

# Análisis sistémico de la tarea de dosificación de hornadas en HAE en condiciones de utilización de mineral de manganeso.

**E. E. Navas Medina\***, **J. Arzola Ruiz \*\***, **L. García Escalona\*\*\***.

\* Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín. Cuba.

Fax: +53 24 48 1843. Teléfono: +53 24 48 2675.

e-mail: nava@facing.uho.edu.cu

\*\* Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”

e-mail: jarazola@ceter.cujae.edu.cu

\*\*\* Delegación CITMA Holguín

e-mail: Leonid\_garcia@yahoo.es

(Recibido el 10 de noviembre de 2007; aceptado el 20 de diciembre de 2007)

## Resumen

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos hasta el momento en el proceso de Análisis y Síntesis de un sistema automatizado para la dosificación de hornadas de acero al carbono en hornos de arco eléctrico. El proceso de Análisis Interno realizado incluye la experimentación en condiciones fabriles y la elaboración del modelo matemático de la cinética del proceso de asimilación del manganeso por el metal. Aunque hasta el momento el sistema desarrollado no incluye la optimización del proceso, del análisis realizado no resulta difícil elaborar el procedimiento de optimización requerido.

**Palabras claves:** Acero al carbono, hornos de arco eléctricos, mineral de manganeso, sistemas de ingeniería, operación de procesos.

## 1. Introducción.

El Horno de Arco Eléctrico (HAE) acaba de cumplir sus primeros cien años de existencia y ya uno de sus descendientes, el horno de corriente directa (CD), está cumpliendo 23 años. En este periodo se han efectuado grandes cambios, que han permitido el crecimiento continuo de las mini- acerías eléctricas, en respuesta a los requerimientos de los productores de acero. Es una realidad que desde hoy y hasta el año 2010, los proyectos de producción de acero serán, casi todos, vía horno eléctrico, debido entre otros factores, a la obsolescencia de las plantas coquizadoras [ 2, 4].

### Variantes tecnológicas actuales.

Existen dos variantes tecnológicas fundamentales en la producción de aceros en hornos de arco eléctrico:

- Metalurgia secundaria.
- Proceso de fusión completo

Proceso de fusión completo en el horno, desde el derretido hasta el afino final en el mismo.

La tecnología de fusión de estos hornos consta de las siguientes etapas: carga, derretido, oxidación, reducción y vertido del metal a la cazuela, [3, 6, 8].

La carga está compuesta por: chatarra de acero y de hierro, arrabio, elementos oxidantes (mineral de hierro, oxígeno, etc.), elementos aleantes (ferromanganeso y ferro-silicio), formadores de escoria (cal, caliza).

El período de oxidación tiene como objetivo provocar la ebullición del metal, donde se utiliza el mineral de hierro (rico en óxido de hierro), para lograr la oxidación y eliminación de las impurezas del metal y los gases, así como lograr la composición química establecida del carbono y fósforo.

El período de reducción tiene como objetivo una vez detenida la oxidación, eliminar el azufre, obtener la composición química (manganeso y silicio) para lo cual se utilizan las ferroaleaciones (ferromanganeso y ferrosilicio), y obtener la temperatura de vertido del metal para su vertido en la cazuela.

### **Metalurgia secundaria.**

Una de las innovaciones tecnológicas más importantes de la industria siderurgia ha sido la separación de las etapas de fusión y refino en dos reactores diferentes. Este esquema de producción de aceros, donde el horno de arco eléctrico (HAE) se emplea únicamente como unidad de fusión, ha logrado un incremento importante de productividad. El resto de las operaciones (afino del metal, composición química y temperatura) se realizan en el horno cuchara de afino.

Se ha logrado un incremento notable en la producción de acero por la vía del horno eléctrico solo para la fusión de la carga, ruta que exige una fuerte disponibilidad de chatarra y cuyo déficit se estima, según Hogan.P [2 y 4], de 60 a 130 x 106 t para el año 2010 sobre la base de un crecimiento anual para la producción mundial de acero de 2,9 %. Para aliviar este déficit se han construido y siguen construyendo plantas productoras de materiales substitutivos de la chatarra, cuya capacidad es aproximadamente de 105 x 106 t.

El cambio estructural surgido con la especialización del horno de arco eléctrico como unidad de fusión ha requerido modificaciones a la práctica metalúrgica tradicional.

Para incrementar la productividad del horno de arco eléctrico se requiere: incrementar la rapidez de fusión; minimizar el consumo de energía, reduciendo las pérdidas térmicas y controlando el perfil de temperatura durante la fusión; optimizar el balance de carbono y oxígeno suministrados al horno asociado a un uso intensivo de la inyección de oxígeno [9].

