

Operación de hornos altos con inyección de carbón pulverizado en diferentes condiciones tecnológicas^(*)

Antonio Formoso Prego*, Alejandro Cores Sánchez*, Alexander Babich**, Heinrich Wilhelm Gudenau**, Luis García Sánchez**, Stanislav Lvovich Yaroshevskii**** y Jorge Luis Menéndez*****

Resumen Se analiza la eficiencia de la inyección de carbón pulverizado (ICP) en dos hornos altos (HAs), en España y Ucrania, que operan en condiciones diferentes de viento y carga, usando un modelo matemático, métodos estadísticos y cálculos de los balances de materias y térmico. Se estudia el efecto de la ICP sobre los parámetros de operación de alto horno, calidad del arrabio y, también, las interacciones entre los parámetros de proceso. Al operar con una carga de calidad y altos parámetros de viento combinado el consumo de coque disminuye linealmente al incrementar, hasta tasas elevadas, la ICP. La dependencia entre los principales índices de fusión y el caudal de CP adquiere un carácter extremo cuando se opera con carga de baja calidad y en condiciones tecnológicas poco favorables. La alta eficiencia en la utilización de la ICP puede lograrse en condiciones diferentes mediante la optimización del régimen tecnológico.

Palabras clave Elaboración de arrabio y acero. Horno alto. Inyección de carbón pulverizado.

Blast furnace operation with pulverized coal injection at different technological conditions

Abstract Efficiency of pulverized coal injection (PCI) at two blast furnaces (BFs) in Spain and Ukraine which operate at different burden and blast conditions has been analyzed using statistical methods, calculation of material and heat balances and a mathematical model. Effect of PCI on the parameters of blast furnace operation, pig iron quality and also on interactions between process parameters has been studied. At high-grade burden and high parameters of the combined blast, dependence of coke consumption rate on PC amount is linear up to a high rate of PCI. At unfavorable burden and technological conditions dependence of the main furnace operating parameters on PC rate has extreme character. High efficiency of PC use can be achieved at the different conditions due to optimization of the technological regime.

Keywords Ironmaking and steelmaking. Blast furnace. Pulverized coal injection.

1. INTRODUCCIÓN

Mantener e incrementar la competitividad del proceso del horno alto requiere disminuir el consumo de coque durante la fusión del metal.

El consumo específico de coque en la industria siderúrgica de los países desarrollados ha disminuido hasta 350-450 kg/t arrabio (kg/ta) y, en determinados períodos, los hornos altos han trabajado con

consumos de coque inferiores a 300 kg/ta^[1-6]. En ello han influido mejoras tecnológicas, tales como: preparación cuidadosa de la carga, aumento de la presión de los gases en el tragante y de la temperatura del viento, enriquecimiento del viento con oxígeno y empleo de adiciones de combustibles auxiliares.

La economía posterior de coque en la elaboración de arrabio es racional sobre la base de la inyección en el crisol de tasas elevadas de carbón

(*) Trabajo recibido el día 3 de octubre de 2000 y aceptado en su forma final el día 22 de febrero de 2001.

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

(**) RWTH Aachen, Institute für Eisenhüttenkunde, Intzestraße 1, 52056 Aachen, Alemania.

(***) Centro de Investigaciones Metalúrgicas, Avda. 51, 23611 Ciudad de la Habana, Cuba.

(****) Donetsk State University of Technology, 58 Artyom Str., 340000 Donetsk, Ucrania.

(*****) ACERALIA. Apdo. 570, 33280 Gijón, (España).

pulverizado, (CP), y, en un futuro, de gases reductores calientes, obtenidos mediante la gasificación de carbones y/o la regeneración del gas de tragante. La orientación hacia carbones energéticos se explica por su menor precio y, fundamentalmente, por su estabilidad en los precios en Europa, en comparación con el petróleo y el gas natural. Las reservas mundiales de carbones son grandes, como se observa en la tabla I [7 y 8].

El análisis de la experiencia industrial acumulada y del estado del arte en la elaboración de arrabio en horno alto han sido expuestos en diversos trabajos^[9 y 10].

Desde 1982, en el Institute of Ferrous Metallurgy, de la Aachen University of Technology (Alemania) se han realizado investigaciones de laboratorio sobre la gasificación del carbón, simulando las condiciones del *raceway*^[11-14]. El *raceway* es la zona de influencia de los gases reductores situada frente a cada tobera de un horno alto. Esta cavidad tiene una extensión de 1 a 1,5 m.

En 1991, se construyó en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), en España, una planta piloto para estudiar la gasificación de carbones a inyectar, simulando las condiciones de operación del horno alto, en la zona de toberas con el objetivo de lograr datos tecnológicos de trabajo^[15]. En 1998, se construyó una cámara de gasificación de coque destinada al estudio, a escala piloto, de las dimensiones del *raceway* y la circulación del gas cuando se realiza la ICP^[16]. Dentro del programa de remodelación y modernización de la industria siderúrgica española se ejecutó, entre 1996-1997, la puesta en funcionamiento de dos hornos altos modernos de 2.348 m³ cada uno, de volumen útil, que operan con ICP y carga férrea de alta calidad.

En 1980, en la fábrica siderúrgica de Donetsk (FSD), en Ucrania, se construye y pone en explotación un complejo industrial para la ICP en dos hornos altos. La capacidad anual del complejo es de 140.000 t de carbón^[17-20]. En este período se ha

utilizado más de un millón de toneladas de CP elaborado a partir de concentrado de hullas magras. El caudal de ICP era de 70-90 kg/ta, con un coeficiente de sustitución coque/carbón de 0,9 kg/kg. La peculiaridad de esta tecnología consistía en la inyección simultánea de CP y gas natural (60-70 m³/ta), mediante el cual se reduce el consumo de coque en 130-150 kg/ta. Cuando la calidad de la carga y los parámetros del viento empeoran, surge la problemática sobre la conveniencia de empleo del CP. El uso del CP requiere de una carga de calidad elevada para asegurar la permeabilidad del gas y de un valor suficiente de la temperatura del viento caliente para mantener el potencial de temperatura en el crisol y la posibilidad de la gasificación completa de las partículas de carbón en el *raceway*. Se han realizado ensayos industriales en FSD para determinar la eficiencia del uso del CP en condiciones tecnológicas desfavorables.

En este trabajo se analizan las condiciones y resultados del primer año de asimilación de la tecnología de operación del horno alto B (HA-B) de ACERALIA, en Gijón (España), con ICP, y, de hornadas industriales en el HA-1 de la fábrica metalúrgica de Donetsk (FMD), en Ucrania. Estos hornos se diferencian en su funcionamiento, por la calidad de la carga férrea y por el régimen de viento empleados.

2. OPERACIÓN DEL HA-B GIJÓN CON ICP

2.1. Características de construcción del horno y condiciones de operación

En diciembre de 1995 operaban en España 4 hornos altos con una producción anual de $5,5 \times 10^6$ ta/a, que utilizaban fuel oíl como combustible auxiliar. Entre 1996-1997, estos 4 hornos han sido sustituidos por 2 hornos nuevos de 2.348 m³ cada uno, de 11,3 m de diámetro de crisol, equipados con 29 toberas. Estos hornos, equipados con un dispositivo Paul Wurtz de carga, operan con 1.200 °C de temperatura del viento (enriquecido en 2 % O₂). Se pre-

Tabla I. Reservas y volúmenes de combustibles fósiles en explotación

Table I. Deposits and volume of exploitation of fossil fuels

Combustible	Reservas estimadas	Reservas exploradas	Volumen de explotación, % de reservas exploradas	Valor calórico, J · 10 ¹⁸	Tasa en el balance energético mundial, %
Carbón	13.868 · 10 ⁹ t	1.598 · 10 ⁹ t	70	22.360	32
Petróleo	354 · 10 ⁹ t	124 · 10 ⁹ t	16	5.184	17
Gas	217 · 10 ¹² m ³	109 · 10 ¹² m ³	40	4.346	30

vé que ambos hornos operen con ICP en caudales 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 y fue suministrado por Klöckner. La capacidad de producción anual de estos hornos es de $3,8 \times 10^6$ t/a y la inversión se ejecutó a un costo de 47.200 millones de pesetas. Esta modernización permite aumentar la productividad en casi dos veces y disminuir el costo de elaboración del arrabio un 15 %. Las particularidades de construcción y las características tecnológicas y económicas de operación de ambos hornos han sido publicadas [21].

La puesta en funcionamiento del HA-B tuvo lugar en septiembre de 1996 y el HA-A comenzó a funcionar en noviembre de 1997. La ICP, en el HA-B, comenzó en diciembre de 1996. En la tabla II se incluye un análisis comparativo de los parámetros mensuales de operación, en 1996-1997. En la figura 1 se muestra la variación de los parámetros mensuales de operación del HA-B, durante 1997.

