

Producción de arrabio en los países de la Unión Europea^(*)

L. García^(*), A. Cores^(**), A. Formoso^(**) y A. Babich^(***)

Resumen El aumento continuo de la competitividad en la industria siderúrgica hace necesaria la optimización de los recursos y materias primas empleados. Este hecho afecta de igual forma a la fabricación de arrabio en horno alto y a su principal combustible, el coque metalúrgico. De ahí la gran importancia que adquiere el desarrollo de técnicas que faciliten mejoras en los índices de operación del horno alto. En este trabajo se analizan los últimos desarrollos aplicados al proceso del horno alto en los países de la Unión Europea.

Palabras clave: **Horno alto. Consumo de coque. Productividad. Inyección de combustible por toberas. Inyección de carbón.**

Pig iron production in the countries of European Community

Abstract The incessant increase of the competitiveness of the metallurgical industry implies the necessity of the optimization of the resources and raw materials used. This affects in the same way the ironmaking in blast furnace and its principal fuel, metallurgical coke. It is from here the importance of the development of the techniques which facilitate improvements in the operation parameters in the blast furnace. This article is dedicated to the latest developments applied on blast furnace process in the countries of European Community.

Keywords: **Blast furnace. Coke consumption. Productivity. Fuels injection by tuyeres. Coal injection.**

1. INTRODUCCIÓN

La etapa moderna de desarrollo de la industria siderúrgica está caracterizada, fundamentalmente, por la utilización de tecnologías de vanguardia, teniendo en cuenta la economía de recursos naturales y la protección del medio ambiente. La fabricación de arrabio en el horno alto no es ajena a esta tendencia y sus operadores, para competir con éxito en el futuro, deberán lograr los objetivos siguientes:

- a) Incremento de la eficiencia del horno alto, que se logra con:
- elevada productividad específica,

- reducción de la relación coque/combustible,
 - operación estable,
 - elevado aprovechamiento.
- b) Calidad constante del arrabio, como resultado de:
- la estabilidad en los procesos de reducción y fusión,
 - la buena permeabilidad del crisol.
- c) Prolongación del tiempo de campaña del horno, como resultado de:
- alargar la vida útil de los refractarios en el crisol y en el vientre,
 - desprendimiento mínimo de materiales de carga y de pegotes de las paredes del horno,
 - descenso regular de la carga.
- d) Reducir el costo de la carga mediante:
- uso de materiales féreos de bajo coste y alta calidad,
 - reducción de los costos de coque manteniendo su calidad y consistencia,

(*) Trabajo recibido el día 28 de febrero de 1997.

(*) Unión de Empresas de Recuperación de Materias Primas. 1ª Avda., 1604. Miramar. 11300 Ciudad de La Habana (Cuba).

(**) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CSIC). Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040-Madrid (España).

(***) Universidad Estatal Tecnológica de Donetsk. Avda. Arteoma, 58. 340066 Donetsk (Ucrania).

- disminución del consumo de coque mediante la inyección por toberas de combustibles auxiliares, en particular empleando caudales elevados de inyección de carbón (pulverizado o granular).

En este trabajo se realiza un análisis de la producción de arrabio en la Unión Europea (UE) en los últimos años.

2. PRODUCCIÓN DE ARRABIO EN HORNO ALTO

La producción mundial de arrabio en 1996 fue de $521,2 \times 10^6$ t, de la que aproximadamente el 20 % se fabrica en los países de la UE. En la tabla I se ofrecen los datos de la producción de arrabio en la UE y en otras zonas geográficas (1 y 2). A escala mundial, se destaca el paulatino crecimiento de la producción en los países asiáticos, así como el brusco descenso en Europa Oriental como consecuencia de las transformaciones políticas y económicas ocurridas en la antigua URSS y en el denominado bloque socialista.

En Europa, como en el resto del mundo, en el próximo decenio el acero seguirá siendo el principal material que se empleará en la construcción de maquinaria y equipos, así como en la propia industria de la construcción y, por consiguiente, la demanda de productos siderúrgicos tenderá a crecer (3). La producción de acero en la UE durante 1995 fue de $155,8 \times 10^6$ t, de la que el 65,1 % se obtiene mediante el procedimiento de horno alto-convertidor.

Por otra parte, la proporción de arrabio en la fabricación de acero en convertidor varía desde un 65 % en Luxemburgo hasta el 86 % en Francia y Finlandia. El promedio para la UE se mantiene en el 80 %, lo que está relacionado con la escasez de chatarra de acero y con las estrictas limitaciones de muchas calidades de acero según el contenido de elementos de aleación.

La industria siderúrgica es una de las mayores consumidoras de energía; en Japón, por ejemplo, esta industria consume el 13-15 % de toda la energía del país (4).

En la tabla II se ofrece el balance energético promedio de la industria siderúrgica en 1994 para los siguientes países de la UE: Alemania, Bélgica, España, Francia, Holanda y Reino Unido. En las

TABLA I.- Producción de arrabio, 10^6 t

TABLE I.- Pig iron production, 10^6 t

País, zona	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Alemania	29,8	27,4	27,8	26,3	25,8	28,5	30,0	27,7
Francia	14,6	13,7	13,4	12,8	11,8	12,9	13,2	12,4
Reino Unido	12,6	12,2	11,9	11,9	11,5	12,0	12,2	12,8
Italia	11,4	10,5	10,5	8,7	9,5	9,5	11,7	10,3
Bélgica	7,4	8,3	8,3	8,2	8,1	9,0	9,3	8,7
Holanda	5,2	4,7	4,7	4,9	5,5	5,5	5,5	5,5
España	5,6	5,6	5,6	5,1	5,3	5,5	5,1	4,1
Austria	3,7	3,4	3,5	3,1	3,1	3,4	3,9	3,4
Suecia	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	3,1	3,0	3,1
Finlandia	2,3	2,3	2,3	2,5	2,5	2,6	2,2	2,5
Luxemburgo	2,7	2,6	2,5	2,3	2,4	1,9	0,9	0,8
Portugal	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Total UE	98,6	93,7	93,6	89,0	88,8	94,3	97,5	91,8
Turquía	5,5	5,4	5,2	5,1	4,9	4,6	4,4	5,3
Otros E. Occ.	2,5	1,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,7
Europa Occ.	106,6	100,5	99,1	94,4	94,9	99,1	102,2	97,8
Europa Oriental	146,4	141,3	114,2	106,2	90,9	80,5	87,5	85,1
Norte América	65,9	65,0	59,4	63,4	56,8	57,5	59,4	58,0
Sur América	27,8	28,6	30,0	30,7	29,8	31,5	32,2	31,8
Asia	179,1	188,7	200,0	204,0	211,7	223,2	234,7	236,1
África	11,1	11,6	12,6	11,7	8,7	9,4	8,6	8,4
Oceanía	6,3	6,7	6,2	7,0	7,4	7,5	8,1	8,0
Mundial	543,0	542,4	521,5	517,4	500,2	508,7	529,5	521,2

TABLA II.– Balance energético en la industria siderúrgica (por t de acero líquido)
 TABLE II.– Energy balance in the siderurgical industry (per t of crude steel)

