

Aplicación del modelo de Rist y Meysson para determinar en tiempo real la eficiencia de los Altos Hornos de Cía.Siderúrgica Huachipato S.A. (CSH)

Mario Flores Flores¹

¹ Ingeniero Civil Químico, ex Superintendente de CAP Acero acuaticoc@gmail.com

Resumen. En este trabajo se presenta la aplicación del modelo de Rist y Meysson para el cálculo de la eficiencia química de la reducción de los óxidos de hierro en los Altos Hornos de la Compañía Siderúrgica Huachipato. Dicho modelo permite conocer cuan distante se encuentra el proceso operativo del límite impuesto por el equilibrio químico y por los balances de calor.

El modelo desarrollado mediante una planilla electrónica Excel puede leer directamente a través de interfases con el sistema PI toda la información de proceso proveniente de los sistemas de control y de los laboratorios, permitiendo al operador conocer la desviación del horno respecto al óptimo técnico posible. La recta de operación resultante de dicho modelo permite analizar de una manera fácil y directa la influencia del tipo y composición de la carga al horno como también la de múltiples parámetros operativos y cambios en la especificación del arrabio en la eficiencia del proceso y en los costos de producción.

Palabras Claves: alto horno, determinación eficiencia en tiempo real, modelo de Rist, optimización, recta de operación.

Abstract. The application of the Rist and Meysson model to the determination of the chemical efficiency of reduction of iron oxides in Cia. Siderúrgica Huachipato's Blast Furnaces is shown in this paper. This model allows to know how far is the process from the limits imposed by the chemical equilibrium and heat balances.

The model developed in an excel spreadsheet is able to read directly trough PI interfaces all the process information coming from the control systems and labs, allowing the operator to see the furnace deviation from the optimum technical feasibility. The operation line resulting from the model allows one to easily and directly analyze the influence of the kind and chemicals composition of the furnace burden as well as the multiple operating parameters and changes in hot metal specification in the process efficiency and production cost.

Keywords: blast furnace, online efficiency determination, operating diagram, optimization, Rist model.

1. Introducción.

Para un gran número de procesos de química industrial o de metalurgia, se posee un esquema de funcionamiento ideal que hace del equilibrio térmico el único límite impuesto a los intercambios de calor y de algunos equilibrios químicos el único límite impuesto a los intercambios de materia.

Una recta operatoria permite representar los balances de oxígeno, carbono y gas reductor para un Alto horno en régimen permanente. El consumo unitario de coque está ligado a la pendiente de esta recta.

2. Beneficios.

Un esquema de ese tipo rinde el doble servicio de fijar el fin último de los perfeccionamientos técnicos y proporcionar un término de comparación para definir el rendimiento de una instalación real.

A su vez la aplicación de este método gráfico permite estudiar fuera de línea tanto el efecto de variaciones de un parámetro operacional aislado, por ejemplo: temperatura del

viento caliente insuflado, inyección de gas natural, pre - reducción de la carga, como el efecto de variaciones acopladas en parámetros operativos, ejemplo: inyección de gas natural y aumento de la temperatura de viento, inyección de gas natural y enriquecimiento del viento con oxígeno, pre-reducción de la carga y enriquecimiento de minerales.

3. Antecedentes del Modelo de Rist.

El modelo de Rist y Meysson ha sido descrito ampliamente en la literatura (1-6). Con el propósito de entender el contexto de su aplicación se resumen a continuación brevemente los principios en los cuales está basado.

Basado en los trabajos de Kitaev (7, 8) y de Michard (9-3), el modelo al cual nos referimos sirve de base para el cálculo del consumo unitario teórico de carbono de un Alto horno. Dicho esquema dicta los balances de materia y balances térmicos que conviene establecer y conduce al modelo matemático de Michard

3.1. Esquema de funcionamiento ideal del Alto horno

El esquema a que conducen los trabajos de Kitaev y de Michard se resume en cuatro puntos principales:

- a) Las reacciones del Carbono
- b) Los intercambios de calor
- c) Los requerimientos térmicos y los balances por zonas
- d) Los intercambios de oxígeno por reducción indirecta.

Las reacciones del Carbono:

- El carbono del coque puede considerarse como inerte químicamente hasta una temperatura característica de alrededor de 1000 °C.
- Aparte de la combustión exotérmica delante de las toberas, el carbono participa, a temperaturas sobre los 1000 °C, en importantes reacciones endotérmicas calificadas globalmente de reducción directa.
- La combustión y las reacciones directas gasifican el carbono en CO.