La inyección de oxígeno es una vía importante para aumentar la velocidad de fusión de la carga metálica, debido a que aporta energía química resultante de la oxidación del acero; esta oxidación promueve las condiciones necesarias para la eliminación del fósforo. El efecto negativo de la inyección de oxígeno es la oxidación del sistema me-tal-escoria. Badische Stahl Werke (BST) [2, 4] señala que el 75 % del oxígeno reacciona con carbón produciendo CO, y el resto reacciona con el metal.

El aprovechamiento del calor generado por la inyección de oxígeno es mayor que el obtenido de la red de suministro eléctrico, la cual tiene que ser transmitida del arco al baño líquido.

## **2. Antecedentes.**

### **Utilización del mineral de manganeso como sustituto de ferroaleaciones**

En la producción de aceros al carbono el %Mn se encuentra en el rango de 0,4 – 0,9 (según la norma cubana), Para lograr esta composición, según los métodos convencionales de producción se usa el ferromanganeso, aleación que se introduce al horno con el objetivo de detener la oxidación del carbono y lograr

la cantidad de manganeso determinada por la marca de acero elaborada.

El autor principal de este trabajo se planteó como objetivo de investigación la utilización del mineral de manganeso en sustitución de ferroaleaciones, en particular del FeMn y SiMn con el fin de reducir costos, consumo energético y reducir el efecto ambiental de la producción convencional de acero, por concepto de la reducción de la contaminación derivada de la producción de las ferroaleaciones. Se requiere, por tanto, elaborar una tecnología de fusión con la que se sustituya total o parcialmente estas aleaciones. El mineral utilizado tiene la siguiente composición química:

68% MnO<sub>2</sub>; 9% SiO<sub>2</sub>; 3,6% FeO; 4,1% CaO; 0,69% MgO; 2,45% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,04% P; 12,2% otras sustancias.

En los experimentos se utilizó un horno de arco eléctrico, con capacidad nominal 3t; capacidad máxima 4,2t; revestimiento básico con bóveda ácida; potencia nominal 2000 kVA; potencia máxima de fusión 2600 kVA; tensión de la red para los equipos auxiliares tráfico 380V, 50Hz; consumo de potencia de los equipos auxiliares 30 kW.

## **3. Análisis Externo de la Tarea de Toma de Decisiones asociada a la dosificación de la hornada, posterior a la fusión, en condiciones de utilización del mineral de manganeso.**

### **Sistema de mayor envergadura.**

La armonización del funcionamiento de los sistemas encargados de la operación de los agregados del taller al ritmo del proceso productivo, tiene que ver necesariamente, con la sincronización en el tiempo de estos agregados. Así, el sistema de operación de cada agregado principal del taller, en particular de los hornos de arco eléctrico, durante la realización de la fusión de las hornadas, se subordina al sistema de despacho del taller, ocupado de la sincronización de estos agregados, [1].

La operación de los hornos de arco eléctrico tiene que ver con dos funciones principales interrelacionadas: la determinación del régimen eléctrico y de la dosificación de la carga del horno. La composición de la carga (carga metálica, adiciones, fundentes, desoxidantes, etc.) influye en la duración de las operaciones, en particular, en la duración de la hornada en proceso de elaboración, lo que a su vez influye en grado considerable sobre el régimen eléctrico (denominado también perfil de fusión del horno). De tal forma, el sistema de mayor envergadura del proceso de fusión en el horno de arco eléctrico está constituido por el sistema de dirección de las operaciones del taller,

denominado también sistema de despacho del Taller [1]. En paralelo al sistema de dirección del proceso de fusión se encuentran los sistemas vinculados a la operación de los procesos que tienen lugar en los agregados principales del Taller, en primer lugar del proceso de vaciado. En la figura 1 se muestra esquemáticamente esta estructura.



Figura 1. Sistema de dirección de las direcciones del taller.

En paralelo con los procesos que tienen lugar en los agregados principales, tienen lugar otros procesos que deben ser conciliados con ellos, entre los que se encuentran, en las empresas de producción masiva de acero, el área de cazuelas del taller, el que debe asegurar la ubicación a tiempo y con el grado de calentamiento adecuado de las cazuelas para efectuar la evacuación del horno.

Como resultado del estudio de la tarea de mayor envergadura se determinan las variables de coordinación. De la exposición anterior se deduce la siguiente composición de estas variables:

- Marca de acero a producir
- Tiempo faltante para concluir la hornada

A partir de entrevistas efectuadas a numerosos especialistas, tanto docentes como de la industria vinculada a los procesos de producción de acero, predominaron en calidad de criterio de eficiencia para la determinación de la carga en los hornos de arco eléctrico, los siguientes:

- a) Mínimo costo de producción
- b) Maximización de la probabilidad de caer en marca.