Sector de consumo		Preparación del mineral	Fabricación de coque	Fabricación de arrabio	Elaboración de acero líquido	Laminado y acabado	Otros	TOTAL	%
Carbón crudo	GJ	0,2024	10,7092	2,1258	0,0156		0,0191	13,0721	35,96
Coque	“	1,0274	0,0218	8,6121	0,0236	0,0001	0,0058	9,6908	26,67
Otros combust. sólidos	“	0,0497	0,3946	0,0060	0,0061		0,0457	0,5021	1,38
Gas de batería	“	0,0955	0,4928	0,3300	0,0444	0,4460	0,3156	1,7243	4,74
Gas de horno alto	“	0,0327	0,2392	1,0871	0,0007	0,0924	1,0292	2,4813	6,83
Gas de LD	“	0,0008	0,0232	0,0301	0,0008	0,0509	0,0617	0,1675	0,46
Gas natural	“	0,0374	0,0010	0,0865	0,1678	1,1461	0,3088	1,7476	4,81
Otros combus. gaseosos	“			0,0009	0,0093	0,0314	0,0069	0,0485	0,13
Fuel oil	“		0,0023	0,5533	0,0029	0,1160	0,1241	0,7986	2,20
Otros combus. líquidos	“		0,0057	0,0006	0,0023	0,0012	0,0093	0,0191	0,05
Electricidad	“	0,3181	0,1122	0,3237	1,5647	1,5263	0,4354	4,2804	11,78
Oxígeno	“			0,1256	0,3063	0,0044	0,0009	0,4372	1,20
Vapor	“	0,0021	0,0959	0,3133	0,0486	0,1404	0,7781	1,3784	3,79
Producción bruta	GJ	1,7661	12,0979	13,5950	2,1931	3,5552	3,1346	36,3419	100,00
Coque producido	GJ		7,8895					7,8895	50,16
Gas CO recuperado	“		1,7048					1,7048	10,84
Gas horno alto recup.	“			3,0738				3,0738	19,55
Gas de LD recobrado	“				0,2849			0,2849	1,81
Recuper. de alquit. y otros	“		0,3967	0,0057				0,4024	2,56
Electricidad producida	“			0,0560			0,8752	0,9312	5,92
Oxígeno producido	“						0,0263	0,0263	0,17
Vapor	“	0,0346	0,0156	0,0029	0,0349	0,0010	1,3242	1,4132	8,99
Total recobrado	GJ	0,0346	10,0066	3,1384	0,3198	0,0010	2,2257	15,7261	100,00
Energía neta empleada	GJ	1,7315	2,0913	10,4566	1,8733	3,5542	0,9089	20,6158	
	%	8,40	10,14	50,72	9,09	17,24	4,41	100,00	

etapas principales del proceso siderúrgico se destaca que la fabricación de arrabio es la mayor consumidora de combustible (más del 50 %); por otra parte, en el horno alto el coque es el combustible más utilizado, lo que ejercerá una influencia determinante en los costos de fabricación de las posteriores etapas de procesamiento. Se estima que entre un 30-35 % del coste del arrabio corresponde al consumo de combustible; por tanto, lograr disminuir el consumo de coque ha sido, desde siempre, una de las principales tareas de los operadores e investigadores (5).

El análisis de los índices técnico-económicos de los hornos altos de la UE confirma la elevada eficiencia de operación (6). En la tabla III se incluyen datos promediados por país del funcionamiento de los hornos de la UE. El consumo de coque, en la mayoría de los países, es de 350-400 kg/ta, con algunas excepciones de países con tasas que superan los 400 kg/ta. Se destaca que en Italia, desde 1989 a 1995, disminuyó el consumo de coque en 86 kg/ta, y en Francia y en Alemania en 50 kg/ta. Durante 1995 los menores consumos de coque se consiguieron en los hornos siguientes:

HA-A de HKM, en Huckingen
 (Alemania) 321 kg/ta

HA-1 de SOLLAC, en Fos
 (Francia) 325 kg/ta
 HA-2 de SOLLAC, en Fos
 (Francia) 325 kg/ta
 HA-A de SIDMAR, en Gante
 (Bélgica) 328 kg/ta
 HA-B de HKM, en Huckingen
 (Alemania) 330 kg/ta

La productividad de los hornos ha experimentado una mejora en los últimos seis años. En Holanda aumenta desde 2,15 hasta 2,67 t/m³·24 h (24 %), también Italia y Suecia alcanzan productividades superiores a 2,6 t/m³·24 h con incrementos en este período del 16 y 13 %, respectivamente. Los hornos con mejores productividades durante 1995 han sido:

HA-2 de Raahe Steel, en Rautaruukki
 (Finlandia) 3,05 t/m³·24 h
 HA-2 de SSAB, en Luleå (Suecia) 3,05 t/m³·24 h
 HA-A de HKM, en Huckingen
 (Alemania) 2,92 t/m³·24 h
 HA-6 de Hoogovens, en IJmuiden
 (Holanda) 2,92 t/m³·24 h

TABLA III.- Índices medios de operación de los hornos altos en 1995
 TABLE III.- Mean parameters operation of blast furnaces in 1995

	Unidad	A	F	RU	I	B	H	E	Au	S	Fi	L	P
Hornos en operación	U	20	11	8	5	8	2	6	5	4	3	1	1
Diámetro crisol	m	10,2	9,2	10,0	10,8	9,1	12,4	8,8	8,4	7,6	7,35	9,2	6,5
Volumen útil	m ³	1988	1716	1941	2196	1570	3059	1483	1392	971	821	1790	670
Productividad	t/m ³ ·24 h	2,13	2,18	2,36	2,63	2,25	2,67	1,90	1,78	2,60	2,85	1,64	1,88
Carga férrea:													
-miner. y otras dicion.	%	8,0	12,1	23,0	14,3	5,6	2,7	5,4	13,4	0	0	1,7	0
-sinter	%	65,0	87,6	69,6	78,9	63,6	47,9	68,4	58,5	15,7	87,2	98,3	68,3
-pelets	%	27,0	0,3	7,4	6,8	30,8	49,4	26,2	28,1	84,3	12,8	0	31,7
Consumo de coque	kg/ta	359	351	394	353	382	357	473	426	383	375	462	500
Caudal de fuel oil	kg/ta	51	4	54	15	2	0	26	49	0	74	59	0
Caudal CP	kg/ta	63	126	43	130	123	141	0	0	80	0	0	0
Temperatura viento	°C	1168	1184	1084	1177	1109	1195	1088	1097	1079	1070	1128	918
Oxígeno en el viento	%	22,7	22,1	24,3	24,1	24,1	23,5	21,2	21,1	22,9	24,2	23,0	21,0
Temperatura llama	°C	2161	2147	2110	2128	2223	2164	2191	2136	2185	2242	ND	2182
Conten. en el arrabio:													
-silicio	%	0,51	0,52	0,55	0,62	0,58	0,42	0,64	0,75	0,49	0,47	0,50	0,52
-azufre	%	0,052	0,036	0,025	0,022	0,028	0,036	0,036	0,049	0,057	0,061	0,021	0,068
Temperatura del arrabio	°C	1467	1476	1496	1495	1475	1511	1490	1444	1470	1467	1491	1444
Volumen de escoria	kg/ta	267	297	288	303	271	223	301	304	153	203	509	258

A = Alemania; F = Francia; RU = Reino Unido; I = Italia; B = Bélgica; H = Holanda; E = España; Au = Austria; S = Suecia; Fi = Finlandia; L = Luxemburgo; P = Portugal

HA-A de SIDMAR, en Gante (Bélgica) 2,84 t/m³·24 h

En las tablas IV y V se muestran las características de algunos hornos que se mencionan en este trabajo. En los hornos se realizan inyecciones de car-

bón pulverizado o de *fuel oil* con el objetivo principal de reducir el consumo de coque por tonelada de arrabio producido.