Los intercambios de calor:

- El calor desprendido por la combustión es cedido por el gas a la carga líquida o sólida en un intercambiador en contracorriente que va desde el nivel de toberas hasta el nivel de carga.
- Las reacciones endotérmicas de reducción directa, localizadas en las regiones por sobre 1000°C, varían la razón entre la capacidad calorífica de los sólidos con respecto a la capacidad calorífica de los gases.
- Dichas reacciones confieren al intercambiador, una característica particular que el diagrama de Reichardt resalta (figura 1): a partir del tope y del nivel de toberas, las temperaturas de los gases y de los materiales sólidos o líquidos convergen hacia 1000 °C. (figura 2)

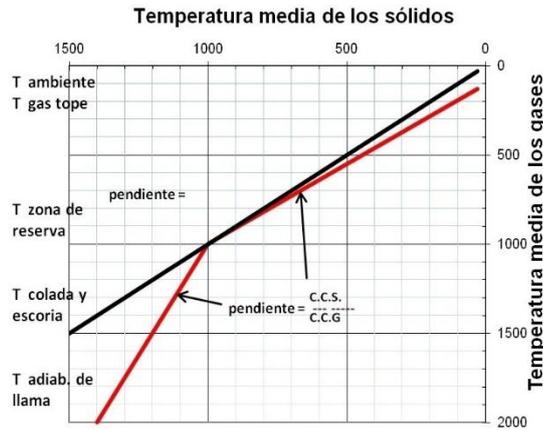


Figura 1. Comparación esquemática de las temperaturas medias de los gases y de los sólidos en el alto horno.

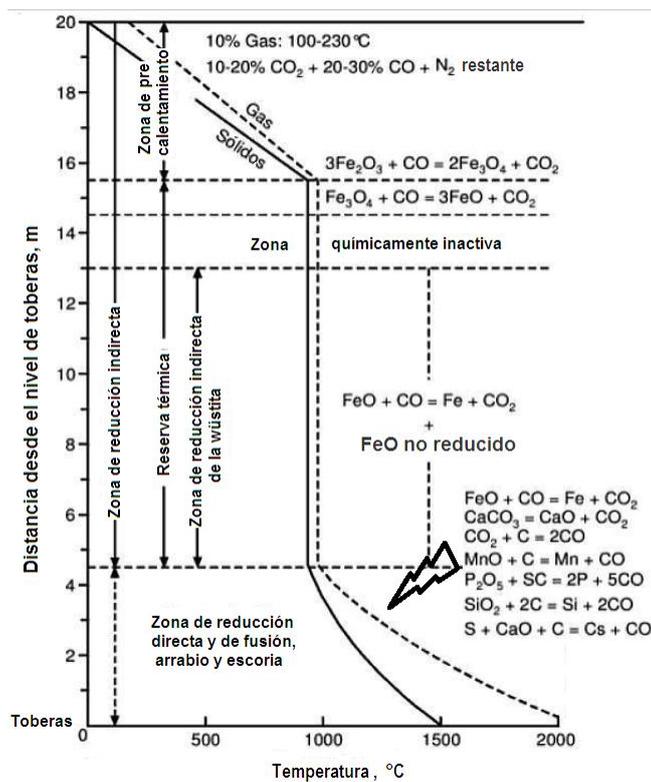


Figura 2. Perfil de temperaturas.

Los requerimientos térmicos y los balances por zonas

- En la zona de elaboración, a $T > 1000^\circ\text{C}$, las necesidades térmicas están aseguradas por la combustión del carbono y por el viento caliente.
- El gas generado en esta zona a 1000°C es menos abundante a medida que el viento es más caliente.
- En la zona de preparación, a $T < 1000^\circ\text{C}$, los requerimientos térmicos son asegurados exclusivamente por el gas caliente que entra a 1000°C .
- La temperatura del gas de tope es más baja en la medida que la cantidad de gas suministrado es más débil o que la masa de materia a calentar es mayor.

