO ₂		FeO	
			%	Wt	%	Wt	%	Wt	%	Wt
Cal Dolomítica	1200	95	63.9	728.46	22.4	255.36	4	45.60		0.00
Cal Calcica	400	95	89.8	341.24		0.00	3.2	12.16		0.00
Chatarra	15150	100		0.00		0.00		?	2	303.00
Hierro esponja Nacional	18450	100	0.8	147.60	0.2	36.90	2.7	498.15	10.4	1918.80
Hierro esponja Importado		100	0.8	0.00	0.12	0.00	1.6	0.00	8.6	0.00
Briquetas	9900	100	0.8	79.20	0.6	59.40	1.17	115.83	9	891.00
Antracita	1600	90		0.00		0.00	4.2	60.48		0.00
Cascarilla	1000	80		0.00		0.00	0.4	3.20	91.8	734.40
Perdigones				0.00		0.00		0.00		0.00
Refractario(desgaste)	36.45		5	1.82	93	33.90	2	0.73		
				1298.32		385.56		736.15		3847.20

Basicidad Binaria 1.31213

Composición química escoria al fin de Fusión	
CaO	33.00
MgO	9.80
SiO ₂	25.15
FeO	11.30
Fe°	3.00

RESULTADOS OBTENIDOS	
Peso de Escoria generada una colada	3934.31
Desgaste de refractario	36.45
Silice en la chatarra	253.33
FeO que se reduce	3402.62

BALANCE OXIGENO CARBONO

Materiales	Cantidad	Rendim	Ley	C (Kg)	O (Nm3)
Antracita(kg)	1600.00	90	88.00	1267.20	
Oxigeno(Nm3)	1310.40	100	99.00		1297.30
Consumo de Electrodo	1.60	kg/tAL		63.34	
C en el HE importado	0.00	100	2.10	0.00	
C en Briqueta	9900.00	100	1.35	133.65	
Chatarra	15150.00	100	0.20	30.30	-26.35
defosforación	16.04				-14.49
Acero Liquido	39585.00	100	0.10	-39.59	
FeO(kg)	3402.62	100	0.16		529.30
				1454.901	1785.76

RESULTADOS OBTENIDOS

Oxigeno para combustion	1357.91
Oxigeno para Post combustion	427.85
CO producido	1860.12
CO ₂ producido	855.70
Ratio de Post Combustion	31.51

En la chatarra			
	Si	Mn	Al
%	0.1	0.45	0.02
Wt	15.15	60.6	3.03
O ₂	12.12	12.34	1.89

BALANCE POR HIERRO

ENTRADA				SALIDA	
Material	Peso	Fet	En el Horno	Material	
Chatarra	15150	1	15150.00	Acero Liq. (91% Rend.)	39585.00
Hierro esponja Nacional	18450	0.931	17176.95	Escoria	
Hierro esponja importado	0	0.927	0.00	● Como FeO	345.78
Briquetas	9900	0.933	9236.70	● Como Fe°	118.03
Cascarilla	1000	0.714	571.20	Perdidas en Humos	2086.04
Perdigones	0				
Total			42134.85		42134.85

10.4. Entalpias de reacción para temperatura de proceso

Los resultados están en kwh por kilo de carbono.

ENERGÍA QUÍMICA		(EMPLEO DE OXÍGENO)		TEMP. DE PROCESO	1600.000
					1873.000
				TEMP. DE REFERENCIA	25.000
					298.000
1).- $C + 1/2 O_2 = CO$					
ENTRADA		SALIDA			
Hc	0.000	Hco(298 a 1853)	12336.526		
0.5 Ho2	0.000	Q	14083.474		
H°298CO	26420.000				
	26420.000		26420.000		
				Calor cedido Kwh	1.365
					44.763
2).- $FeO + C = Fe + CO$					
ENTRADA		SALIDA			
HFeO	0.000	Hco(298 a 1853)	12336.526		
Hc	0.000	HFe°(298 a 1853)	18550.000		
H°298CO2	26420.000	H°298FeO	63700.000		
		Q	-68166.526		
	26420.000		26420.000		
				Calor necesario Kwh	-6.605
					-17.729
3).- $FeO + CO = Fe + CO_2$					
ENTRADA		SALIDA			
HFeO	0.000	HFe°(298 a 1853)	18550.000		
Hco(298-1853)	12336.526	Hco2(298 a 1853)	19731.845		
H°298CO2	94050.000	H°298FeO	63700.000		
		H°298CO	26420.000		
		Q	-22015.319		
	106386.526		106386.526		
				Calor necesario Kwh	-2.133
					-142.686
1 CO + 1/2 O2 = CO2					
ENTRADA		SALIDA			
Hco(298-1853)	12336.526	Hco(298 a 1853)	19731.845		
0.5 Ho2	0.000	H°298CO	26420.000		
H°298CO2	94050.000	Q	60234.681		
	106386.526		106386.526		
				Calor cedido Kwh	5.837
					191.450