Estos éxitos notables se han alcanzado debido a una serie de medidas, entre las que destacan: uso de materias primas férreas y coque metalúrgico de alta

TABLA IV.- Índices de operación de hornos altos con inyección de carbón en 1995
 TABLE IV.- Parameters operation of blast furnaces with coal injection in 1995

Índices	Thyssen Schwelgern HA-1 Alemania	Krupp Hoesch Westfalenhütte HA-7 Alemania	Sollac Dunkerque HA-4 Francia	Hoogovens Ijmuiden HA-6 Holanda	Ilva Taranto HA-2 Italia	SIDMAR Gent HA-A Bélgica	British Steel Scunthorpe Q. Victoria, R.U.
Diám. de crisol, m	13,6	10,2	14,0	11,0	10,34	10,0	9,0
Volumen útil, m ³	3.796	1.875	3.648	2.328	1.971	1.776	1.537
Product., t/m ³ · 24 h	2,18	2,13	2,40	2,92	2,70	2,84	2,37
Carga férrea, %:							
- miner. de hierro y otras adiciones	9,8	14,6	23,8	2,30	16,5	0,5	16,3
- sinter	71,0	59,3	76,2	48,4	76,9	92,5	72,7
- pelets	19,2	26,1	0	49,3	6,6	7,0	11,0
Cons. de coque, kg/ta	370	361	333	339	332	328	352
Carbón inyect., kg/ta	133	150	152	161	170	164	146
Volátil. en carbón, %	24,4	29,9	14,4	38,8	27,0	29,9	18,0
Oxígeno en viento, %	23,03	24,44	23,16	25,9	25,2	24,0	26,0
Temp. del viento, °C	1.187	1.159	1.192	1.140	1.196	1.191	1.121
Temp. de llama, °C	2.169	ND	2.129	2.109	2.133	2.239	2.121
Cont. en arrabio, %:							
- silicio	0,42	0,66	0,34	0,41	0,70	0,37	0,62
- azufre	0,033	0,067	0,029	0,035	0,021	0,021	0,024
Temp. del arrabio, °C	1.492	1.489	1.486	1.505	1.499	1.493	1.481
Vol. de escoria, kg/ta	289	266	293	224	299	279	278

TABLA V.— Índices de operación de hornos altos con inyección de *fuel oil* en 1995
 TABLE V.— Parameters operation of blast furnaces with oil injection in 1995

Índices	HKM Huckingen, HA-A, Alemania	HKM Huckingen, HA-B, Alemania	Sthalwerke Bremen, HA-2, Alemania	Sthalwerke Bremen, HA-3, Alemania	VA Linz, HA-A, Austria	Raahe Steel Rautarukki, HA-2, Finlandia	British Steel Llanwern, HA-3, Reino Unido
Diám. de crisol, m	10,3	10,3	12,0	9,2	10,5	7,2	11,20
Volumen útil, m ³	2.081	2.226	2.776	1.424	2.454	836	2.289
Product., t/m ³ · 24 h	2,92	2,30	2,15	2,22	2,22	3,44	2,53
Carga férrea, %:							
– miner. de hierro y otras adiciones	6,6	8,1	4,3	7,7	21,2	0	19,3
– sinter	67,2	67,0	47,6	6,3	45,0	65,9	79,0
– pelets	26,2	24,9	49,1	86,0	33,8	34,1	1,7
Cons. de coque, kg/ta	321	330	334	337	411	372	390
Caud. <i>fuel oil</i> , kg/ta	117	108	123	122	56	76	91
Oxígeno en viento, %	25,15	24,42	22,45	21,12	21,20	24,50	25,45
Temp. del viento, °C	1.249	1.221	1.193	1.130	1.181	1.097	1.025
Temp. de llama, °C	ND	ND	2.011	1.956	2.140	2.260	2.066
Cont. en arrabio, %:							
– silicio	0,50	0,66	0,40	0,52	0,50	0,46	0,62
– azufre	0,047	0,044	0,065	0,069	0,040	0,052	0,018
Temp. del arrabio, °C	1.498	1.482	1.452	1.451	1.466	1.471	1.524
Vol. de escoria, kg/ta	254	248	242	179	304	203	318

calidad, introducción eficaz y rápida de la inyección de carbón pulverizado (ICP), aumento de la temperatura del viento, optimización de los regímenes de escoria y gasodinámico del proceso, control automático, etc. Algunas de estas medidas serán analizadas en este trabajo, otras han sido tratadas en (7 y 8).

3. CARGA DEL HORNO ALTO

3.1. Materiales férreos

En la figura 1 se muestra la evolución que han tenido los componentes férreos de la carga en los hornos altos de la UE durante el período 1980-1995. La carga está compuesta básicamente por los aglomerados, sinter y pelets. La proporción de mineral de hierro clasificado (en trozos) y otras adiciones de hierro en la carga de los hornos es, como regla, del 5-15 % y en el Reino Unido del 20-24 %. Solamente en el HA-1 de British Steel, en Redcar, es superior al 30 % (545 kg/ta). En países como Holanda, Finlandia, Luxemburgo y Suecia, así como en algunos hornos de otros países, en la carga no se utiliza prácticamente mineral de hierro.

El sinter es el principal componente de la carga del horno. En la tabla VI se incluyen datos de la composición química y de la producción de sinter en la UE en 1995. Debido a condicionamientos económicos y ecológicos, se ha procedido al cierre de algunas fábricas de sinterización, lo que supone un

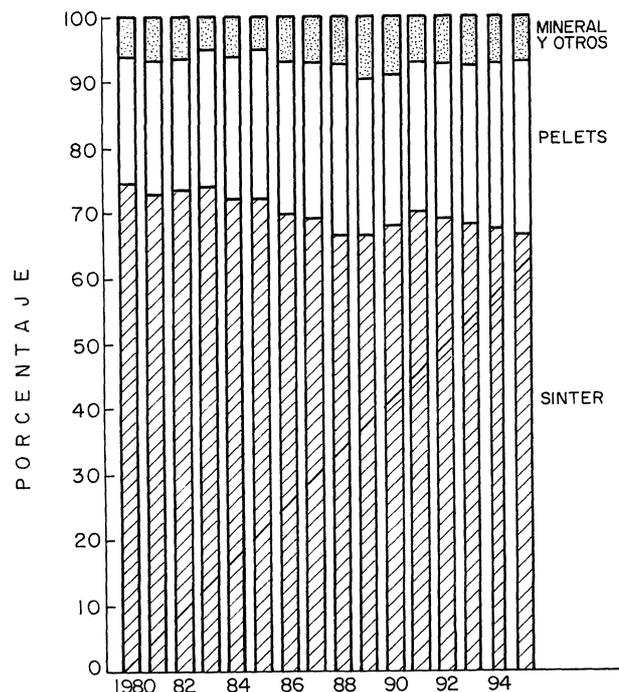


FIG. 1.— Proporción de los componentes férreos en la carga de los hornos altos de la UE.

FIG. 1.— Proportion of the iron components in the burden of the EU blast furnaces.

incremento de la proporción de pelets en la carga del horno.