La tasa de CP se ha incrementado gradualmente. En abril se alcanzan 113 kg/ta y durante el resto del año se mantiene entre 107 y 144 kg/ta. El promedio anual de ICP, en 1997, es de 110 kg/ta y el consumo de coque de 390 kg/ta y una productividad de 6.045 t/24h ($2,57 \text{ t/m}^3 \cdot 24\text{h}$). La temperatura de llama promedio es de $2.147 \text{ }^\circ\text{C}$. Los promedios anuales de utilización del CO y del grado de reducción son de 49,2 % y 41,5 %, respectivamente [22]. Estos datos, actualizados a 1999, son: tasa de ICP, 138 kg/ta; consumo de coque, 353 kg/ta; productividad, $2,64 \text{ t/m}^3 \cdot 24\text{h}$; y temperatura de llama, $2.178 \text{ }^\circ\text{C}$.

La carga férrea está compuesta por 60-65 % de sinter, 30 % pelets y 7-10 % de una mezcla de minerales de hierro de Tazadit y Carajas. La proporción de sinter decrece en noviembre-diciembre hasta 38-40 %, con el correspondiente aumento del porcentaje de pelets hasta 38-40 %, lo que reduce el volumen de escoria de 240-250 a 205-210 kg/ta. El análisis químico de las materias primas férricas se incluye en la tabla III. La composición promedio del CP, elaborado a partir de la mezcla de carbones Guasare y South Walker es: 57,9 % C_{fijo} , 34,8 % volátiles, 0,63 % azufre y 7,7 % cenizas.

2.2. Resultados del primer año de asimilación de la tecnología

2.2.1. Efectividad de la ICP

El coeficiente de sustitución del coque por carbón K_s se mantiene en un alto nivel (cerca de 1,0

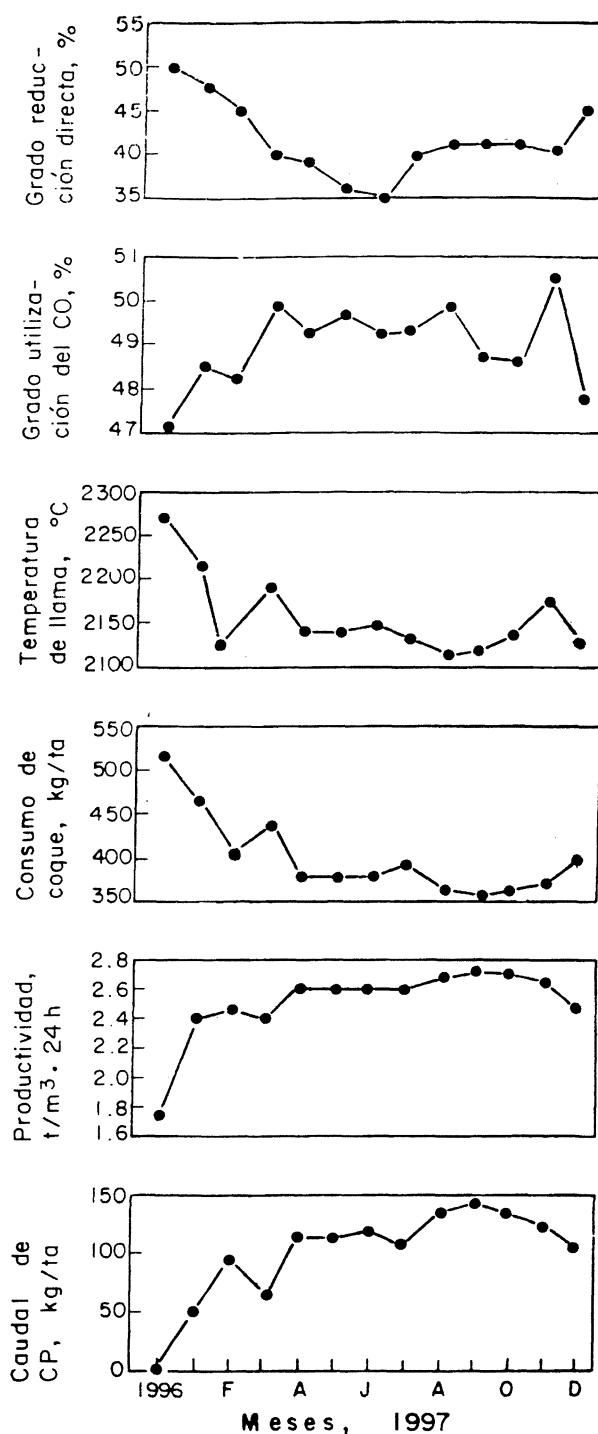


Figura 1. Parámetros de operación del HA-B Gijón.

Figure 1. Operating parameters of BF-B Gijón.

kg/kg) al aumentar la tasa de CP de 0 a 140 kg/ta. Esto se logra por la alta calidad de la carga férrea, el aumento del potencial de temperatura-oxidación en la zona del *raceway* mediante el incremento de la temperatura del viento y su enriquecimiento en oxígeno, la composición favorable de la escoria y la disminución del volumen de gas de tragante.

Tabla II. Datos de operación del HA-B Gijón
Table II. Operation data of BF-B Gijón

Parámetros	1996	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Materiales de carga, kg/ta													
Sinter	1.063	1.094	992	988	983	980	987	969	959	964	959	619	595
Pellets	426	384	511	515	467	455	449	469	486	495	494	820	851
Mineral de hierro	137	184	120	117	158	165	171	168	163	168	155	138	123
Fúndente	16,1	7,3	6,4	6,9	4,5	3,8	0,1	0,2	1,7	1,5	3,4	25,5	19,3
Coque	515	467	406	440	381	383	382	392	364	360	365	372	400
Viento													
Volumen, m ³ /ta	1.073	1.114	1.038	1.158	959	956	989	1.007	964	989	980	1.007	1.103
Temperatura, °C	1.080	1.138	1.171	1.163	1.169	1.171	1.157	1.154	1.178	1.180	1.177	1.179	1.114
Presión, kg/cm ²	3,00	3,33	3,27	3,34	3,42	3,50	3,47	3,51	3,55	3,56	3,54	3,46	3,15
Humedad, g/m ³	290	296	34,14	32,4	32,2	32,5	28,2	35,4	35,3	33,3	29,8	25,7	30,7
Enriquecido en O ₂ , %	0	0,23	1,07	0,30	2,36	2,43	2,43	2,15	3,10	3,20	2,85	2,36	1,58
Carbon inyectado, kg/ta	0	51	96	65	113	115	121	107	136	144	135	124	105
Gas de tragante													
Temperatura, °C	155	155	155	155	172	157	156	163	155	169	157	146	164
Presión, kg/cm ²	1,63	1,77	1,91	1,94	1,99	1,93	1,90	1,91	1,92	1,91	1,91	1,92	1,83
CO, %	21,91	21,25	21,24	19,72	21,58	20,86	21,39	21,62	21,83	22,52	23,14	21,96	22,01
CO ₂ , %	19,54	20,05	19,73	19,64	20,95	20,64	20,74	21,08	21,73	21,38	21,90	22,56	20,18
H ₂ , %	2,43	3,04	3,37	2,51	2,79	2,79	2,69	3,27	4,38	4,41	4,12	3,88	3,68
Contenido en el arrabio, %													
Si	0,62	0,55	0,71	0,73	0,49	0,49	0,55	0,57	0,53	0,53	0,48	0,42	0,50
Mn	0,39	0,40	0,34	0,34	0,38	0,44	0,53	0,47	0,51	0,50	0,52	0,43	0,54
S	0,031	0,032	0,027	0,023	0,033	0,027	0,028	0,037	0,035	0,029	0,034	0,029	0,024
P	0,065	0,065	0,060	0,061	0,058	0,057	0,059	0,058	0,057	0,060	0,061	0,054	0,056
Temperatura del arrabio, °C	1.494	1.494	1.505	1.504	1.494	1.493	1.489	1.487	1.486	1.485	1.481	1.485	1.483
Volumen de escoria, kg/ta													
Contenido en la escoria, %													
CaO	39,92	40,83	40,39	40,45	40,00	40,59	40,19	40,29	40,52	40,75	40,54	41,12	40,96
SiO ₂	35,61	34,98	35,48	35,50	35,57	35,43	35,38	35,74	35,69	35,62	35,48	33,63	33,02
MgO	8,00	7,72	7,78	7,59	7,82	7,88	7,04	7,30	7,16	7,67	7,52	7,48	7,82
Al ₂ O ₃	11,71	11,66	11,64	11,87	11,78	11,05	12,45	11,42	11,16	10,91	11,32	12,45	13,02
S	0,77	0,75	0,86	0,85	0,87	0,91	0,91	0,93	0,99	0,89	0,84	0,98	0,98
FeO	0,49	0,57	0,44	0,43	0,45	0,49	0,66	0,66	0,56	0,52	0,54	0,49	0,42
MnO	0,39	0,45	0,33	0,28	0,42	0,47	0,55	0,55	0,62	0,54	0,66	0,49	0,48
K ₂ O	0,46	0,37	0,37	0,38	0,39	0,39	0,41	0,40	0,43	0,41	0,39	0,44	0,37
Na ₂ O	0,17	0,12	0,17	0,19	0,13	0,18	0,20	0,21	0,21	0,21	0,14	0,15	0,15
TiO ₂	0,45	0,44	0,42	0,41	0,47	0,44	0,45	0,45	0,45	0,47	0,50	0,52	0,50
Basicidad (CaO/SiO ₂)(-)	1,12	1,17	1,14	1,14	1,13	1,15	1,13	1,13	1,14	1,15	1,14	1,23	1,24
Productividad, t/m ³ ·24 h	1,76	2,39	2,45	2,39	2,61	2,61	2,61	2,61	2,70	2,74	2,73	2,67	2,47
Parámetros calculados													
Grado de utilización, %													
CO	47,1	48,5	48,2	49,9	49,3	39,7	49,2	49,4	49,9	48,7	48,6	50,7	47,8
H ₂	42,6	47,0	52,8	59,1	64,8	64,5	66,7	57,3	49,4	50,4	52,9	53,6	50,6
Relación CO/H ₂ (-)	0,90	0,97	1,10	1,19	1,33	1,30	1,35	1,16	0,99	1,04	1,09	1,06	1,06
Grado reducción directa, %	50,0	47,8	45,2	39,9	38,4	35,9	34,9	40,1	41,3	41,4	41,2	40,7	44,7
Coque quemado en el raceway, kg/ta	308	263	239	280	224	241	232	226	200	194	173	187	227
Utilización del calor del carbón, (%)	26,3	39,9	40,0	41,2	38,6	39,9	39,4	38,9	39,0	38,6	36,9	38,9	39,1
Volumen gas reductor, m ³ /ta	612	645	703	716	739	745	733	700	674	680	669	645	691
Temperatura de llama, °C	2.271	2.217	2.124	2.189	2.143	2.142	2.149	2.133	2.112	2.118	2.138	2.176	2.126
Tasa de coque en la carga, % vol.	55,9	51,7	49,3	51,3	48,1	48,2	48,1	48,8	46,7	46,3	46,6	47,4	49,5
Total combustible, kg/ta	525	523	522	522	517	520	526	521	523	523	523	523	523
Coef. Sust. Coque/carbón (-)	-	0,83	1,00	0,96	1,00	1,03	0,93	1,00	0,98	0,96	0,95	0,93	0,92