10.4. Calores de reacción calculados para Al, Si y Mn a 1600°C

Reacción	ΔH 1600°C
$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	7,33 kwh/kg de Si
$2\text{Al} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	7.62 kwh/kg de Al
$\text{Mn} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{MnO}$	2.04 kwh/kg de Mn

10.5. Cálculo de gastos de energía

- **Transformación de la chatarra**

Fusión de chatarra	340 kwh/t
Afino	23,3 kwh/t
Total	363,3 kwh/t

- **Transformación del Hierro esponja**

Se considera al hierro esponja como hierro metálico

$\Delta H = 10T - 180$ (T en °K, kcal/mol-kg)	389 kwh/t
---	-----------

- **Transformación de la carga**

Se considera una carga con 63% de pre-reducido **379.7 kwh/t**

- **Energía de Escoria**

Se asume que la escoria requiere 1,3 veces la energía de transformación de la chatarra.

$4t * 363,3 \text{ kwh/t} * 1,3$	46.08 kwh/t
----------------------------------	--------------------

- **Energía de reducción del FeO con C**

Del balance de carbono se tiene que 110 kg de C para reducir la escoria entonces:

$6,61 \text{ kwh/kg de C} * 110,05\text{kg} / 40t \text{ acero}$	18,19 kwh/t
--	--------------------

- **Energía de refrigeración de paneles**

$$E = \frac{Q * C_p * \Delta T * t}{0,86 * 60}$$

donde: Q = caudal de agua m³/h

C_p = Calor específico del agua

ΔT = variación de Temperatura de entrada y salida

t = tiempo de colada en min.

	Caudal	ΔT	E
Paneles del castillo	240 m ³ /h	7 °C	39,7 kwh/t
Paneles de bóveda	180 m ³ /h	6 °C	25,53 kwh/t
		TOTAL	65,23 kwh/t

- **Pérdidas eléctricas**

Diversos estudios señalan que esta es aproximadamente el 5% del consumo de energía.

25,5 kwh/t

- **Perdidas en los gases**

Vol. de gases	Formula (kcal/mol-kg)	Kwh/t
1860.12 Nm ³ de CO	6,79*t+0,49*10 ⁻³ *t ² +0,11*10 ⁵ *t ⁻¹ - 2106	28,65
855.70 Nm ³ de CO ₂	10,55*t+1,08*10 ⁻³ *t ² +2,04*10 ⁵ *t ⁻¹ - 3926	16,76
	Total	39,83 kwh/t

10.6. Cálculo del desgaste de refractario en función composición de óxidos en la escoria y la carga.

Para utilizar esta formula se tienen resultados de análisis de escoria lo que en función de las adiciones permite calcular el desgaste refractario

$$W = \frac{[(\%CaO)_E \sum(x_i(\%CaO)_i) - (\%MgO)_E \sum(x_i(\%CaO)_i)]}{[(\%CaO)_R(\%MgO)_E - (\%MgO)_R(\%CaO)_E]}$$

Donde:

W = Desgaste refractario

X_i = Elemento de carga al horno (Chatarra, hierro esponja, antracita, oxido de hierro, cal, etc.

(%CaO)_E = %de óxido de calcio en la escoria

(%CaO)_R = %de óxido de calcio en el refractario

(%MgO)_E = %de óxido de Magnesio en la escoria

(%MgO)_R = %de óxido de Magnesio en el refractario

10.7.Cálculo de las adiciones a realizar de cal cálcica y cal dolomítica en función a porcentajes objetivo de CaO y MgO en la escoria.