Las mayores proporciones de pelets en la carga se utilizan en Suecia (81 %) y Holanda (49 %),

TABLA VI.— Datos de operación de fábricas de sinter en 1995
 TABLE VI.— Operating date of sinter plant in 1995

País	Composición química, %								Producción × 10 ⁶ t
	Fe _t	Fe ⁺⁺	Grado oxid.	SiO ₂	CaO	IB	MgO	Al ₂ O ₃	
Austria	49,3	4,5	97,0	7,3	15,4	2,1	3,3	1,4	2,16
Bélgica	59,1	3,9	97,8	5,2	7,4	1,4	1,8	1,3	5,70
Finlandia	62,0	9,0	94,9	3,7	5,8	1,6	1,8	0,6	2,23
Francia	57,7	4,7	97,3	5,3	9,4	1,8	1,6	1,2	6,65
Alemania	57,8	5,2	97,0	5,3	9,6	1,8	1,8	1,1	10,9
Italia	56,4	4,7	97,2	5,8	9,9	1,7	1,7	1,3	11,9
Luxemburgo	51,0	6,0	95,9	8,5	11,9	1,4	1,3	2,9	1,99
Holanda	57,6	13,0	92,5	4,5	10,5	2,4	1,5	1,4	4,25
Portugal	58,1	6,5	96,3	5,2	8,4	1,6	1,4	1,4	0,55
España	57,1	4,5	97,4	5,4	9,6	1,8	1,6	1,4	4,75
Suecia	62,2	14,0	92,4	3,5	6,0	1,7	1,4	0,5	0,60
R. Unido	56,7	3,7	97,8	5,8	9,2	1,6	1,8	1,4	5,34

IB = CaO/SiO₂

aunque en Alemania, Bélgica, España, Portugal y Austria se emplean proporciones comprendidas entre el 26 y el 32 %; en Francia, Italia y Reino Unido las proporciones son relativamente bajas (aprox. 7 %), y en Luxemburgo no se emplean pelets. Se destaca que Suecia incrementa considerablemente la proporción de pelets en la carga (desde un 47 % en 1980 hasta el 81 % en 1995), sin embargo, en el Reino Unido ocurre lo contrario, pues si en 1980-1990 se empleaba una media del 23 %, a partir de 1991 disminuyó por debajo del 8 %. España mantuvo en este período bastante estabilidad en lo que respecta a los componentes de la carga del horno, donde son predominantes el sinter y los pelets (aprox. 70 y 24 %, respectivamente). En la tabla VII se muestra la composición química de pelets utilizados en hornos de España y Suecia.

El consumo de fundente, con raras excepciones, no es superior a 25-30 kg/ta. En Francia, Finlandia, Austria, y en algunos hornos altos de Bélgica,

España y Reino Unido, no se realizan este tipo de adiciones a la carga del horno.

La chatarra también encuentra poca utilización como componente de la carga. La empresa EKO (Alemania) utiliza en sus tres hornos entre 50 y 90 kg/ta, la empresa VA (Austria) en el HA-6 de su fábrica en Linz y en los HA-1 y 4 en Donawitz emplea entre 21 y 52 kg/ta, aunque el mayor consumo de chatarra durante 1995 se produjo en el HA-7 de Lorfonte, en Rombas, con 102 kg/ta.

3.2. Coque

La calidad del coque es muy importante debido a que con un bajo consumo, como consecuencia de la utilización de otros combustibles auxiliares, aumenta el tiempo de retención del coque en el horno ocasionando un aumento de la degradación del coque en el crisol, un empeoramiento de la eliminación de los álcalis y otras influencias negativas.

TABLA VII.— Composición química de los pelets
 TABLE VII.— Chemical composition of pellets

Tipo	Composición química, %								
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	Na ₂ O	K ₂ O
LKAB (básicos)	67,0	2,00	—	—	1,50	—	0,010	0,06	0,030
LKAB (con fundente)	66,3	1,94	0,81	1,61	0,37	—	0,06	0,02	—
HISPANOBRAS (con fundente)	65,9	2,37	0,44	2,53	0,06	0,05	0,026	0,01	0,012
HISPANOBRAS (ácidos)	65,2	5,10	0,42	0,75	0,20	0,08	0,012	0,03	0,018

La composición química del coque debe cumplir los siguientes límites: cenizas < 10 %, azufre < 0,7 %, fósforo < 0,025 % y álcalis < 0,28 %.

Con relación a las propiedades físico-mecánicas, el coque de tamaño superior a 25 mm debe cumplir los límites siguientes de resistencia a la abrasión:

- Ensayo MICUM, tamiz de 40 mm: M40/+60 = 87 %,
- Ensayo MICUM, tamiz de 10 mm: M10/+60 = 5,5 %,
- Ensayo IRSID, tamiz de 40 mm: I40/+20 = 55 %,
- Ensayo IRSID, tamiz de 10 mm: I10/+20 = 16 %.

Para las propiedades de reactividad:

- Índice de reactividad del coque: CRI = 24 %,
- Resistencia del coque después de reaccionar: CSR = 70 %.

4. OPERACIÓN DEL HORNO ALTO

4.1. Distribución de los materiales de carga y de la corriente gaseosa

Cuanto mayor sea la tasa de combustible auxiliar que se inyecta al horno alto, menor es el consumo de coque y, por tanto, mayor es la relación mineral/coque que se carga al horno.

La disminución del consumo de coque, si no se acompaña con las medidas adecuadas para mantener las condiciones gasodinámicas de la fusión, conlleva inevitablemente a perturbaciones en la marcha del horno y empeora sus índices de operación (9).

La distribución adecuada de los materiales en el horno se consigue al garantizar una permeabilidad elevada a los gases en el centro del horno con un moderado desarrollo de la corriente gaseosa por la periferia, que excluya grandes pérdidas de calor y la formación de pegotes, así como la creación de condiciones para el desarrollo de la reducción indirecta.

Para alcanzar este objetivo, en Francia se cargan los materiales gruesos en el centro del horno, y los finos hacia la periferia. Esto permite desarrollar una corriente gaseosa central con cantidad suficiente de mineral en el centro, garantizando, de tal forma, una buena utilización de la energía reductora de los gases y un consumo bajo de combustible.

La técnica de la carga central del coque se utiliza cuando se carga el horno con una relación elevada mineral/coque, y es importante para conseguir una zona cohesiva con la forma óptima de V invertida, que permite lograr una mejora de la permeabilidad y distribución del flujo de gas en el horno. Esta técnica ha sido desarrollada por Kobe Steel (10) y es uno de los medios más efectivos para controlar la distribución de la carga (Fig. 2). El coque

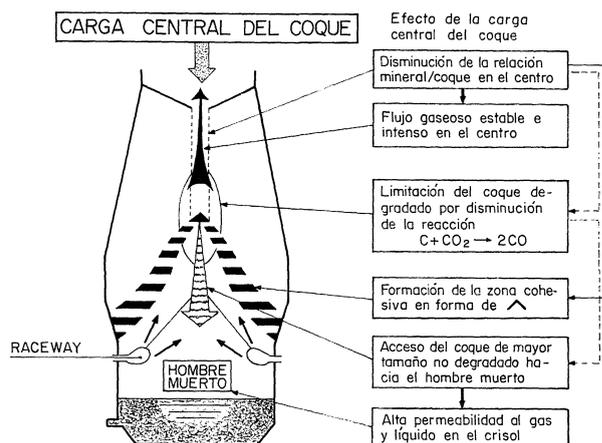


FIG. 2.— Nuevo concepto del horno alto con carga central de coque.

FIG. 2.— New concept of blast furnace with central coke charging.

que se carga en un área central estrecha forma la columna central de coque en el horno, la cual origina una zona cohesiva con forma de V invertida. La columna no está sometida a la reacción con mineral, puesto que no hay mineral en el centro del horno. Esta columna también forma el “hombre muerto”, mejorando la permeabilidad del gas y líquido en la parte más baja del horno.

La carga central de coque se emplea en los hornos de Japón, Holanda, Alemania y otros países.

A continuación, como ejemplo, se va a analizar el funcionamiento de dos hornos altos: el de Hoogovens (Holanda) y el de Thyssen (Alemania), que emplean esta tecnología (Tabla IV).

En el HA-6 de Hoogovens, con un sistema de distribución de carga Paul Wurth por canaleta móvil, al operar con consumo de coque de 270-290 kg/ta, que incluye 35-40 kg/ta de menudos de coque, la proporción volumétrica de éste en el centro es del 90-100 %, y en la periferia del 25-40 % (11). Hacia el centro se ubica cerca del 35 % de la cantidad total de coque, en la zona intermedia del 35 al 43 %, y en la pared del 22 al 30 %. La disminución del consumo de coque desde 350 kg/ta hasta los niveles señalados ocasiona una notable disminución del grosor de las capas de coque (desde 480 hasta 340 mm). Los menudos de coque se cargan mezclados con el mineral en la zona periférica, para evitar el descenso de la base de la zona cohesiva.