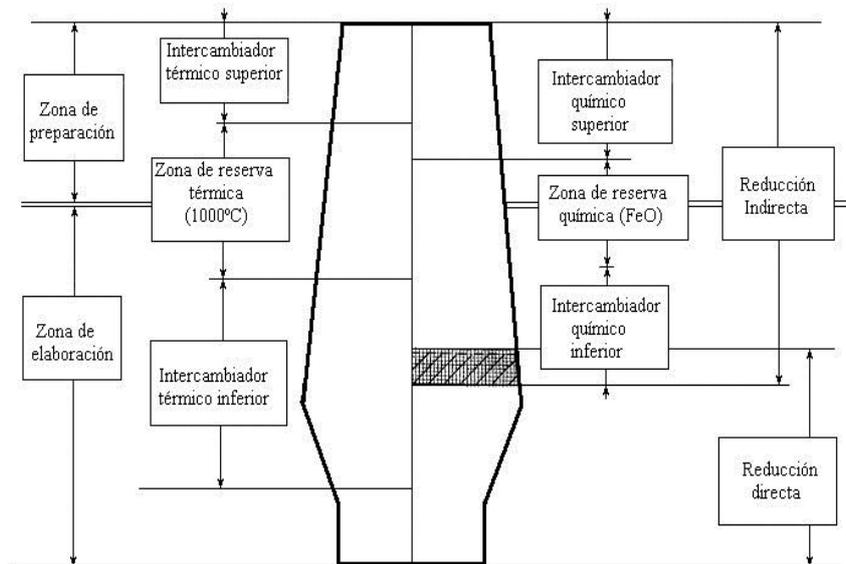


Figura 3. Intercambio de calor, divisiones térmicas y químicas de un alto horno ideal.

Los intercambios de oxígeno por reducción indirecta

- En la cuba, que comprende el conjunto del intercambiador térmico superior y la zona de reserva térmica, el carbono es inerte y la reducción de los óxidos de hierro, ocurre exclusivamente por vía indirecta, es decir, por conversión del CO en CO₂
- La cuba funciona idealmente cuando el equilibrio químico entre gases y sólidos se alcanza al estado de la wustita (FeO_{1.05}). Esta característica se expresa gráficamente por el diagrama de intercambio de oxígeno (figura 4).

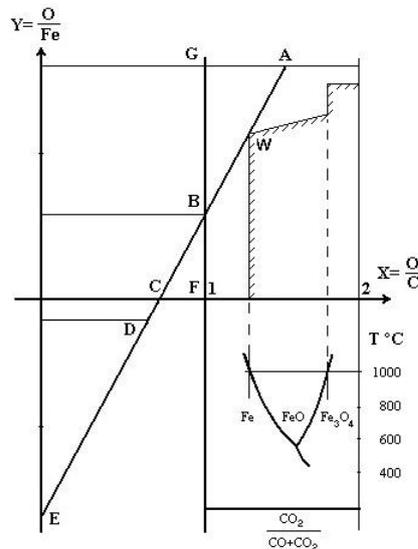


Figura 4. Expresión gráfica del balance de materia del alto horno por la recta operatoria, diagrama de intercambio de oxígeno.

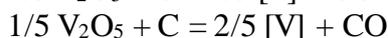
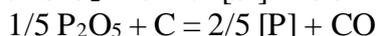
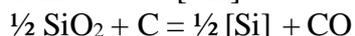
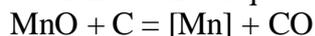
Producción de gas reductor

La producción de gas reductor en etalajes y crisol está dada por las reacciones:

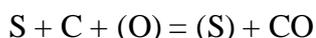
- Reducción directa de los óxidos de Fe, cuya reacción principal es:



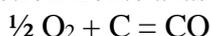
- Reducción de óxidos que dan los elementos disueltos en arrabio:



- Entrada en solución del azufre en la escoria:



- Combustión frente a las toberas:



El conjunto de estas reacciones consume 1 átomo de oxígeno y produce 1 mol de CO por átomo de carbono gasificado.

Se representan globalmente en las figuras 4 y 5 por el segmento **BE** de proyecciones 1 sobre OX y μ sobre OY, donde

$$\mu = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{n_C}{n_{Fe}}$$

es la pendiente de dicho diagrama.

Las reacciones parciales están representadas por los segmentos:

BC, de proyecciones x_d e y_d , para la reducción directa de los óxidos de hierro.

CD, de proyecciones $(x_f + x_s)$ e $(y_f + y_s)$ para la reducción de los óxidos que dan los elementos disueltos en el arrabio y para la entrada en solución del azufre en la escoria,

DE, de proyecciones x_v e y_v para la combustión por el viento caliente frente a las toberas.