Esto se puede lograr por dos vías:

- Dosificación de los materiales que se introducen al horno, persiguiendo obtener la composición media de la marca buscada por todos los elementos con intervalos definidos.

Estableciendo tantas fases de determinación de la dosificación de los materiales como mediciones de composición del metal se realicen.

Para cada fase de determinación de las adiciones, la obtención de la composición media de la marca buscada es equivalente a la minimización de la suma de la desviación cuadrática del resultado del cálculo del

contenido de los diferentes elementos químicos con respecto al valor medio de la composición final.

c) Máximo aporte calórico de las reacciones químicas involucradas

d) Satisfacción del cliente por las recomendaciones emitidas por la herramienta de ayuda a la toma de decisiones y evaluación de posibles opciones de solución que resulten de su interés.

e) Satisfacción de las restricciones impuestas por las variables de coordinación.

Del estudio de la tarea de cálculo de la carga en hornos de arco eléctrico con revestimiento básico se definieron, en calidad de variables de decisión, las cantidades del material  $i$  a ser adicionado en el momento significativo  $j$  del proceso de fusión. Como momentos significativos se entienden aquellos en los que se realizan mediciones durante el proceso de fusión o en la cazuela, una vez evacuado el metal del horno.

La dosificación de materiales en cada periodo se corresponde con los objetivos del periodo y, por lo tanto, con las reacciones químicas que tienen lugar. De igual forma, las características de utilización del mineral de manganeso se vinculan a las características del periodo que se trate, de esta forma el horno de arco con revestimiento básico, utilizado, permite la utilización de los periodos de oxidación y reducción en la tecnología de producción de acero [5, 7], donde en el periodo de oxidación se utiliza el mineral de hierro para lograr la oxidación del metal, la salida de los gases del baño metálico y la obtención del carbono y fósforo en la marca establecida.

En el periodo de reducción del acero se separa el azufre (en forma de  $\text{CaS}$ ), se obtiene la composición de Mn (con  $\text{FeMn.}$ ) y de Si, se desgasifica y se establece la temperatura necesaria para el vertido en los moldes, extrayendo finalmente el metal del horno hacia la cazuela de vertido (previamente calentada a  $700 - 900^\circ\text{C}$ ) para la colada. Como resultado de lo anteriormente expuesto se confirmaron las posibilidades prácticas, derivadas de la esencia de los procesos físico químicos que tienen lugar en la hornada, de obtener nuevas variantes tecnológicas, utilizando el mineral de manganeso, en dos etapas diferentes del proceso de fusión en los hornos de arco eléctrico con revestimiento básico:

- Primera variante en el periodo de oxidación, donde se utiliza el mineral de manganeso como oxidante en lugar del mineral de hierro para la obtención del por ciento de carbono, fósforo y lograr determinada reducción del manganeso, sustituyendo de esta forma el ferromanganeso a emplear en el periodo de reducción.
- Segunda variante, en el periodo de reducción, donde se utiliza el mineral de manganeso en

sustitución total o parcial del ferromanganeso para lograr composición química final.

Una vez derretida la carga metálica en el HAE se realiza la medición de la composición química y la temperatura de la hornada con el fin de decidir la conducción posterior del proceso, de forma de alcanzar composición y temperatura final. La composición se alcanza mediante una correcta dosificación de todos los materiales posibles a adicionar en ese momento y la temperatura mediante la determinación del régimen eléctrico, considerando las reacciones endo y exotérmicas. Así, para la aplicación de la variante 1 de sustitución de mineral de hierro y ferromanganeso por mineral de manganeso se parte de la información de la composición y temperatura medidas y de la composición y temperatura final establecidas de la hornada. Para variar la calidad del proceso de reducción directa se puede actuar solo mediante la determinación de la granulometría, de la basicidad de la escoria y del tiempo de reacción, tomando en consideración composición química y temperatura del metal.

Para la aplicación de la variante 2, al final del proceso de oxidación se vuelve a medir composición y temperatura. La información disponible y los factores a variar son los mismos que en el caso anterior. En este momento se requiere reducir el manganeso, por lo que junto con el mineral de manganeso se requiere adicionar elementos reductores, tales como carbono y aluminio, los que tienen mayor afinidad con el oxígeno que el manganeso.