El HA-1 de Thyssen, con un sistema de distribución de carga similar al horno anterior, logra índices elevados de operación con la siguiente distribución de materiales: en la periferia se ubica aproximadamente el 80 % de la carga mineral y el 20 % de la carga de coque; en el centro el 10 % de la carga y 90 % del coque. Esto corresponde a una carga de 100 kg de coque por tonelada de mineral en la

periferia, y de aproximadamente 2.000 kg de coque por tonelada de mineral en el centro (12).

4.2. Inyección de combustible en el crisol

El volumen de combustible convencional que se consumía en el mundo a finales de los años 80 era del orden de 9×10^9 t. Se estima que para el año 2000 esta cifra se incrementará hasta 25×10^9 t. Más del 90 % de las reservas energéticas existentes tienen su origen en fuentes minerales. A nivel mundial, cerca del 95 % de la energía se obtiene a partir del uso de combustibles de origen orgánico y mineral. A finales de este siglo, se prevé que el combustible de origen orgánico quedará como la principal y determinante fuente de energía.

El costo elevado de la construcción y reconstrucción de las baterías de coquización, el incremento de los gastos de protección del medio ambiente durante la fabricación del coque, así como la paulatina reducción de los recursos de carbones coquizables, llevan a la necesidad de reducir el consumo de coque en el horno alto mediante su sustitución por combustibles auxiliares. Por otra parte, una característica común de la industria del coque y sus subproductos es el envejecimiento de sus instalaciones. Actualmente, la edad media de los hornos de coquería es de 18-23 años (13).

Con tal "escenario del coque", la idea de inyectar por toberas distintos combustibles auxiliares es un tema de actualidad entre los siderúrgicos. En calidad de combustible complementario, introducido en el chorro de viento, se utiliza gas natural y de batería, *fuel oil*, a veces alquitrán, y carbón (pulverizado o granulado). En la figura 3 se muestra un dispositivo para la inyección de combustibles auxiliares por toberas. Los caudales medios de inyección de estos combustibles, por países, se incluyen en la tabla III.

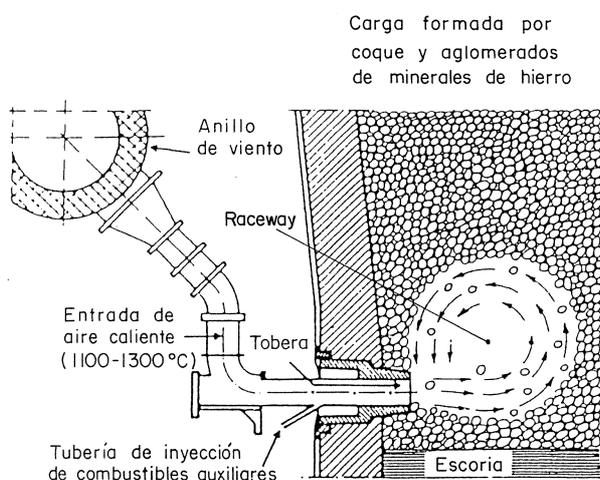


FIG. 3.— Zona de toberas del horno alto.

FIG. 3.— Blast furnace tuyeres zone.

4.2.1. Combustibles gaseoso y líquido

La inyección de gas natural es importante en los países con reservas de este combustible (EE.UU. y la antigua URSS), sin embargo, en los países de la UE y en el Japón este combustible no tiene aplicación en el horno alto, principalmente por la ausencia de grandes reservas.

En la industria siderúrgica la mayor demanda de *fuel oil* y de otros derivados del petróleo se observa en la República Federal Alemana, Japón y Francia a comienzos de los años 70, aunque en menor escala también se aplicó la inyección de combustible líquido en hornos de EE.UU., Canadá, Reino Unido, España, etc. Sin embargo, entre 1973-1975 la crisis energética mundial provocó un aumento de los precios del petróleo de 3-4 veces y, hacia 1982, de 15-18 veces con respecto al precio previo a la crisis. Como resultado, al final de los años 70 e inicio de los 80 la utilización de *fuel* en el horno comienza a reducirse drásticamente. En la actualidad, en la UE sólo Luxemburgo, Austria, Finlandia y Alemania mantienen un determinado nivel de inyección, aunque se prevé que tienda a disminuir.

Debido a que se mantiene el crecimiento de los precios del gas y petróleo, en los últimos años tiene mayor difusión y desarrollo la inyección de carbón.

4.2.2. Combustible sólido

A nivel mundial las reservas de combustible sólido constituyen más del 80 % de las reservas exploradas de combustible. Sin embargo, a pesar de estas grandes reservas los recursos en carbones coquizables son muy limitados. Así, por ejemplo, en uno de los mayores yacimientos de carbón (la cuenca hullera del Donbass, en Ucrania), sólo el 15,7 % es coquizable. La escasez de carbones coquizables ocasiona una disminución de su proporción en la carga de las baterías de coque, por debajo de los límites permisibles, lo que a su vez reduce drásticamente su resistencia mecánica, al mismo tiempo que aumenta su precio.

Anteriormente, las desventajas del carbón no coquizable como combustible se debían a un coste relativamente alto de extracción (en comparación con los combustibles gaseoso y líquido), al contenido de azufre, presencia de ceniza y a la dificultad en el transporte neumático (14).

En la actualidad, la competitividad del carbón ha aumentado notablemente, lo que se explica principalmente por su menor coste en comparación con el petróleo y el gas natural. Según el Departamento de Energía de EE.UU. (15), para el período 1990-2005 se producirá el siguiente crecimiento de los precios de los combustibles usualmente empleados en la industria siderúrgica, en dólares EE.UU./Mcal: *fuel*

oil desde 13 hasta 26,6; gas natural desde 14,5 hasta 29,0 y carbón no coquizable desde 7,5 hasta 9,7.

Por otra parte, las reservas de carbón mineral sobrepasan considerablemente las de otros combustibles orgánicos. A finales de 1990 las reservas de carbones no coquizables en el mundo eran del orden de 1.079×10^9 t, las de petróleo crudo de $136,5 \times 10^9$ t y las de gas natural de $119,4 \times 10^9$ m³ (16). Para los niveles actuales de extracción, estas reservas pueden satisfacer la demanda de la industria siderúrgica durante 450 años en el caso de los carbones, de 35 a 45 años en el caso del petróleo y de 50 a 57 para el gas natural.

La inyección de carbón en Europa Occidental y en Japón comenzó en 1981. En 1983, en estos países operaban 5 hornos con esta tecnología, y en 1985 ya eran 10. La tendencia de aplicación de esta tecnología en la UE se muestra en la figura 4.

Se debe destacar que en el último decenio disminuyó notablemente el número de hornos en explotación, sin embargo, aunque la cantidad de hornos que se han equipado con sistemas de preparación e inyección de carbón se ha incrementado en sólo 8 unidades, se observa un considerable incremento de la proporción de hornos equipados con ICP (desde un 29 % en 1987 hasta el 50 % en 1995).

Los niveles máximos de inyección no se han establecido aún, aunque existe un aumento progresivo de la tasa de inyección. Por ejemplo, al estudiar la experiencia de los años 1960-1970, en el horno alto Amanda, de AK Steel (EE.UU.), una de las pioneras en esta tecnología, el caudal de carbón inyectado era de 58,5 kg/ta (12,5 % del combustible total). A inicios de los 80, la ICP era de 112 kg/ta (25 % del combustible total) y a comienzos de los 90 se inyectaban 157 kg/ta para una sustitución del 35 %.