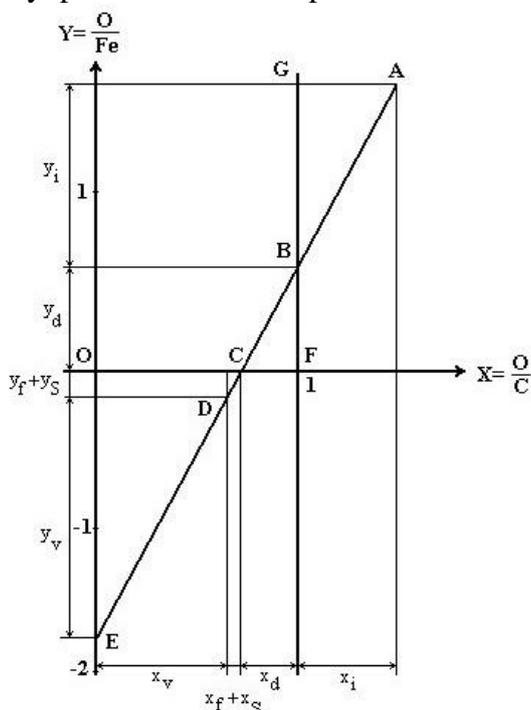


Fig.5.- Recta operatoria del alto horno.

Cualquiera sea la importancia relativa de estas reacciones, se tiene:

$$y_d + y_f + y_s + y_v = \mu$$

$$x_d + x_f + x_s + x_v = 1$$

Ecuación (1)

Ecuación (2)

La ecuación (1) detalla el consumo de carbono gasificado. El consumo total de carbono tiene un término suplementario δ (at C/at Fe), que representa el carbono disuelto en el arrabio.

Los consumos específicos de carbono (carbon rate) o de coque (coke rate) son proporcionales a $(\mu + \delta)$.

El consumo unitario de carbono M, en kg por tonelada de Fe es:

$$M = 1000 (12/55,85) (\mu + \delta) = 215 (\mu + \delta) \quad \text{Ecuación (3)}$$

kgC/tFe

Utilización de gas reductor

El segmento AB de la recta operatoria (figura 5), de proyecciones x_i e y_i representan la totalidad de los intercambios de oxígeno por vía indirecta en la cuba. Está delimitado por las rectas $X=1$ por un lado (CO exento de CO_2) e $Y=Y_A$ por otra parte (razón O/Fe inicial en el lecho de fusión). Para la hematita $Y_A = 1,5$. Para la magnetita $Y_A = 1,33$

La figura 5 permite leer o calcular rápidamente:

- La tasa de reducción indirecta
- La composición de gas de tope

Tasa de reducción indirecta:

Se define como la razón:

$$\frac{GB}{GF} = \frac{y_i}{y_i + y_d} = \frac{y_i}{Y_A} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Composición de gas de tope:

$$\% CO_2 = 100 x_i / (1 + 1,88 x_v) \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$\% CO = 100(1 - x_i) / (1 + 1,88 x_v) \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\% N_2 = 100(1,88 x_v) / (1 + 1,88 x_v) \quad \text{Ecuación (7)}$$

4. Modelo en utilitario

Todas las relaciones necesarias que conforman el modelo fueron escritas en una planilla Excel, la cual se estructuró para leer los datos de operación directamente desde un servidor PI alimentado por los controladores de proceso, por información del sistema de pesaje y por los análisis químicos de materias primas y productos ingresados por el Laboratorio Metalúrgico Central. La planilla realiza todos los balances de materiales al igual que los balances de calor necesarios facilitando los complejos cálculos y entregando en forma gráfica la recta de operación y a partir de ella el cálculo de la eficiencia y la tasa de reducción indirecta. Para ello basta ingresar las fechas inicial y final del intervalo a analizar. No obstante, es preciso señalar que ello no elimina la necesaria revisión experta para verificar la ausencia de errores que pueden ocasionalmente presentarse en un sistema industrial.

5. Resultados. recta de operación de los altos hornos de la CSH.

5.1 Eficiencia

La figura 6 siguiente muestra la evolución de la eficiencia química junto con la tasa de reducción directa obtenidos mediante la aplicación del modelo de la recta de operación de Rist y Meysson a los resultados de operación promedios mensuales de los altos hornos de CSH.