De tal forma, en calidad de variables de decisión al inicio del periodo de oxidación (variante 1) se tienen los siguientes parámetros:

- Cantidad y granulometría de mineral de manganeso (en sustitución del mineral de hierro, del ferromanganeso y parcialmente del oxígeno)
- Cantidad de mineral de hierro
- Cantidad de oxígeno a inyectar, en caso de su empleo
- Tiempo de oxidación (si el carbono está alto)
- Cantidad de cal para la formación de la escoria
- Cantidad de carburantes (arrabio, coque, grafito, antracita o cualquier otro tipo de carburante, si el carbono está bajo)
- Tiempo de recarburación (si el carbono está bajo)

Como en el periodo de oxidación correspondiente a la variante 1 de utilización del mineral de manganeso se procura obtener composición de C y P, en el indicador de eficiencia mencionado, correspondiente a la composición media, se toman en cuenta solo estos dos elementos.

En calidad de variables de decisión al inicio del periodo de reducción (variante 2) se tienen los siguientes parámetros:

Cantidad (y granulometría) de mineral de manganeso (en sustitución del ferromanganeso)

- Cantidad y granulometría de mineral de manganeso (en sustitución del ferromanganeso)
- Cantidad de ferrosilicio (o silicomanganeso, en caso de ausencia de ferrosilicio)

Entre las variables intermedias más importantes se encuentran:

- Basicidad de la escoria
- Composición química del metal y de la escoria
- Calor resultante de las reacciones exo y endotérmicas, asociado a la dosificación correspondiente a la iteración dada del proceso de búsqueda de solución
- Aprovechamiento de todos y cada uno de los elementos químicos en cada etapa del proceso a partir de la dosificación

Entre los datos de entrada (base de datos del sistema) más importantes se destacan:

- Normas de las diferentes marcas
- Composición química de posibles materiales componentes de la carga y/o adiciones
- Aporte del refractario al metal y/o escoria
- Disponibilidad de materiales posibles a ser componentes de la carga
- Capacidad del horno
- Indicadores del Sistema de Suministro Eléctrico

#### **4. Introducción al Análisis Interno de la tarea de operación óptima del proceso estudiado.**

Una vez estudiada la composición de variables que participan en la solución de la tarea planteada, se requiere determinar los modelos matemáticos y procedimientos de cálculo que permiten calcular las salidas (indicadores de eficiencia) de las entradas (variables de decisión y datos de entrada). Como se deduce del Análisis Externo realizado, en este caso se requiere el cálculo de la composición de cada uno de los elementos químicos involucrados en los objetivos en cada una de las variantes, correspondientes a los periodos de la hornada asociado. Para la realización de este análisis hay necesariamente que partir de las reacciones químicas que intervienen de la distribución molecular por fases, el comportamiento cinético de cada una de estas reacciones y el efecto calórico obtenido.

##### **Distribución molecular por fases, en condiciones de ocurrencia total de las reacciones termodinámicamente factibles.**

En este acápite se determina la masa molecular de cada una de las reacciones que ocurren (oxidación –

reducción) entre los óxidos que componen el mineral y los elementos de la composición química del metal base para ambas variantes, para poder calcular la cantidad de moles que reaccionan, cuantos salen del baño metálico a la atmósfera, cuantos se quedan en la escoria y cuantos pasan al baño líquido.

Masa molecular de los elementos que intervienen en las reacciones:

C = 12; Mn = 55; Si = 28,1; P= 31; Fe = 56; S = 32,1; Ca = 40,1; Al = 27; O = 16; Mg = 24,3.

En las tablas 1 y 2 aparecen los resultados de los cálculos de la distribución molecular en ambas variantes. Los elementos que aparecen encerrados entre

( ) se encuentran en la escoria, entre [ ] se encuentra en el metal y entre { } pasan a la atmósfera.

El cálculo de los indicadores de eficiencia asociado a cada una de las reacciones enumeradas en las tablas 1 y 2, exceptuando las vinculadas a la reducción directa del manganeso contenido en el mineral ha sido previamente estudiado en detalle en la bibliografía especializada [3, 5, 6, 7, 8]. Los autores realizaron las investigaciones dirigidas a la obtención de las relaciones vinculadas directamente a la utilización del mineral del manganeso, en particular, las correspondientes a la cinética de las reacciones, las que a continuación se presentan. Estas investigaciones incluyen la planificación requerida de los experimentos y su procesa-miento posterior por técnicas del Análisis de Regresión.

Tabla 1. Distribución molecular según las reacciones de la variante 1.