El rápido aumento de la cantidad de CP inyectado debido a las mejoras en la operación del horno,

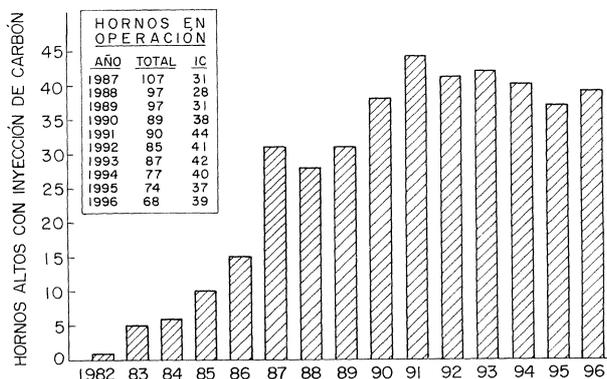


FIG. 4.— Hornos altos con inyección de carbón en la UE.

FIG. 4.— Blast furnaces with coal injection in the EU.

es una característica de los hornos altos de Ilva, en Taranto (Italia), donde se ha asimilado esta tecnología en unos pocos años, según se puede apreciar en la tabla VIII.

En las tablas IV, VIII y IX se incluyen datos de operación de los hornos altos de la UE que utilizan inyección de carbón durante 1995.

Se puede ilustrar la efectividad de la inyección de caudales elevados de CP con el HA-6 de Hoogovens, en IJmuiden (Holanda), que durante 5 y 2 meses operó con caudales de 190 y 210 kgCP/ta, respectivamente (11). En la tabla X se incluyen algunos índices de su operación en el período señalado. Durante toda la etapa experimental, el horno trabajó con estabilidad, el consumo de coque disminuyó linealmente al aumentar el caudal de CP, y el coeficiente de sustitución se mantuvo igual a 1,08 kg coque/kg carbón inyectado.

En la actualidad, se puede considerar como una práctica usual operar el horno con un consumo de coque de 320 kg/ta mediante una tasa de ICP de 180 kg/ta (17). En las fábricas de Dunkerque (Francia), IJmuiden (Holanda) y Schwelgern (Alemania) se ejecutan programas para incrementar la inyección de carbón hasta 250 kg/ta. Los mayores caudales de ICP logrados en Europa son:

Hoogovens HA-6 ... 212 kg/ta nov. - dic. de 1992
 Hoogovens HA-7 ... 210 kg/ta ene. - mar. de 1991
 Scunthorpe HA-Queen Anne 210 kg/ta sep. 1991 - feb. 1992
 Scunthorpe HA-Queen Anne 210 kg/ta ago. - nov. de 1993
 Thyssen HA-1 200 kg/ta oct. - nov. de 1992
 Sollac HA-4 194 kg/ta may. - jun. de 1992

En diciembre de 1995, en España operaban 6 hornos altos con una producción de $5,5 \times 10^6$ ta/año, utilizando *fuel oil* como combustible auxiliar. Dentro del programa de remodelación y modernización de la industria siderúrgica española, se prevé su sustitución por dos hornos altos de 2.348 m³ de volumen útil (cada uno), de 11,3 m de diámetro del crisol equipados con 29 toberas. Estos hornos operarán con 1.200 °C de temperatura del viento (enriquecido con un 2 % O₂). La carga estará compuesta por 40 % pelets y 60 % sinter. Ambos hornos operarán con ICP en caudal de 175-190 kg/ta, lo que permitirá reducir el consumo de coque hasta 310-340 kg/ta; el sistema de inyección de carbón está constituido por dos instalaciones de 43,2 t/h. El primero de estos hornos fue puesto en marcha el 2 de octubre de 1996. A continuación se inicia la construcción del segundo horno, cuya puesta en marcha se prevé para diciembre de 1997. La capacidad de producción total de estos hornos será de $3,8 \times 10^6$ t/año y la inversión se ejecuta con un costo de 47.200 millones de pesetas.

TABLA VIII.– Hornos altos en funcionamiento en Taranto (Italia)
 TABLE VIII.– Operating blast furnaces in Taranto (Italy)

Características	Año	Horno alto				Media
		Núm. 1	Núm. 2	Núm. 4	Núm. 5	
Diám. de crisol, m		10,6	10,3	10,6	14,0	11,4
Volumen útil, m ³		2.117	1.971	2.032	3.650	2.443
Núm. de toberas		27	25	27	36	29
Inyección de carbón pulverizado, kg/ta	1991	0	56	28	6	22,5
	1992	117	148	139	103	127
	1993	116	174	164	116	143
	1994	153	187	175	129	161
	1995	159	170	150	134	153
Consumo de coque, kg/ta	1991	420	439	412	420	423
	1992	353	337	332	361	346
	1993	366	332	320	354	340
	1994	334	309	324	357	331
	1995	335	332	346	350	341
Productividad, t/m ³ · 24 h	1991	2,40	2,32	2,50	2,48	2,43
	1992	2,50	2,69	2,66	2,44	2,57
	1993	2,48	2,82	2,69	2,45	2,61
	1994	2,21	2,84	2,67	2,41	2,53
	1995	2,53	2,70	2,61	2,57	2,60

TABLA IX.– Parámetros de operación de los hornos altos con inyección de carbón en la UE en 1995
 TABLE IX.– Parameters operation of blast furnaces with coal injection in European Community in 1995

Países	Hornos en operación		Parámetros analizados		
	Total	Con inyección de carbón	Carbón inyectado, kg/ta	Consumo de coque, kg/ta	Productividad, t/m ³ · 24 h
Alemania	20	9	115	369	2,24
Bélgica	8	7	125	384	2,26
Francia	11	8	121	357	2,15
Holanda	2	2	144	355	2,67
Italia	5	4	153	341	2,60
Reino Unido	8	3	143	354	2,44
Suecia	4	4	82	381	2,57
Total	58	37			
Media UE			122,6	365,5	2,34

Las condiciones decisivas para operar con éxito el horno con caudales elevados de ICP son: emplear materias primas férreas y coque de alta calidad, aplicar nuevos métodos de carga y distribución de los materiales para mantener condiciones satisfactorias gasodinámicas, preparación del carbón y utilización de medidas especiales para intensificar su

combustión. Algunos de estos aspectos han sido tratados en (7, 8 y 18).

Actualmente, se ejecutan proyectos de forma conjunta por instituciones científicas y fábricas de la UE que están encaminados a un mayor desarrollo de esta tecnología, al incremento del caudal de inyección de carbón y a la disminución del

TABLA X.- Resultados de ensayos industriales en el HA-6 de Hoogovens, en IJmuiden

TABLE X.- Industrial test results in the BF-6 Hoogovens, in IJmuiden

Parámetros	Períodos durante 1992		
	Jun.-Oct.	Nov.	Dic.
Productividad:			
- t/día	6.055	6.125	5.850
- t/m ³ · 24 h	2,60	2,63	2,52
Consumo de combustible, kg/ta:			
- coque	253	240	236
- menudos de coque	37	36	36
- carbón pulverizado	190	205	212
Total	480	481	484
Viento:			
- caudal, m ³ /min	3.200	3.755	3.492
- contenido O ₂ , %	24,8	25,7	26,6
Contenido en el arrabio, %:			
- silicio	0,38	0,38	0,36
- desviación Sí	0,10	0,10	0,08
Temperatura del arrabio, °C	1.501	1.492	1.495
Volumen de escoria, kg/ta	236	234	238

consumo de coque hasta 250 kg/ta o por debajo de esta cantidad (19 y 20).