Tabla III. Análisis de la carga para el HA-B Gijón

Table III. Burden analysis for BF-B Gijón

Carga	Fe _{total}	CaO	SiO ₂
Sínter	57	9,8	5,3
Pelets	59	2,2	2,2
Mineral Tazadit	63	0,11	8,6
Mineral Carajas	66	0,10	0,5

Las razones señaladas son decisivas para la disminución lineal del consumo de coque y el aumento de la productividad del horno al aumentar la tasa de ICP (Fig. 2). La experiencia de operación de una serie de hornos en Alemania, Reino Unido, Corea del Sur y otros países confirma la posibilidad de una disminución lineal del consumo de coque al aumentar la tasa de CP a 180-200 kg/ta^[23-25].

También es un resultado positivo la reducción y una cierta disminución del consumo total de combustible (poder calorífico 7.000 kcal/kg).

El grado de reducción directa r_d disminuye en un 10 % para una tasa de inyección de 100 kgCP/ta. Esta disminución considerable en el valor de r_d se explica por el aumento del contenido de agentes reductores (CO y H₂) en el gas de tobera y por el aumento del tiempo de contacto de los gases reductores con los óxidos como resultado de la disminución del consumo de coque en la carga.

El aumento de la tasa de CP se acompaña con la mejora en la utilización de la energía química de la corriente gaseosa, y, en particular, en la capacidad reductora del CO e H₂.

Con la ICP no es necesario mantener la temperatura de llama en el nivel inicial^[26]. La máxima efectividad de utilización del CP se alcanza con una disminución determinada en la temperatura de llama. Esto se explica con la intensificación de los procesos de reducción en la cuba, la disminución del grado de reducción directa y, como resultado de ello, disminuye la necesidad de calor para el calentamiento de los productos líquidos (arrabio y escoria) en el crisol. La radiación de las partículas de carbón que experimentan la combustión en el *raceway* intensifica el intercambio térmico en la parte inferior del horno y ofrece la posibilidad de una disminución complementaria de la temperatura de llama.

Los cálculos muestran, que la reducción total de la temperatura de llama es de 70-100 °C por cada 100 kgCP/ta, lo que permite mantener un nivel

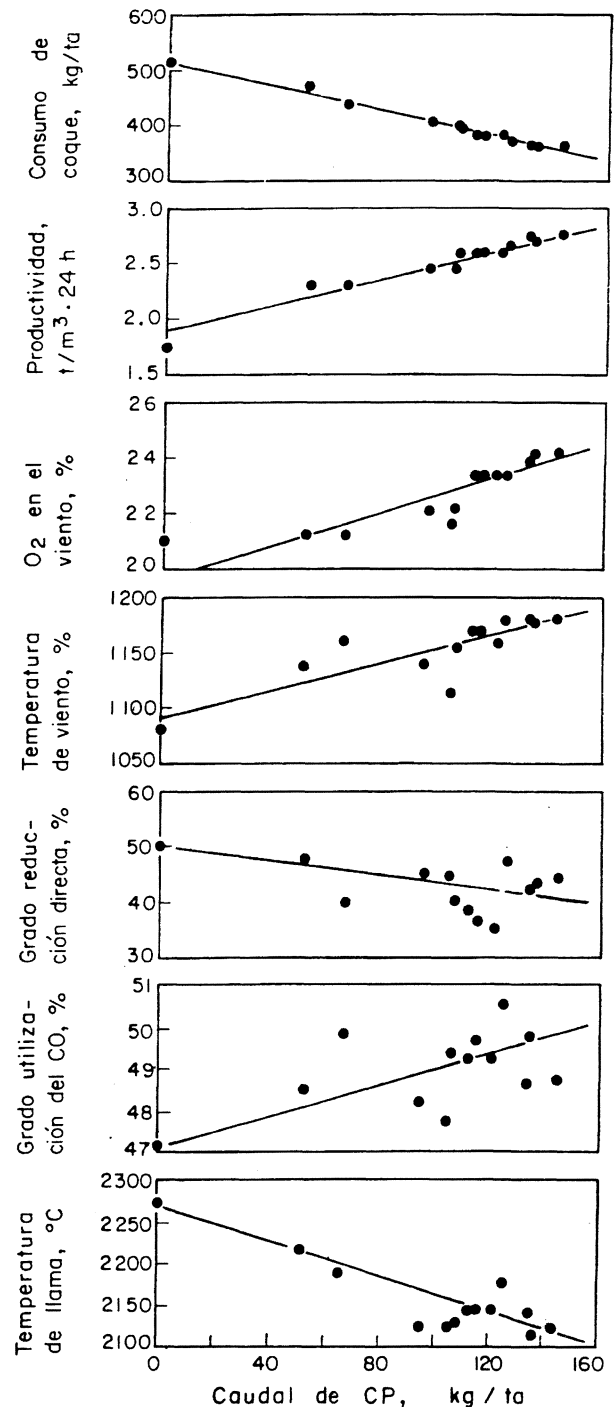


Figura 2. Dependencia de la tasa de ICP sobre los parámetros de operación del HA-B Gijón.

Figure 2. Dependence of main operating BF-B Gijón parameters on PC rate.

constante de temperatura del arrabio y de la escoria^[26].

La experiencia de otros hornos altos y la propia operación del HA-B confirma esta suposición teórica. La reducción de los requerimientos térmicos en el crisol, como resultado de la disminución del grado de reducción directa y del aumento de la

radiación en el *raceway*, así como de una pequeña disminución en el contenido de silicio en el arrabio, permiten el calentamiento suficiente del arrabio y una alta productividad del horno para una disminución de la temperatura de llama de 90-100 °C por cada 100 kgCP/ta (Fig. 2).

2.2.2. Balance térmico

El balance térmico del HA-B se ha realizado mensualmente durante 1997. En la tabla IV se muestran, para simplificar, los valores medios y se comparan con los datos de 1996. En la figura 3 se observa que el análisis del balance térmico del horno muestra una disminución en las necesidades de calor del horno alto que opera con ICP. Esto se explica, fundamentalmente, por la disminución del valor de r_d y por el aumento del grado de utilización del monóxido de carbono. Esto genera una disminución media del calor de 250 kJ por cada 100 kgCP/ta, incluyendo 150 kJ de la combustión de combustible.