Estas formulas fueron deducidas y aplicadas en las hojas de cálculos para los balances.

$$\begin{bmatrix} (\%CaO)_D & (\%CaO)_C & -(\%CaO)_E \\ (\%MgO)_D & (\%MgO)_C & -(\%MgO)_E \\ (\%SiO_2)_D & (\%SiO_2)_C & -(\%SiO_2)_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ C \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum X_i(\%CaO)_i \\ \sum X_i(\%MgO)_i \\ \sum X_i(\%SiO_2)_i \end{bmatrix}$$

Donde:

D = Peso de cal dolomítica

C = Peso de cal cálcica

E = Peso de Escoria

(%)_{D ó C ó E} = Porcentaje del óxido entre paréntesis en el material indicado.

X_i = Elemento de carga al horno (Chatarra, hierro esponja, antracita, oxido de hierro, cal, refractario, etc.

BIBLIOGRAFIA

AUTOR	TITULO	EDITORIAL
Clarence E. Sims	Electric furnace steelmaking Vol. II Theory and fundamentals	Metallurgical society of AIME
Lauro José De Sales Chevrant- Fernando José Bosi Filho	Aciaría Eléctrica	Aqssociacao brasileira de metais Sao Paulo 1989
Reinhard Schuhmann Jr.	Ingeniería metalúrgica	
Julio Astigarraga Urquiza	Hornos de arco para fusión de acero	Ente vasco de energía Mc Graw Hill 1995
Terkel Rosenqvist	Fundamentos de metalurgia extractiva	Centro de ayuda tecnica AID 1987
G. Bodsworth and H.B. Bell	Physical chemistry of iron and steel manufacture	Longman group limited 1963
Gerardo Waelkens Luis Algarra, Emilio Ribera, Marcelo Bilotti	Fisicoquímica metalúrgica tomos III y IV	Instituto argentino de siderurgia
Franz sammat Sara Hormby	Application and use of DRI/HBI in EAF Steelmaking	12vo. Seminario IAS Buenos aires 1999
Gerson Rusky Sandro raposo, Paulo Hopperdizal	Ijecaio de oxigenio para efetiva pos-combustao em forno elétrico a Arco	11vo seminario IAS Buenos aires 1997
Massanori Iwase	Curso de aceración	Curso IAS Buenos aires 1999
Michael Grant	Principles and Strategy of EAF Post-combustion	2000 electric furnace proceedings
Stewart jepson	Chemical energy in the EAF: Benefits and limitations	2000 electric furnace proceedings
P Hopperdizel E. Salgado	Resultados de operación de sistema de lanceo y post combustión	12vo seminario IAS Buenos aires 1999
Ph. Destannes J.C. Grosjean	Optimizacao do emprego do carbono no FEA	Siderurgia Mendes junior S.A. 1990
J. Uyen M. E. Moreau S.	Conservación de la energía en procesos de hornos eléctricos planta Aceros Arequipa S.A.	Aceros Arequipa 1997
A.T. Peters	Producción siderúrgica	Editorial LIMUSA 1987
Manfred Jellinghaus	Electric steelmaking	Sthaleisen 1989
J Fruehan and Kimihiya	Slag foaming in electric furnace steelmaking	1987 Electric furnace proceedings
Eugene B. Pretotius Robert C. Carlisle	Foamy Slag funda,mentals and their application to EAF Steelmaking	1998 EAF conference Baker Refractories
Rubén Lule, F. Lopez ,	Establamiento deescoria espumosa en imexa	Encuentro de siderurgicos san luis de Potosi, Mexico 1994
Heinrich Otmar	El horno eléctrico de Ultra alta	Revista ILAFA Marzo 1974

AUTOR	TITULO	EDITORIAL
	potencia	
Hiroshi Sawabe	Arcos largo	UCAR CARBON MEXICANA
Hiroshi Sawabe	Comnceptos y formulas aplicadas a hornos eléctricos de arco	UCAR CARBON MEXICANA
McAllister Jr	Establish a good Foamy slag practice	Iron and Steel Magazine Febrero 1997
M Zamalloa, A Warczok and T. Utigard	Slag foaming during gas injection	1991 Electric furnace conference proceedings