4.3. Régimen de escoria y calidad del arrabio

Es conocido que la calidad del arrabio se determina por la cantidad y características de la escoria. El volumen de escoria producida en los hornos de la UE es de 223-303 kg/ta. En Suecia es de sólo 153 kg/ta y en Luxemburgo 509 kg/ta (Tabla III). El índice de basicidad de la escoria, expresado por la relación CaO/SiO₂, se encuentra en el rango de 1,05-1,20.

Los hornos altos de Suecia tienen un interés especial desde el punto de vista del régimen de escoria. Por ejemplo, el HA-2 de SSAB, en Luleå, opera con 100 % de pelets LKAB con adición de 30-35 kg de caliza y 50 kg de escoria de convertidor por tonelada de arrabio, con un volumen de escoria de 145 kg/ta (21). El índice de basicidad de la escoria es 0,95, el coeficiente de distribución del azufre L_s se encuentra entre 30 y 33, el contenido de MgO es 18 % y el de Al₂O₃ se sitúa entre el 11 y 12 %. El horno tiene una productividad elevada (3,05 t/m³·24 h), funde diariamente entre 3.600 y 3.700 t arrabio, con una composición, en tanto por ciento de: 4,63 C; 0,43 Si; 0,39 Mn; 0,03 P; 0,052 S y 0,11 Ti, a una temperatura de 1.472 °C.

En los últimos tiempos, en este horno se ensayan nuevos pelets LKAB (0,4 % MgO, 1,3 % SiO₂, 62,7 % Fe), cuya proporción en la carga es del 50 %. Posteriormente, se prevé pasar completamente a la utilización de este tipo de pelets, disminuyendo el volumen de escoria hasta 120 kg/ta.

El coeficiente de distribución del azufre entre la escoria y el arrabio $L_s = (S)/[S]$ no es alto (20-45),

lo que determina que el contenido de azufre en el arrabio experimente un aumento a pesar de que no es muy elevado su contenido en los materiales componentes de la carga. La fabricación de arrabio con 0,030-0,045 % S es una práctica habitual. Todo el arrabio elaborado en Alemania, Finlandia, Suecia y Portugal contiene entre 0,05 y 0,07 % S, y sólo algunos hornos en Bélgica, Italia, Reino Unido y España producen arrabio con bajo contenido de azufre (0,018-0,025 %). El arrabio con elevado contenido de azufre se somete a desulfuración fuera del horno alto.

El contenido medio de fósforo en el arrabio es del 0,06-0,12 %; en Finlandia y Suecia del 0,030-0,037 %. La excepción es Luxemburgo donde se produce arrabio con elevado contenido de fósforo (1,48 %).

El contenido medio del silicio es de 0,3-0,8 % para una temperatura del arrabio de 1.470-1.500 °C, aunque en Austria se produce arrabio con un contenido del 1,0 % Si a 1.430-1.445 °C y en Pont-a-Mousson (Francia) con 2,23 % Si a 1.460 °C.

El contenido de manganeso oscila entre un 0,25 y 0,62 %; solamente los hornos en Salzgitter y Bremen (Alemania) fabrican arrabio con bajo contenido de manganeso (0,11-0,12 %). El contenido de titanio generalmente es del 0,02-0,07 %, aunque en Alemania, en los hornos 1 y 4 de Thyssen, en Schwelgern, así como en los hornos de EKO, en Eisenhüttenst, producen arrabio con 0,11 % Ti. Los mayores contenidos de titanio se obtienen en los hornos 2 y 4 de Dunkerque (Francia) con 0,45 y 0,28 %, respectivamente.

5. PROCESOS SIDERÚRGICOS ALTERNATIVOS

La producción mundial de metal primario en procesos distintos al del horno alto, en forma de hierro esponja, lupias y metal líquido, es de cerca de 30 × 10⁶ t/año y está centralizada en Latinoamérica y en el Oriente Medio. De 23 × 10⁶ t de prerreducidos fabricados por reducción directa a nivel mundial en 1993, en Alemania se fabricaron 0,182 × 10⁶ t y en Suecia 0,095 × 10⁶ t (2).

A pesar de que en los procesos de reducción directa del hierro en la UE se produce menos del 0,3 % del arrabio elaborado en hornos altos (en el mundo esta proporción es del 4 %), se trabaja intensamente en la elaboración de nuevos métodos. Esto se explica, por una parte, por la complejidad para cumplir las medidas de protección del medio ambiente por las industrias del coque y sinterización y, por otra, por las ventajas que presenta la reducción directa para producción en pequeña escala y que son: más flexibilidad en los dispositivos y equipamiento en las coyunturas del mercado, y posibilidad de unión con otras

nuevas tecnologías, en particular, con la elaboración de desbastes planos de poco grosor.

En este trabajo no se pretende realizar un análisis puntual de los procesos de reducción directa. A ello van dirigidos muchos trabajos publicados en revistas especializadas. En la figura 5 se muestra, solamente, la tendencia general de los procesos de obtención directa de metal primario. Prácticamente, todos los esquemas modernos se basan en la utilización de combustible sólido, principalmente carbones energéticos. Se diferencian, fundamentalmente, en las vías de utilización del gas regenerado. Son preponderantes los procesos con reformado de los gases de salida del baño de fusión o de recirculación del gas en el agregado de reducción. Se elaboran procedimientos sobre el empleo de energía eléctrica para la fusión completa de los materiales (22).

Una de las variantes pronosticadas para el futuro de la industria siderúrgica, a partir de la obtención de metal líquido, se muestra en la figura 6. Según este esquema, para la fabricación de metal primario se utiliza un convertidor de tipo ciclón CCF (*cyclone converter furnace*) sobre el que se está trabajando en la actualidad (23). El metal líquido se obtiene directamente a partir de finos de mineral de hierro y carbón granulado. El proceso CCF consta de dos etapas, que se producen en un reactor: la prerreducción y fusión completa del mineral en el ciclón y la reducción final en baño líquido. El metal líquido primario se transforma en acero mediante la com-

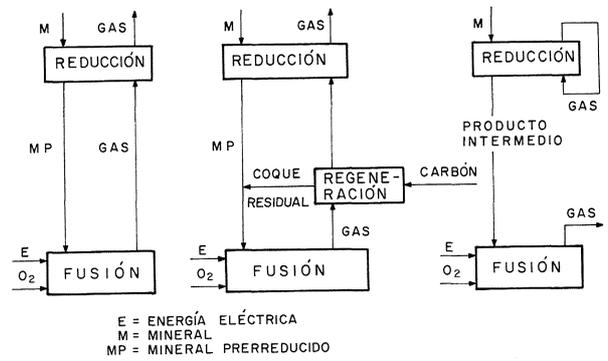


FIG. 5.— Diferentes procesos de obtención directa de metal primario.

FIG. 5.— Different processes of direct obtaining of primary metal.

bustión del carbono, silicio y la eliminación de las impurezas nocivas en reactores especiales.

El organismo alemán VDEh realiza un análisis comparativo entre los procesos de reducción directa y la producción en horno alto desde el punto de vista de utilización de la energía, de los índices económicos y de la interacción sobre el medio ambiente, llegando a la conclusión de que el horno alto mantiene su posición en las plantas siderúrgicas integradas.