2.2.3. Balance de materias

El balance de materias del HA-B se realizó mensualmente para 1997. En la tabla V se puede observar, de forma simplificada, la media de estos valores. El análisis del balance de materias confirma que, la entrada total de materias disminuye en 300

Tabla IV. Balance térmico del HA-B Gijón

Table IV. Heat balance for BF-B Gijón

	1996		1997	
	kJ/kg	%	kJ/kg	%
Calor generado:				
1. Combustión de combustibles	3.016	27,40	2.934	26,64
2. Calor que lleva el viento	2.012	18,28	1.858	16,86
3. Total en el área de combustión (1+2)	5.028	45,67	4.792	43,50
4. Total en el área de reducción	5.980	54,33	6.223	56,50
5. Total de calor generado (3+4)	11.008	100	11.015	100
Calor absorbido:				
6. Disociación de óxidos, carbonatos, hidratos	7.650	69,50	7.451	68,46
7. Calor del arrabio	1.256	11,41	1.256	11,40
8. Calor de la escoria	512	4,70	458	4,16
9. Calor total absorbido	9.423	85,61	9.255	84,02
10. Calor en gas del tragante	378	3,43	368	3,34
11. Pérdidas de calor [5 - (9+10)]	1.207	10,96	1.392	12,64
12. Total de calor absorbido (9+10+11)	11.008	100	11.015	100

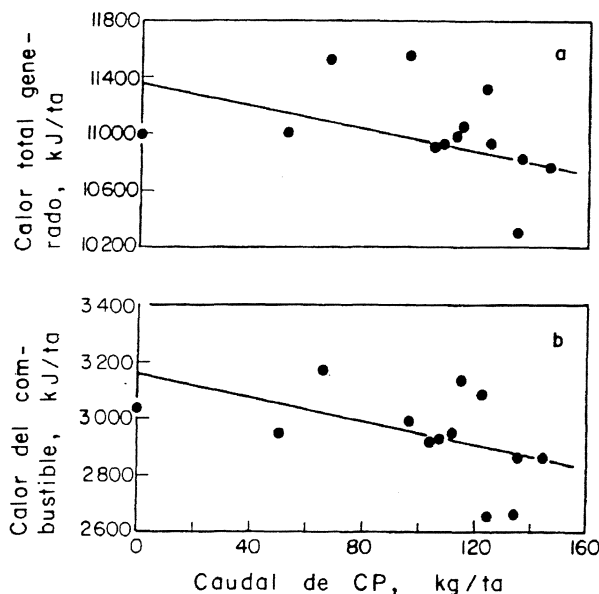


Figura 3. Dependencia de la tasa de ICP sobre el total de calor generado (a) y el calor de combustión de los combustibles (b) del HA-B Gijón.

Figure 3. Dependence on total heat generated (a) and heat of fuel combustion (b) on PCI rate for BF-B Gijón.

kg/ta por cada 100 kgCP/ta (Fig. 4a). Una de las causas que permiten la disminución del volumen de carga es el crecimiento de la concentración de oxígeno en el viento. La disminución de la entrada

Tabla V. Balance de materiales del HA-B Gijón, kg/ta

Table V. Material balance for BF-B Gijón, kg/tHM

Materiales	Total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P
Entrada (totales)	3.480	94,65	29,44	3,245	0,697
Sínter	924	48,16	11,99	0,084	0,343
Pelets	529	13,34	2,77	0,021	0,187
Mineral Tazadit	44	3,33	0,40	0	0,011
Mineral Carajas	109	0,54	0,97	0	0,075
Fúndente	7	2,85	0,20	0	0,003
Coque	392	22,15	10,72	2,319	0,066
CP	109	4,28	2,39	0,821	0,012
Viento seco	1.332	-	-	-	-
Humedad en viento	34	-	-	-	-
Salida (totales)	3.456	102,36	29,91	2,607	0,613
Arrabio	1.000	11,53	0	0,300	0,590
Escoria	241	87,42	28,99	2,217	0
Gas de tragante	2.094	-	-	-	-
Polvo de tragante	13	3,02	0,92	0,080	0,004
Humedad de la carga	19	-	-	-	-
Pérdidas de metal	32	0,39	0	0,010	0,019
Vapor	57	-	-	-	-
Error (totales)	24	-7,71	-0,47	0,638	0,084

de SiO₂ ocurre debido al coque y al CP, y conduce a una pequeña disminución del volumen de escoria en 5-8 kg/ta ó 2-3 % (ver figura 4b).

La entrada total de azufre aumenta un poco, pero la entrada de azufre con el coque y el CP, prácticamente, no varía (Fig. 4c). El error en el balance de azufre se explica, posiblemente, por las altas salidas de azufre con el gas de tragante. En las condiciones de Ucrania, la salida de azufre con el gas de tragante es del 5-10 % pero, con un bajo volumen de escoria, baja basicidad de la escoria (CaO/SiO₂ < 1,15-1,20) y ausencia de caliza en la carga, esta magnitud puede aumentar hasta un 20 % y más.

2.2.4. Desulfuración del arrabio

El proceso de desulfuración del arrabio en el horno alto se caracteriza por el coeficiente de distribución del azufre $L_s = (S)/[S]$ y el grado de acercamiento al equilibrio de la reacción de desulfuración $\sigma = L_s/L_s^o$, donde L_s^o coeficiente de equilibrio de distribución del azufre entre el arrabio y la escoria [27]:

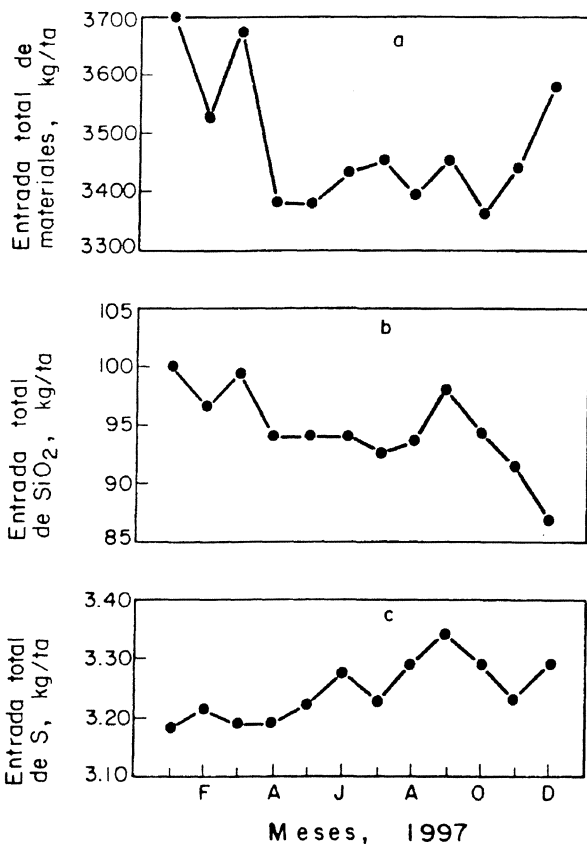


Figura 4. Balances de materias de entrada (a), SiO₂ (b) y de azufre (c) para el HA-B Gijón.

Figure 4. Material balances of material input (a), SiO₂ and sulphur input (c) for BF-B Gijón.

$$\lg L_s^o = 8,45 \lg B + 2000/T - 0,68 + (f_s / P_{co}),$$

donde, T - temperatura del sistema arrabio-escoria, K

f_s - actividad del azufre en el arrabio

P_{co} - presión parcial del CO, atm

B - índice de basicidad de la escoria:

$$B = \frac{(CaO) + 1,5(MgO) - 1,75(S)}{(SiO_2) + 0,6(Al_2O_3) \frac{(CaO) + 1,5(MgO) - 1,75(S)}{SiO_2}}$$

En las condiciones estudiadas de operación del HA-B, la magnitud $L_s = 24 - 40$, y $\sigma = 70 - 100$ %, para un contenido de azufre en el arrabio, en el rango de 0,025-0,035 %. El aumento de la basicidad de la escoria CaO/SiO₂, en el rango de 1,12-1,24 mejora las condiciones de desulfuración del arrabio (Fig. 5a). La ausencia de un extremo en el gráfico de la figura 5a se explica por la viscosidad más baja de la escoria, debido a la alta temperatura y suficiente contenido de MgO (7,5-8,0 %) en la escoria.

El aumento del volumen de escoria empeora las condiciones de desulfuración del arrabio (Fig. 5b).

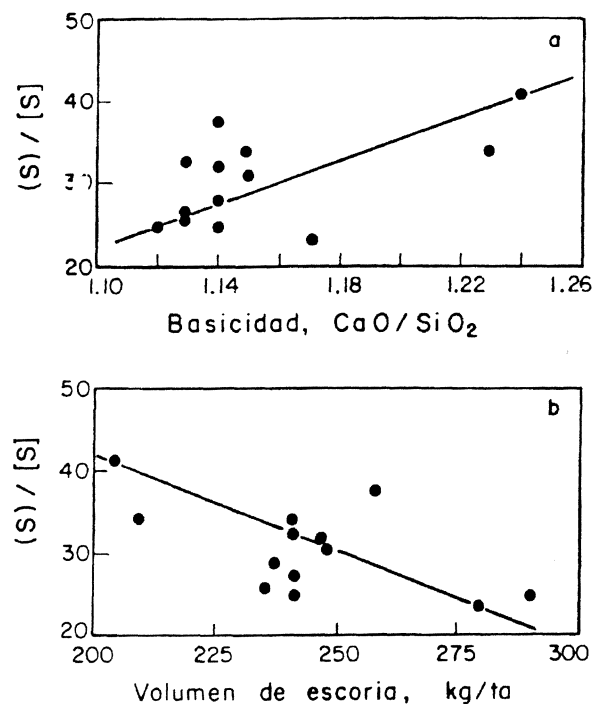


Figura 5. Dependencia del coeficiente de distribución de azufre sobre la basicidad (a) y el volumen de escoria (b) para el HA-B Gijón.