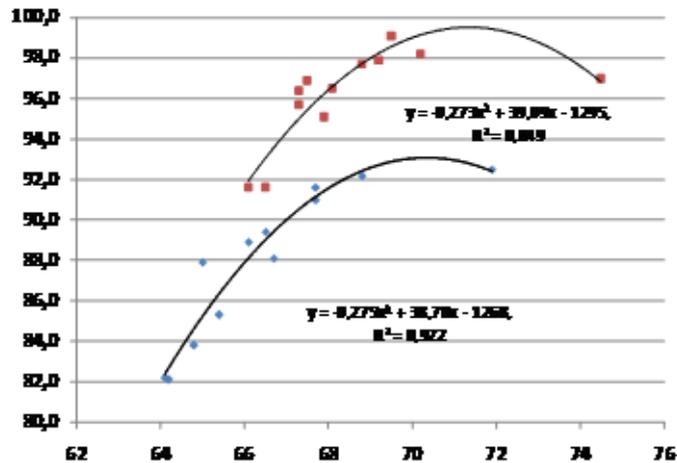


Fig.6.- Promedios mensuales de eficiencia química versus tasa de reducción indirecta para el AH1 (en azul) y el AH2 (en rojo) entre Enero y Diciembre 2011.

5.2 Consumo unitario de combustible por tonelada de arrabio

La evolución del consumo unitario de combustible por tonelada de arrabio o “Fuel rate” para cada alto horno en el período analizado se muestra en la figura7. Ambas curvas presentan el menor Fuel rate, para tasas de reducción indirectas muy próximas de 69,1 y 69,2%, respectivamente.

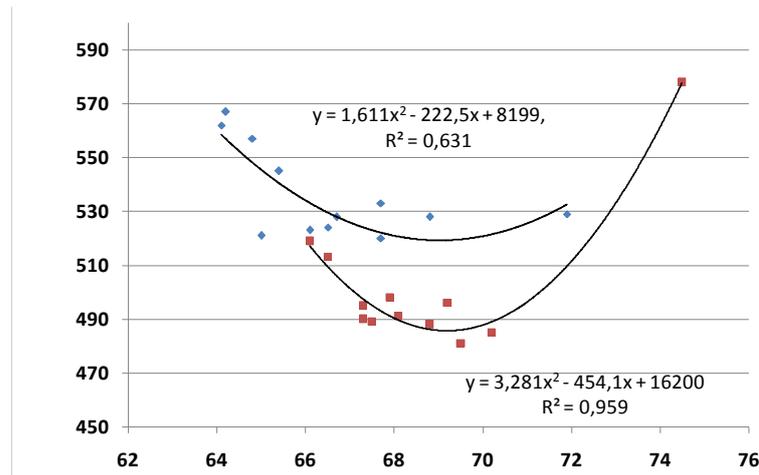


Fig.7. “Fuel rate” versus tasa de reducción indirecta para el AH1 (en azul) y para el AH2 (en rojo) del periodo Enero a Diciembre 2011.

6. Discusión.

Del gráfico obtenido junto con un análisis de los datos de operación se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La eficiencia de reducción del alto horno N°2 es siempre superior a la del alto horno N°1. Ello se explica por las siguiente razones: el mayor volumen de trabajo, mayor

porcentaje de pellets en la carga el cual posee mayor contenido de Fe, menores impurezas y mejor reducibilidad, mayor temperatura de viento insuflado

- Existe una tasa de reducción indirecta óptima para la cual las curvas de eficiencia química de reducción pasan por un máximo. Dichos porcentajes óptimos de reducción indirecta son 70,4% y 71,6% para el AH1 y AH2, respectivamente. Este hecho ha sido destacado en numerosos artículos, de los cuales el más destacable es el trabajo del Dr. Fumitada Nakatani y cols. (14) de Sumitomo Metals Industries, quien indica la existencia de un óptimo Fuel Rate para una tasa de reducción indirecta de 61% en el caso de una carga consistente únicamente de Fe_2O_3 .
- De la figura 7 se desprende la existencia de óptimo operacional. Las condiciones que determinan la proximidad o lejanía a este punto son múltiples. El diagrama de Rist permite analizar en que dirección deben ajustarse las variables para que el horno tienda a dicho óptimo. Una desviación del punto óptimo tiene una fuerte incidencia en los resultados económicos dado el impacto directo en el consumo de combustible, el cual representa mas del 50% de los costos variables. Una variación de solo un 1% en dicho consumo implica un menor o mayor gasto anual del orden de 1,5 millones de dólares.

7. Conclusiones:

La aplicación del modelo de Rist y Meysson mediante su implementación en una planilla excel permite determinar de manera ágil tanto en tiempo real como a partir de los datos históricos de cualquier período, la eficiencia y la tasa de reducción indirecta del proceso de reducción de los óxidos de hierro en los Altos Hornos. El análisis efectuado a periodos históricos mensuales confirma la existencia de un óptimo operacional tal como lo señala la literatura técnica especializada.