El principal objetivo para aumentar la eficiencia del horno alto es la disminución del consumo de coque y la utilización de la energía de los gases de

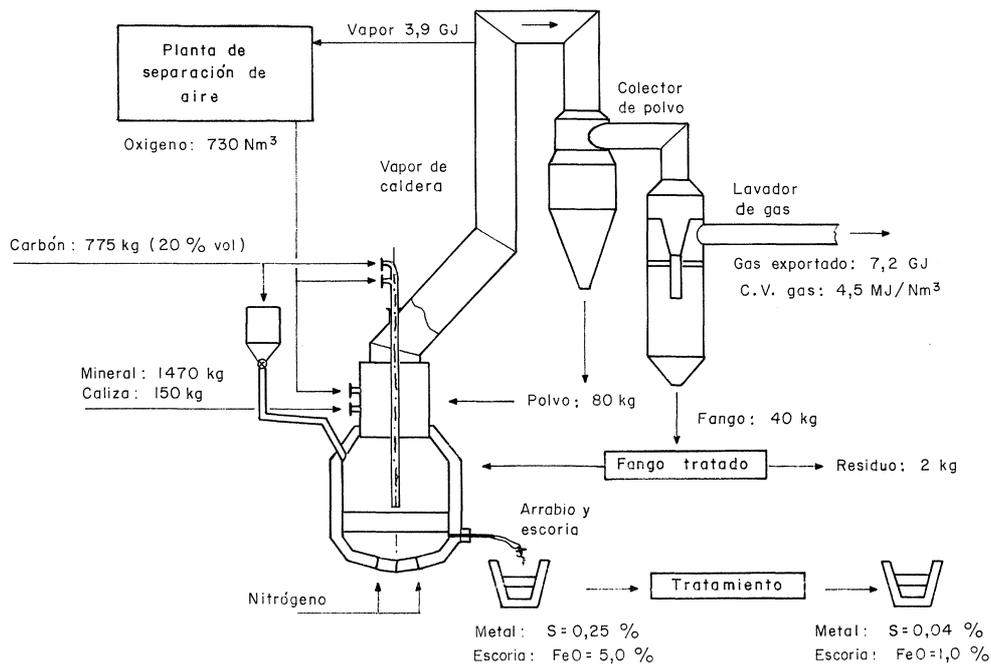


FIG. 6.— Esquema de flujo de una planta para fabricar $0,5 \times 10^6$ t/año de arrabio por el proceso CCF.

FIG. 6.— Flowsheet CCF ironmaking plant, $0,5 \times 10^6$ t/y.

salida (24). Será posible alcanzar este objetivo partiendo de la mejora en la preparación de la materia prima, la inyección de grandes cantidades de carbón y de materiales pulverulentos no combustibles y la obtención de gas del tragante reformado. La energía excedente del gas de horno será empleada en la obtención de vapor, oxígeno y energía eléctrica.

6. CONCLUSIONES

La fabricación de arrabio en la Unión Europea es del orden de 100×10^6 t/año, lo que constituye cerca del 20 % de la producción mundial. El consumo de coque ha disminuido hasta 350-400 kg/ta, y algunos hornos durante varios meses han operado con consumos de coque inferiores a 300 kg/ta. La productividad de los hornos altos ha alcanzado 2,6-3,2 t/m³-24 h. Los elevados índices en el proceso del horno alto se han alcanzado mediante continuas mejoras de la calidad de la materia prima, aumento de la proporción de pelets en la carga, disminución del volumen de escoria hasta 220-300 kg/ta (en algunos hornos hasta 150 kg/ta), inyección de carbón en caudales de 180-200 kg/ta, optimización de la distribución de los materiales y de la corriente gaseosa, y por la utilización de sistemas de control automático.

REFERENCIAS

- (1) Steel Statistical Yearbook 1994. Committee on Statistics. Bruselas, 1995.
- (2) World Steel in Figures. IISI, Association Internationale a but Scientifique. Bruselas. 1995 - 1997: 17.
- (3) MINAEV, A.A. y KONOBALOV, Yu.B. *Metall Lito Ukraine*, (11-12), 1995: 3-11.
- (4) BABICH, A.I., YAROSHEVSKII, S.L. y TERESHENKO, V.P. Intensificación de la utilización de carbón pulverizado en el horno alto. Ed. Tejnika. Kiev, 1993: 191 (en ruso).
- (5) FORMOSO, A., GARCIA, L., CORES, A., ISIDRO, A., BABICH, A. y YAROSHEVSKII, S. *Rev. Minas, Oviedo*, (13-14), 1996: 97-107.
- (6) Operation data of sinter plants and blast furnace. European Blast Furnace Committee. Gijón (España), junio 1996.
- (7) BABICH, A., YAROSHEVSKII, S., GARCIA, L., FORMOSO, A., CORES, A., ISIDRO, A. y FERREIRA, S. *Rev. Metal. Madrid*, 32 (2), 1996: 103-116.
- (8) BABICH, A., YAROSHEVSKII, S., FORMOSO, A., ISIDRO, A., FERREIRA, S., CORES, A. y GARCIA, L. *ISIJ Int.*, 36 (10), 1996: 1.250-1.258.
- (9) STEILER, J.M., DUFOUR, A. y LIBRALESSO, J.M. *Rev. Metall.-CIT*, (10-11), 1995: 1.207-1.223.
- (10) UENAKA, T., MIYATANI, H., HORI, R., NORMA, F., SHIMIZU, M., KIMURA, Y. e INABA, S. *Iron Steelmaker*, 15 (11), 1988: 34-39.
- (11) KOEN, W., TOXOPEUS, H.L., SCHOONE, E.E., VLIET, C.v.d. y BERG, H.v.d. 53 rd Ironmaking Conf. Proc. Chicago, 1994: 429-436.
- (12) PETERS, K.H., BEPLER, E. y GERSTENBERG, B. Proc. 1st Int. Congress of Sci. and Tech. of Ironmaking. ISIJ. Sendai (Japón), 1994: 589-595.
- (13) NUHAWAN, B.R. Proc. 6th ILAFA-IVES Seminar Direct Reduction and Smelting. ILAFA. Ciudad Guyana (Venezuela), 1990: C1-C8.
- (14) GASPER, D. *Iron Steel Eng.*, 51 (7), 1974: 65-70.
- (15) MAZAR MARGHALL. R. *Metall Bull. Monthly*, (7), 1990: 67-68.
- (16) JUKES, M.H. *Met. Plant Tech.*, 16 (2), 1993: 53-60.
- (17) FLIERMAN, G.A., LANGER, K., LEONARD, D.C., LIBRALESSO, J.M., MASSIN, J.P. y PALOMBA, R. Proc. 3rd Intern. Ironmaking Congress. Gante (Bélgica), 1996: 64-71.
- (18) BABICH, A.I., YAROSHEVSKII, S.L., KOCHURA, V.V. y TERESHENKO, V.P. *Metall Lito Ukraine*, (11-12), 1995: 12-18.
- (19) FORMOSO, A., ISIDRO, A., CORES, A. y FERREIRA, S. Further developments in blast furnace injection technology. ECSC Agreement No. 7210-AA/936. 1994.
- (20) FORMOSO, A., ISIDRO, A., CORES, A. y FERREIRA, S. Modelling of gas and char flows at high PCI through experimental and theoretical studies of the raceway and the dead man. ECSC Agreement No. 7210-AA/938. 1996.
- (21) HALLIN, M., THULIN, D. y TOTTIE, M. 53 rd Ironmaking Conf. Proc. Chicago, 1994: 287-291.
- (22) LASSAT DE PRESSIGNY, Y. Proc. ECSC Workshop Developments in Alternative Ironmaking Processes. Maizieres-les-Metz, 1994: 63-64.
- (23) MEIJER, H.K.A., LAAR, J. VAN, KNOOP, W. VAN DER, y NEDERVEEN, R. VAN. Proc. 3rd Intern. Cokemaking Congress. Gante (Bélgica), 1996: 299-303.
- (24) GATHERGOOD, P.S. Proc. ECSC Workshop Developments in Alternative Ironmaking Processes. Maizieres-les-Metz, 1994: 75-80.