Figure 5. Dependence on coefficient of sulphur distribution on slag basicity (a) and slag volume (b) for BF-B Gijón.

Es probable que esto se relacione con el empeoramiento de la velocidad del transporte por difusión del azufre, a lo largo de una capa de escoria de mayor espesor.

La entrada de fósforo con la carga es de 0,67-0,72 kg/ta; el contenido de fósforo en el arrabio es de aproximadamente 0,06 %.

2.2.5. Consumo de coque

Los parámetros de operación del HA-B con tasa de ICP de 190 kg/ta (el nivel máximo está determinado por la capacidad de la planta de ICP) se calcularon usando un modelo matemático de la Universidad Estatal Tecnológica de Donetsk^[28], basado en el balance complejo del Prof. Ramm^[29]. Como referencia base, se tomaron los parámetros mensuales de operación del horno durante 1997.

Los resultados del cálculo muestran que, el consumo de coque puede ser reducido hasta 330 kg/ta (variante I en la tabla VI) con la compensación de la disminución de la temperatura de llama mediante la concentración de oxígeno en el viento o, hasta 324 kg/ta (variante II en la tabla VI), con la compensación de la temperatura potencial en el crisol mediante un determinado aumento en el contenido de oxígeno y la disminución de la humedad en el viento. Las ventajas de la variante I están dadas por un aumento elevado en la productividad del horno y por las mejores condiciones de gasificación de las partículas de carbono en el *raceway*, aunque la economía de coque sea de 6 kg/ta menos que en la variante II.

Tabla VI. Parámetros de operación calculados para el HA-B Gijón

Table VI. Calculated operating parameters for BF-B Gijón

Parámetros	1997	I	II
Viento			
Temperatura, °C	1163	1163	1163
Humedad, g/m ³	31,6	31,6	20,0
O ₂ , %	23	27	25
ICP, kg/ta	111	190	190
Grado reducción directa, %	40,0	35,6	37,5
Temperatura gas de tragante, %	159	134	154
Consumo de coque, kg/ta	390	330	324
Productividad, %	100	109,5	106

3. OPERACIÓN DEL HA-1 FSD CON ICP EN CONDICIONES DESFAVORABLES

3.1. Condiciones de operación del horno y metodología de experimentación

Los HA-1 y HA-2 de la fábrica siderúrgica de Donetsk, que tienen, cada uno, un volumen útil de 1.033 m³ operaban desde hace 15 años con inyección simultánea de gas natural (GN) y CP en el crisol. El CP se prepara a partir de un concentrado de hullas magras. Al operar con inyecciones de 85-100 m³GN/ta y 80-90 kgCP/ta, con viento enriquecido hasta un 25-26 % en oxígeno, el consumo de coque es de 370-390 kg/ta y la productividad de los hornos alcanza 1.750-1.850 t/24 h^[18, 30 y 31].

En 1995 empeora notablemente la calidad de la carga férrea (disminuye el contenido de hierro y aumenta la cantidad de finos < 5 mm). Por ejemplo, el contenido de hierro total era de 52 %, con un FeO = 12-13 %, y SiO₂ = 11 %. A causa de esto, el volumen de escoria aumenta hasta 500-600 kg/ta, empeoran las propiedades físicas de la escoria, la desulfuración del metal y las condiciones gasodinámicas de funcionamiento de los hornos. Debido a las condiciones desfavorables de escoria y gasodinámicas se interrumpe la ICP. Sin embargo, al ocurrir una reducción en el suministro de GN en Ucrania y un brusco aumento de precio, también fue necesario interrumpir su inyección por toberas en el crisol. Esto, a su vez, requiere disminuir la temperatura del viento de 1.100 a 700-750 °C, por cuanto la temperatura óptima de llama aumenta considerablemente debido a la interrupción de la inyección de los combustibles auxiliares. Las causas señaladas provocan un aumento del consumo de coque en 1,5 veces y más, con caídas significativas en la productividad del horno y en la intensidad de fusión.

En 1996, para mejorar los índices técnicos y económicos de operación se decide reanudar en el HA-1 FSD la inyección de CP y estudiar la posibilidad de aumentar al máximo su tasa de inyección.

La tasa de ICP se aumenta gradualmente. En una 1^a etapa (primera quincena de Febrero) alcanza 80 kg/ta; en la 2^a etapa (segunda quincena de Febrero), 140 kg/ta; en la 3^a etapa (Marzo), 180-190 kg/ta y en la 4^a etapa (Mayo) el horno, en determinados días, opera con tasas de 200-230 kgCP/ta.

En la tabla VII se muestran tres períodos sucesivos de operación del HA-1 con diferentes niveles de ICP (período I: 7-14 febrero; II: 20-27 febrero y

Tabla VII. Parámetros de operación del HA-1 de la fábrica siderúrgica de Donetsk

Table VII. Parameters of BF-1 operation at Donetsk Steel Plant

Parámetros	Períodos			
	Base	I	II	III
Consumo materiales, kg/ta				
Sínter	872	1005	718	677
Pelets	942	782	991	944
Mineral de hierro	51	27	61	42
Chatarra	11	61	49	77
Escoria de SiMn	72	91	65	61
Caliza	252	296	296	233
Coque	674	619	256	450
Viento				
Volumen, m ³ /ta	1.790	1.814	1.959	1.928
Temperatura, °C	705	833	915	964
Presión, kg/cm ²	2,03	2,32	2,38	2,49
Humedad, g/m ³	8,0	9,5	9,8	10,3
ICP, kg/ta	0	78	140	177
Gas de tragante				
Volumen, m ³ /ta	2.684	2.473	2.336	2.003
Temperatura, °C	230	225	238	234
Presión, kg/cm ²	1,16	1,20	1,22	1,27
Productividad, t/m ³ ·24 h	0,91	1,07	1,23	1,33
Grado de utilización, %				
CO	31,7	34,4	34,6	36,2
H ₂	41,5	37,0	63,8	61,7
Grado reducción directa, %	54,3	42,6	28,8	26,8
Temperatura de llama, °C	2.132	2.166	2.095	2.080
Análisis del arrabio, %				
Si	1,16	1,11	0,97	1,09
Mn	0,74	0,88	0,78	0,88
S	0,048	0,042	0,029	0,033
P	0,050	0,051	0,049	0,049
Análisis de escoria, %				
CaO	48,0	48,1	48,8	48,6
SiO ₂	36,9	37,3	38,1	37,8
MgO	3,3	3,9	4,0	4,2
Al ₂ O ₃	6,7	6,4	6,5	6,6
Basicidad (CaO/SiO ₂)	1,30	1,28	1,28	1,29

III: 28 febrero-10 marzo). Para comparación se toma como período base la operación de este horno en Febrero de 1995. La composición de los materiales férricos de la carga en el período estudiado se incluye en la tabla VIII. El análisis promedio del carbón inyectado era, en %: C_{fijo} = 75; MV = 13; S = 1,8; ceniza = 11.

Para optimizar los índices tecnológicos del proceso se realiza un análisis estadístico de los datos

Tabla VIII. Análisis químico y fracción < 5 mm en la carga del HA-1 FSD, % en peso

Table VIII. Chemical and fractional analysis of the burden for BF-1 DSP, wt %

Componentes	Fe _{total}	CaO	SiO ₂	Fracción (0-5 mm)
Sínter	52	12,5	11	18
Pelets SevGOK	59,8	4,5	8,6	5
Pelets Mihailovskii	63	1,5	7,5	4

de operación. Como ensayo patrón se considera un turno (8 h) de funcionamiento del horno. Los resultados del análisis de los datos se muestran en las figuras 6-9. La productividad en el período base se establece como 100 %.

La eficiencia de la tecnología adoptada se valora también mediante los balances térmico y de materias.