La metodología del trabajo presentado que permite analizar en profundidad un proceso metalúrgico complejo como es el alto horno, determinar su eficiencia y analizar el efecto de diversas variables operativas, es extensible para estudiar el efecto de la incorporación de innovaciones tecnológicas en el proceso de elaboración de arrabio (15,16) como también es extensible para analizar procesos similares (17,18). El uso de modelos fenomenológicos para interpretar resultados operativos permite distinguir las variables de mayor impacto convirtiéndose en una potente herramienta para el mejoramiento continuo y reducción de costos.

8. Agradecimientos:

A don Eugenio Rioseco van Cauwelaert, quien fuera mi maestro durante mis primeros años en Huachipato y quien me iniciara en el proceso de auto aprendizaje.

A la Gerencia de Operaciones de la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A., que me facilitó las herramientas computacionales y en particular a don Jean Paul Sauré, por su apoyo en tecnologías informáticas.

A don Jorge García, actual Superintendente de Altos Hornos, por permitir el acceso a la información de proceso y a informes mensuales de Operación históricos.

A don Patricio Peralta, de Contac Ingenieros, por su ayuda en el acceso de los datos en línea a través de la interfase al servidor PI.

A la Sra. Claudia González, por complementar la información con análisis faltante para balances de materiales.

9. Referencias

1. A.Rist, N.Meysson, Recherche Graphique de la Mise au Mille Minimale du Haut Fourneau a faible température de vent, Revue de Métallurgie, Février 1964,(61),p.122-145
2. A.Rist, N.Meysson, Étude du Haut Fourneau avec Vent Humide et Injections aux Tuyères, Revue de Métallurgie, November 1965,(62),n° 11, p.995-1039
3. A.Rist, G.Bonnivard, Réduction d'un lit d'oxydes de fer par un gaz, Revue de Métallurgie, 1963,(60) p.23-
4. A.Rist, G.Bonnivard, Réduction d'un lit d'oxydes de fer par un gaz. Deuxième partie, Revue de Métallurgie, Mars 1966,(63),n°3, p.197-210
5. A.Rist, G.Bonnivard, Réduction d'un lit d'oxydes de fer par un gaz. Deuxième partie (suite), Revue de Métallurgie, Avril 1966,(63),n°4, p.296-312
6. Nicole (R), La théorie du haut-fourneau : Contribution de l'École Française, Revue de Métallurgie, Volume 102, Issue 03, March 2005, pp 199-217
7. Kitaev (B.I.), Iarochenko (I.G.), Soutchkov (V.D.). – Échanges thermiques dans les fours à cuve. Traduction IRSID, R.I. 70 (décember 1958).
8. Kitaev (B.I.), Iarochenko (I.G.), Lazarev (B.L.). –Troisièmes Journées Internationales de Sidérurgie, Luxembourg, (octobre 1962), 47.
9. Michard (J).– Etude du haut fourneau, II. Cahiers du Cessid (1959).
10. Michard (J).– Rev. Métallurg. 58, n°spécial (15 octobre 1961), 41.
11. Michard (J).– Troisièmes Journées Internationales de Sidérurgie. Luxembourg (octobre 1962), 346.
12. Michard (J)., Boudier (Y).– Rev. Métallurg. 60, (1963), 513.
13. Michard (J)., Rist (A)., Dutilloy (D).–Rapport IRSID, RE 17 (mars 1963)
14. Fumitada Nakatani, Tetsuya Mukay, Fumio Nakamura, Theoretical Considerations on Blast Furnace Coke Rate, Transaction I.S.I.J. Vol.6, pp 263-280, 1966
15. Wan Ho KIM, Dong Joon MIN, A mass and energy estimation for the hydrogen utilization in the iron-making process, Department of Materials Science and Engineering, YONSEI University, Seoul, Republic of Korea, SCIENCE CHINA Technological Sciences 2011, Vol. 54 Issue (7): 1655-1660
16. Bennett (P), FUKUSHIMA (T), Impact of PCI Coal Quality on Blast Furnace Operations, 12th ICCS - November 2003
17. Oliveira(F), Étude des matériaux carbonés utilisés comme réducteurs pour la production des alliages de manganèse dans le four électrique, Thèse présentée pour l'obtention du Grade de Docteur a l' École Centrale des Arts et Manufactures PARIS Avril 2010
18. Orre (J), Modelling av järnnmalmsreduktion baserade på Rist-diagrammet, Luleå Teckniska Universitet Civilingenjorsprogrammet Kemiteknik , 2009