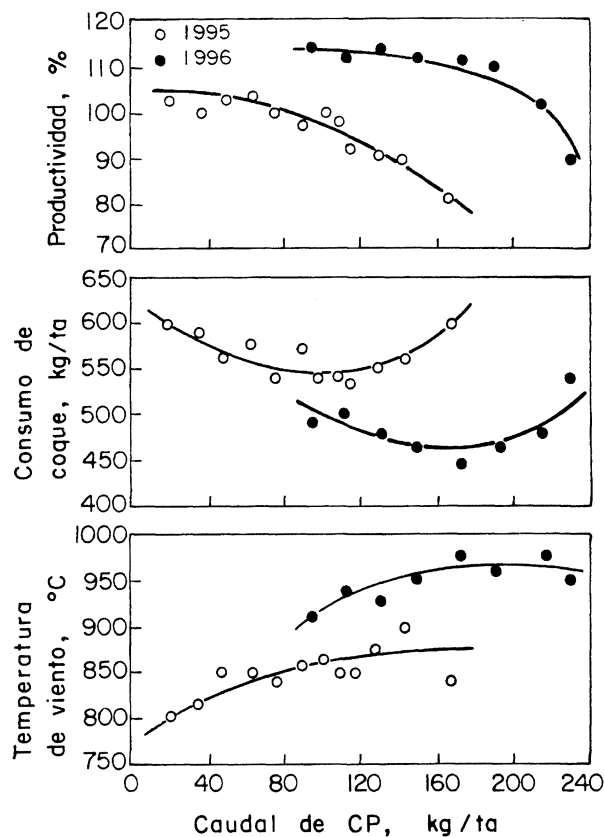


Figura 6. Dependencia de la tasa de ICP sobre los parámetros de operación del HA-1 FSD.

Figure 6. Dependence of main operating BF-1 FSD parameters on PC rate.

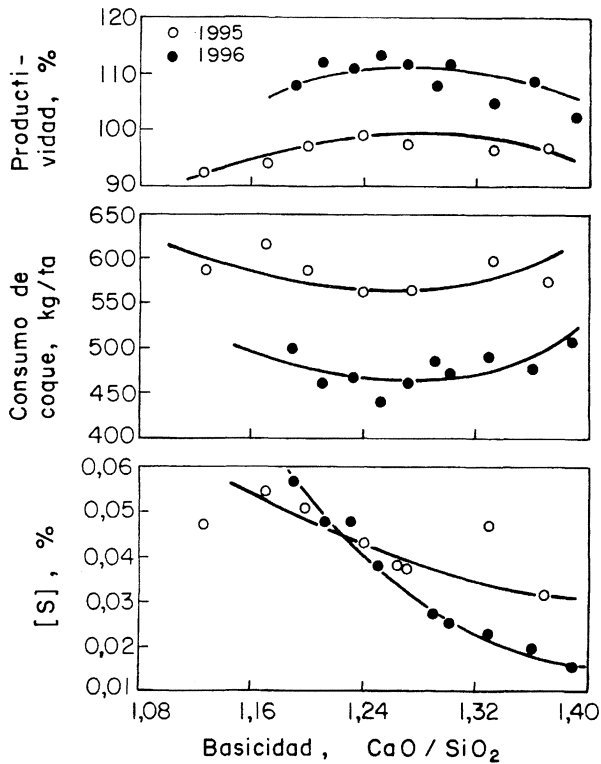


Figura 7. Dependencia de la basicidad de la escoria sobre los parámetros de operación del HA-1 FSD.

Figure 7. Dependence of main operating BF-1 FSD parameters on slag basicity.

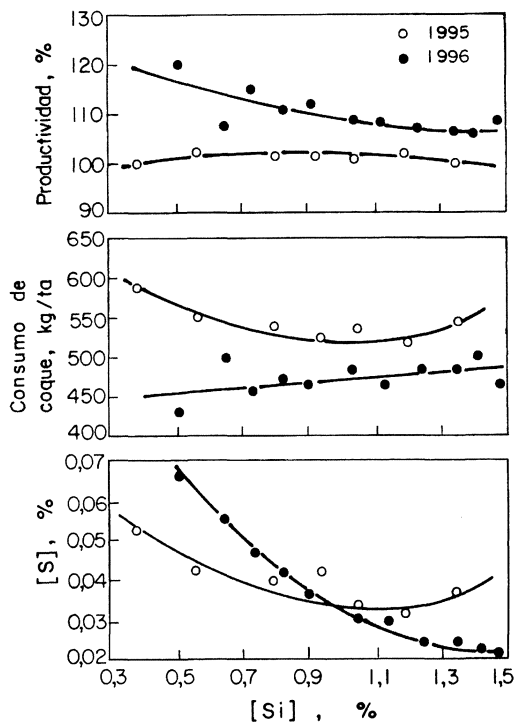


Figura 8. Dependencia del contenido de silicio en el arrabio sobre los parámetros de operación del HA-1 FSD.

Figure 8. Dependence of main operating BF-1 FSD parameters on silicon content in pig iron.

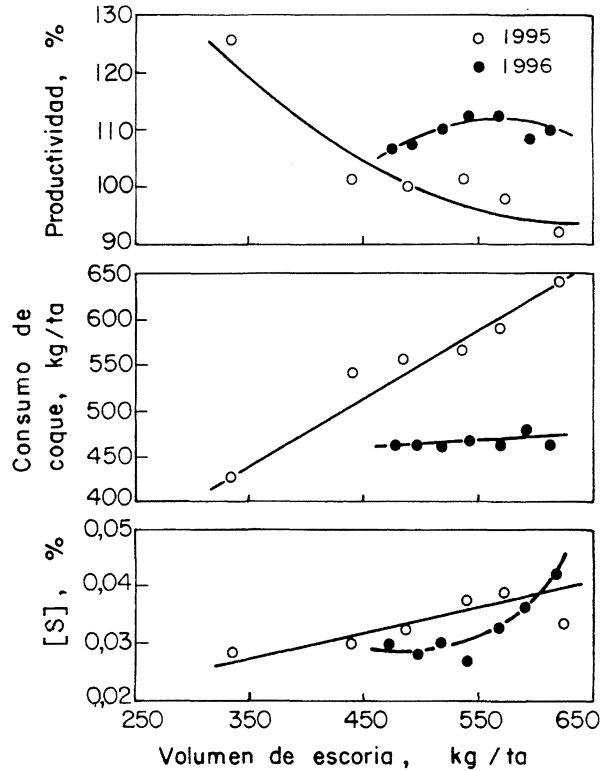


Figura 9. Dependencia del volumen de escoria sobre los parámetros de operación del HA-1 FSD.

Figure 9. Dependence of main operating BF-1 FSD parameters on slag volume.

3.2. Resultados de los ensayos industriales

La dependencia de los principales parámetros del HA-1 FSD con la ICP, a diferencia a los del HA-B Gijón, tiene un carácter extremo y no lineal.

Para una cierta tasa de CP, característica de unas condiciones determinadas, el coeficiente de sustitución de coque por carbón K_s es cero y para un aumento posterior de la tasa de ICP, toma un valor negativo (Fig. 6). En este caso, no sólo aumenta el consumo de coque sino que disminuye la productividad del horno, y como regla, empeora la calidad del arrabio.

En 1995, al aumentar la tasa de ICP por encima de 80 kg/ta, empeoraron los parámetros técnicos y económicos de operación del horno. Esto se explica por la baja calidad de la carga férrea: la cantidad de fracciones finas (0-5 mm) en el sinter alcanzaba el 20-25 %; bajo contenido de Fe_{total} y alto de SiO_2 , lo que provocaba un volumen elevado de escoria y composiciones desfavorables de las escorias primaria y final. Cuando se sobrepasaba la tasa de ICP, idónea para estas condiciones, las causas antes enumeradas provocaban alteraciones en el régimen gasodinámico de fusión y en el descenso irregular de la

carga y, como consecuencia, se produjo un empeoramiento de los parámetros de operación del horno.

En 1996 se logra una cierta mejora en las condiciones gasodinámicas de fusión al aumentar el porcentaje de pelets en la carga hasta 50-70 %, elevar la temperatura del viento hasta 920-960 °C y el humedecimiento del viento con vapor. Además, se disminuyeron las oscilaciones del contenido de cenizas en el CP. Como resultado la tasa extrema de ICP se desplaza a la derecha (Fig. 6), y el valor óptimo de la tasa de ICP se establece en 160-180 kg/ta.

La interacción entre otros parámetros de operación también tiene carácter extremo. Esto se confirma con los resultados del análisis estadístico de los datos de operación (Figs. 7-9).

3.2.1. *Basicidad de la escoria*

La variación de las condiciones tecnológicas no provoca cambios notables en los valores óptimos de la basicidad, que estaban comprendidos entre 1,24 y 1,28. Sin embargo, en 1996, se amplían las posibilidades para disminuir el contenido de azufre en el arrabio basándose en el aumento de la basicidad de la escoria. En todos los períodos igualmente se observa el aumento del consumo de coque cuando la basicidad excede el nivel óptimo, lo que, probablemente, está relacionado con el empeoramiento de las condiciones de descenso de la carga y con la inestabilidad del régimen tecnológico (Fig. 7).

3.2.2. *Contenido de silicio en el arrabio*

La baja calidad de la carga y una composición desfavorable de las escorias condujeron a la necesidad de operar el horno con un alto calentamiento del crisol y, por consiguiente, con un elevado contenido de silicio en el arrabio. En 1996, la inyección de tasas elevadas de CP, permitió reducir el contenido de silicio en el arrabio de 1,15-1,20 a 0,95-1,10 % (Fig. 8). En este caso, no sólo se logra disminuir el consumo de coque en 60-80 kg/ta, y un crecimiento de la productividad del 10 %, sino que, además, se produce una notable mejora en la calidad del arrabio debido al contenido bajo de azufre.

3.2.3. *Volumen de escoria*

El estudio de los períodos confirma la eficiencia y racionalidad de disminuir el volumen de escoria. En primer lugar esto permite mejorar la calidad del arrabio por el contenido de azufre. Sin embargo,

en 1996 la dependencia del consumo de coque y la productividad con el volumen de escoria, para oscilaciones de 450 a 650 kg/ta, se expresa débilmente (Fig. 9). Esto se puede explicar por el aumento de la estabilidad del régimen tecnológico.

3.2.4. *Balance de materias*

Los balances de materias y térmico confirman la efectividad de la operación del horno con tasas elevadas de ICP.

Los períodos investigados se caracterizan por unos contenidos elevados de azufre en la carga (Fig. 9), lo que requiere que el HA opere con una escoria de basicidad elevada. Más del 80-85 % del azufre se introduce en el horno con el coque y el CP. El balance muestra la necesidad y efectividad de utilizar carbones bajos en ceniza, y en particular bajos en azufre, para la preparación del CP. Esto permite, en combinación con otras medidas, disminuir el aporte de azufre y mejora las condiciones tecnológicas de operación.

El coeficiente de distribución del azufre se encuentra en el rango $L_s = 45-70$ para un alto grado de aproximación al equilibrio $\sigma = 70-100$ %.

El contenido de fósforo en el arrabio es del 0,05 % y el aporte en los materiales de la carga es de 1,24-1,44 kg/ta (Tabla IX). El mencionado nivel de aportación de fósforo y su distribución en los productos de la fusión son favorables para la elaboración de arrabio de alta calidad.

Las pérdidas considerables de fósforo con el polvo de tragante no se pueden explicar tecnológicamente, y, posiblemente, son consecuencia de errores en los análisis químicos y en los balances.

El análisis del balance térmico confirma una mejora significativa en los parámetros de operación con tasas de inyección de 179 kgCP/ta (Tabla X). Se confirma un aumento en el grado de utilización del CO (superior al 5 %) y la reducción indirecta de los óxidos de hierro mediante CO e H₂, así como la disminución de las pérdidas de calor con el agua de enfriamiento y la radiación.

La disminución del grado de reducción directa del hierro r_d , que es en más del doble, (de 54,3 a 26,8 %), con una disminución notable en el volumen del gas de tobera, confirma los cambios favorables para las condiciones de reducción de los óxidos de hierro. La temperatura de llama se aproxima a los rangos óptimos de la FSD (2.000-2.100 °C).

Sobre esta base los datos expuestos confirman la efectividad de las medidas aplicadas y en

Tabla IX. Balance de azufre y fósforo del HA-1 FSD
Table IX. Balance of sulphur and phosphorus for BF-1 DSP

	Base		I etapa		II etapa		III etapa		
	Material, kg/ta	Elemento %	Material, kg/ta	Elemento kg/ta	Material, kg/ta	Elemento kg/ta	Material, kg/ta	Elemento kg/ta	
Azufre									
Entrada (totales)			14,493		15,169		13,923		13,130
Sinter	872	0,134	1,168	1.005	1,347	718	0,962	677	0,907
Pelets	942	0,053	0,499	782	0,414	991	0,525	944	0,500
Mineral de hierro	51	0,069	0,035	27	0,019	61	0,042	42	0,029
Chatarra	11	0,200	0,022	61	0,122	49	0,098	77	0,154
Escoria SiMn	72	2,500	1,800	91	2,275	65	1,625	61	1,554
Caliza	252	0,100	0,252	296	0,296	296	0,296	233	0,233
Coque	674	1,590	10,717	619	9,161	526	7,785	450	6,525
CP	0	1,840	0	78	1,435	140	2,590	177	3,257
Salida (totales)			14,455		14,966		13,693		12,529
Arrabio	1.000	0,040	0,400	1.000	0,420	1.000	0,290	1.000	0,330
Escoria	591	2,170	12,825	660	13,464	597	12,358	515	11,124
Chatarra	76	0,040	0,030	76	0,032	51	0,015	16	0,005
Polvo de tragante	120	1,000	1,200	105	1,050	103	1,030	80	0,800
Error, kg/ta			0,038		0,013		0,230		0,871
Error, %			0,26		0,68		1,65		6,63
Fósforo									
Entrada (totales)			1,439		1,399		1,333		1,237
Sinter	872	0,065	0,567	1.005	0,653	718	0,467	677	0,440
Pelets	942	0,056	0,528	782	0,438	991	0,555	944	0,529
Mineral de hierro	51	0,082	0,041	27	0,021	61	0,049	42	0,033
Chatarra	11	0	0	61	0	49	0	77	0
Escoria SiMn	72	0,060	0,043	91	0,055	65	0,039	61	0,037
Caliza	252	0,023	0,058	296	0,068	296	0,068	233	0,053
Coque	674	0,030	0,203	619	0,148	526	0,126	450	0,108
CP	0	0,021	0	78	0,016	140	0,029	177	0,037
Salida			1,432		1,372		1,317		1,125
Arrabio	1.000	0,046	0,460	1.000	0,510	1.000	0,490	1.000	0,490
Escoria	591	0,010	0,059	660	0,091	597	0,048	515	0,041
Chatarra	76	0,046	0,034	76	0,039	51	0,025	16	0,008
Polvo de tragante	120	0,732	0,879	105	0,732	103	0,754	80	0,586
Error, kg/ta			0,007		0,027		0,016		0,112
Error, %			0,49		1,92		1,20		9,50

principio la posibilidad de un futuro aumento en las tasas de ICP.

CONCLUSIONES

- La inyección de CP en tasas de, hasta 135-145 kg/ta, en el HA-B Gijón, que opera con carga de calidad con elevados parámetros de viento combinado, facilita la disminución lineal del

consumo de coque con un coeficiente de su sustitución coque/carbón constante y elevado, $K_s \approx 1,0$ kg/kg. La dependencia de la productividad del horno y otros parámetros con la tasa de ICP, en el intervalo de 0 a 140 kg/ta, tiene un carácter lineal. Los cálculos muestran la posibilidad de disminuir el consumo de coque hasta 325-330 kg/ta con un incremento de la tasa de ICP hasta 190 kg/ta (este valor está limitado

Tabla X. Balance térmico del HA-1 FSD

Table X. Heat balance for BF-1 DSP

	Base		I		II		III	
	kJ/kg	%	kJ/kg	%	kJ/kg	%	kJ/kg	%
Calor generado								
1. Calor de combustión del carbono en toberas	4.389	36,35	3.635	29,33	3.270	25,70	2.255	20,34
2. Calor de combustión del CP en toberas	0	0	594	4,80	1069	8,40	1.345	12,13
3. Entalpía del CP	0	0	1	0,01	2	0,02	2	0,02
4. Entalpía del viento considerando el calor de disociación de la humedad	1.628	13,48	2.080	16,78	2.043	18,88	1.502	13,55
5. Total en combustión (1+2+3+4)	6.017	49,83	6.310	50,92	6.744	53,00	5.104	46,04
6. Calor de combustión C→CO	1.187	9,83	1.123	9,13	764	6,00	874	7,88
7. Oxidación CO→CO ₂	4329	35,85	4.406	35,71	4.141	32,54	3.886	35,05
8. Oxidación H ₂ →H ₂ O	543	4,43	554	4,22	1077	8,46	1.223	11,03
9. Total en reducción (6+7+8)	6.059	50,17	6.113	49,08	5.982	47,00	5.983	53,96
Total calor generado (5+9)	12.076	100	12.393	100	12.726	100	11.087	100
Calor absorbido								
1. Disociación de óxidos	7.346	60,48	7.287	58,80	7.296	57,33	7.271	66,58
2. Disociación de carbonatos	302	2,50	318	2,57	314	2,47	295	2,66
3. Eliminación del agua de hidratación	2	0,02	3	0,02	2	0,02	4	0,03
4. Entalpía del arrabio	1.256	10,40	1.256	10,14	1.256	9,87	1.256	11,33
5. Entalpía de la escoria	1.089	9,02	1.216	9,81	1.100	8,64	948	8,55
6. Total de calor absorbido (1+2+3+4+5)	9.995	82,79	10.080	81,34	9.968	78,33	9.774	88,16
7. Eliminación de la humedad de la carga	69	0,57	64	0,52	65	0,51	56	0,50
8. Producción de vapor	36	0,29	34	0,27	65	0,51	59	0,53
9. Entalpía de gas de tragante seco	1.013	8,37	932	7,52	880	6,92	755	6,81
10. Pérdidas de calor por enfriamiento del horno alto y al medioambiente	963	7,98	1.283	10,35	1.748	13,73	443	3,99
Total calor absorbido (6+7+8+9+10)	12.076	100	12.393	100	12.726	100	11.087	100

por la capacidad de la planta de inyección de carbón).

La dependencia del consumo de coque y otros parámetros con la tasa de CP en el HA-1 de la FSD, al operar con carga de baja calidad y condiciones desfavorables de viento, tiene un carácter extremo. La disminución del contenido de finos en la carga férrea, el aumento de la temperatura del viento y su humedecimiento con vapor permitieron desplazar los valores extremos del consumo de CP de 80 a 160-180 kg/ta.

- En ambos hornos estudiados se observa una notable disminución del grado de reducción directa r_d , lo que confirma una mejora en las condiciones de reducción de los óxidos de hierro con la ICP. El aumento del grado de utilización del monóxido de carbono y el hidrógeno (η_{CO} , η_{H_2}), así como el análisis de los balances térmicos de Gijón y la FSD confirman una mejora de los principales parámetros de operación.

- En ambos casos la inyección de CP se acompaña con una disminución de la temperatura de llama, debido a la intensificación de los procesos de reducción en la cuba y al aumento de la radiación en el *raceway*. En el HA-B Gijón esta disminución es más significativa debido al alto valor inicial de la temperatura de llama (2.270 °C) y a diferencias en el régimen tecnológico, en comparación con el HA-1 FSD.

- El trabajo de ambos hornos en el período investigado, se caracteriza por una alta calidad del arrabio elaborado.

El contenido de fósforo en el arrabio fue de 0,055-0,065 % en el HA-B Gijón y 0,05 % en el HA-1 FSD, a pesar de la gran cantidad de fósforo contenido en la carga de la FSD.

El contenido medio de azufre en el arrabio del HA-B Gijón fue de 0,025-0,035 % para una entrada de 3,2-3,3 kg/ta. La entrada de azufre con el combustible fue del 95-97 % del total y

no varía con la ICP. El contenido de azufre en el arrabio del HA-1 FSD al inyectar altas tasas de CP, disminuye de 0,048 a 0,029-0,033 %, a pesar del alto contenido de azufre en el carbón. Esto ocurre sobre la base de la disminución de la entrada total de azufre, incluyendo la disminución de la entrada con el combustible, así como a la mejora de las condiciones de desulfuración del arrabio como resultado de la optimización del régimen de escoria.

- La disminución del volumen de escoria contribuye a mejorar la desulfuración del arrabio, tanto en las condiciones de la FSD donde es de 500-600 kg/ta como en Gijón con una salida de 200-300 kg/ta. En ambos casos, el alto grado alcanzado en el equilibrio de las reacciones de desulfuración ($\sigma = 70-100 \%$), confirma la eficiencia de los procesos de desulfuración en los dos hornos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las fábricas siderúrgicas en Gijón y Donetsk por facilitar los datos de operación de los hornos altos.

REFERENCIAS

- [1] G. KOLB Y H. B. LÜNGEN, *Proc. 2nd Int. Cong. on Sci. and Tech. of Ironmaking and 57th Ironmaking Conf.*, vol. 57, Iron and Steel Society, Toronto, 1998, pp. 75-83.
- [2] N. PONGHIS, *Iron Steelmaker* 25, 8 (1998) 35-40.
- [3] J.-M. STEILER, *Proc. 2nd Int. Cong. on Sci. and Tech. of Ironmaking and 57th Ironmaking Conf.*, vol. 57, Iron and Steel Society, Toronto, 1998, pp. 161-173.
- [4] J. C. AGARWAL, F. C. BRONW, D. L. CHIN, G. S. STEVENS Y D. M. SMITH, *ICTS/Ironmaking Conf. Proc.*, vol. 58, Iron and Steel Society, 1999, pp. 105-134.
- [5] I. OKOCHI, A. MAKI, A. SAKAI, A. SHIMOMURA, M. SATO Y R. MURAI, *Proc. 4th European Coke and Ironmaking Congress*, 1st. vol., ATS, Paris, 2000, pp. 196-203.
- [6] H. TOXOPEUS, J. VAN DE STEL Y R. MOLENAAR, *Proc. 4th European Coke and Ironmaking Congress*, 1st. vol., ATS, Paris, 2000, pp. 204-211.
- [7] *Oil Gas J.* 84, 52-57 (1986) 34-37.
- [8] S. Z. AFONIN, YU. S. YUSFIN, P. I. CHERNOUSOV Y S. V. MURINEZ, *Metallurg* 8 (1998) 34-38.
- [9] L. GARCÍA, A. CORES, A. FORMOSO, A. BABICH Y S. YAROSHEVSKII, *Rev. Metal. (Madrid)* 34 (1998) 281-296.
- [10] V. A. NOZDRACHEV, A. FORMOSO, A. I. BABICH, S. L. YAROSHEVSKII Y L. GARCÍA, *Metallurg* 8 (1998) 41-44.
- [11] H. W. GUDENAU, T. YANG, T. ARIYAMA, K. KREIBICH, B. KORTHAS Y L. BIRKHÄUSER, *World Steel Metalworking* 10

- (1989) 92-97.
- [12] H. W. GUDENAU, B. KORTHAS, R. KIESLER Y L. BIRKHÄUSER, *Stahl Eisen* 110, 11 (1990) 35-40.
- [13] H. W. GUDENAU, F. R. S. AZEVEDO, L. BIRKHÄUSER, H.-G. RACHNER, H. DENECKE, L. F. SILVA Y S. WIPPERMANN, *Stahl Eisen* 117, 6 (1997) 61-68.
- [14] H. W. GUDENAU Y H. DENECKE, *Einblasen von Staeben in Schachtoefen. VDI-Seminar 43-20-05*, 1998, Düsseldorf, Alemania.
- [15] A. ISIDRO, A. FORMOSO, J. J. PIS, S. FERREIRA, E. FUENTE, J. M. RIVAS, L. GARCÍA Y A. CORES, *Proc. Conf. VIII Int. Conf. Coal Sci. Tech.*, vol. 1, Elsevier Science, Oviedo, España, 1995, pp. 551-554.
- [16] A. FORMOSO, A. ISIDRO Y A. CORES, *Modelling of gas and char flows at high PCI through experimental and theoretical studies of the raceway and the dead man*. ECSC Agreement N° 7210 AA/938, 1998.
- [17] S. L. YAROSHEVSKII, *Pig iron smelting using pulverized coal injection*, Ed. Metallurgiya, Moscú, 1988, p. 176.
- [18] V. P. TERESHCHENKO, V. A. NOZDRACHEV, S. L. YAROSHEVSKII, V. V. BRAGA, I. V. SHTUKARIN Y A. V. DIDEVICH, *Steel in Transl.* 22 (1992) 6-9.
- [19] A. BABICH, S. YAROSHEVSKII, L. GARCIA, A. FORMOSO, A. CORES, A. ISIDRO Y S. FERREIRA, *Rev. Metal. (Madrid)* 32 (1996) 103-116.
- [20] A. BABICH, S. YAROSHEVSKII, A. FORMOSO, A. CORES, L. GARCÍA Y V. NOZDRACHEV, *ISIJ Int.* 39 (1999) 229-238.
- [21] J. L. LAFUENTE, G. FERNANDEZ-PELLO Y P. HEINRICH, *MPT Int.* 21 (1998) 98-107.
- [22] *Technical Report of ACERALIA* Corporación Siderúrgica, (1.01.1997-31.12.1997), 75 p.
- [23] K.H. PETERS, H. MOHNKERN Y H.B. LÜNGEN, *Proc. 1st Int. Cong. Sci. Tech. Ironmaking, ISIJ*, Tokyo, Japón, 1994, pp. 493-499.
- [24] C.D. WALLIS, *Proc. Young European Blast Furnace Committee*, Taranto, 1999.
- [25] N. S. HUR, B. R. CHO, G.Y. KIM, J.S. CHOI Y K.S. HUR, *Proc. 3rd Int. Ironmaking Cong.*, Ghent, Belgium, 1996, pp. 128-135.
- [26] A. FORMOSO, A. BABICH, H. W. GUDENAU, L. GARCIA Y A. CORES, *ISIJ Int.* 39 (1999) 1134-1139.
- [27] I.S. KULIKOV, *Desulphurisation of pig iron*, Ed. Metallurgiya, Moscú, 1962, 306 p.
- [28] S.L. YAROSHEVSKII, A.I. BABICH Y G.N. SIDORENKO, *Methodic Instruction to Calculate a Blast Furnace Parameters*, Ed. DPI, Donetsk, 1991, 43 p.
- [29] A.N. RAMM, *Modern Blast Furnace Process*, Ed. Metallurgiya, Moscú, 1980, 304.
- [30] S. L. YAROSHEVSKII, A.I. BABICH, V.P. TERESHCHENKO, V. A. NOZDRACHEV Y Z. K. AFANASEVA, *Stal* 8 (1995) 11-17.
- [31] A. BABICH, S. YAROSHEVSKII, A. FORMOSO, A. ISIDRO, S. FERREIRA, A. CORES Y L. GARCIA, *ISIJ Int.* 36 (1996) 1250-1258.