Reacciones de la Variante 1	Cantidad de moles			
	Metal	Escoria	Atmósfera	Total
$(\text{MnO}_2) + 2[\text{Fe}_{\text{liq}}] = 2(\text{FeO}) + [\text{Mn}]$	55	144		199
$5 (\text{MnO}_2) + 4 [\text{P}] = 2 (\text{P}_2\text{O}_5) + 5 [\text{Mn}]$	275	284		559
$(\text{MnO}_2) + [\text{Si}] = (\text{SiO}_2) + [\text{Mn}]$	55	60,1		115,1
$(\text{MnO}_2) + 2 [\text{C}] = 2 \{ \text{CO} \} + [\text{Mn}]$	55		56	111
$(\text{SiO}_2) + 2 [\text{C}] = 2 \{ \text{CO} \} + [\text{Si}]$	28,1		56	84,1
$2(\text{FeO}) + [\text{Si}] = (\text{SiO}_2) + 2[\text{Fe}]$	112	60,1		172,1
$(\text{FeO}) + [\text{C}] = \{ \text{CO} \} + [\text{Fe}]$	56		28	84
$5 (\text{FeO}) + 2 [\text{P}] = (\text{P}_2\text{O}_5) + 5 [\text{Fe}]$	280	142		422
$4 (\text{CaO}) + (\text{P}_2\text{O}_5) = (4\text{CaOP}_2\text{O}_5)$		366,1		366,1
$(\text{CaO}) + [\text{FeS}] = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$		144,2		144,2
$(\text{CaO}) + [\text{MnS}] = (\text{CaS}) + (\text{MnO})$		143,2		143,2
$2 (\text{P}) + 5[\text{FeO}] = (\text{P}_2\text{O}_5) + 5 [\text{Fe}]$	280	142		422
$2 (\text{P}) + 5[\text{MnO}] = (\text{P}_2\text{O}_5) + 5 [\text{Mn}]$	275	142		417
$4 (\text{P}) + 5[\text{O}_2] = 2 (\text{P}_2\text{O}_5)$		284		284
Total de moles	1 471,1	1 911,7	140	3 522,8

Tabla 2. Distribución molecular según las reacciones de la variante 2.

Reacciones de la Variante 2	Cantidad de moles			
	Metal	Escoria	Atmósfera	Total
$(\text{MnO}_2) + 2 [\text{C}] = 2 \{ \text{CO} \} + [\text{Mn}]$	55		56	111
$(\text{MnO}_2) + 4/3 (\text{Al}) = 2/3 (\text{Al}_2\text{O}_3) + [\text{Mn}]$	55	68		123
$(\text{SiO}_2) + 2 [\text{C}] = 2 \{ \text{CO} \} + [\text{Si}]$	28,1		56	84,1
$(\text{SiO}_2) + 4/3 (\text{Al}) = 2/3 (\text{Al}_2\text{O}_3) + [\text{Si}]$	28,1	68		96,1
$2(\text{FeO}) + [\text{Si}] = (\text{SiO}_2) + 2[\text{Fe}]$	112	60,1		172,1
$(\text{FeO}) + [\text{Mn}] = (\text{MnO}) + [\text{Fe}]$	56	71		127
$(\text{FeO}) + [\text{C}] = \{ \text{CO} \} + [\text{Fe}]$	56		28	84
$5 (\text{FeO}) + 2 [\text{P}] = (\text{P}_2\text{O}_5) + 5 [\text{Fe}]$	280	142		422
$(\text{FeO}) + 2 [\text{Al}] = (\text{Al}_2\text{O}_3) + 3 [\text{Fe}]$	168	102		270
$4 (\text{CaO}) + (\text{P}_2\text{O}_5) = (4\text{CaOP}_2\text{O}_5)$		366,1		366,1
$(\text{CaO}) + [\text{FeS}] = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$		144,2		144,2
$(\text{CaO}) + [\text{MnS}] = (\text{CaS}) + (\text{MnO})$		143,2		143,2
$2 (\text{P}) + 5[\text{FeO}] = (\text{P}_2\text{O}_5) + 5 [\text{Fe}]$	280	142		422
$4 (\text{P}) + 5[\text{O}_2] = 2 (\text{P}_2\text{O}_5)$		284		284
Total de moles	1 118,2	1 590,6	140	2 848,8

Se utiliza la siguiente nomenclatura de las variables:  
 MNM- Incremento del % Mn en el metal como función del tiempo, una vez adicionado el mineral  
 CanMin – Cantidad de mineral introducido al baño (en kg) / Masa de la carga metálica en (en t )  
 Bas – Basicidad de la escoria  
 C- Composición de C en el metal en %, en el momento de adicionar mineral de Mn  
 Si- Composición de Si en el metal en %, en el momento de adicionar mineral de Mn

Mn- Composición de Mn en el metal en %, en el momento de adicionar mineral de Mn  
 P- Composición de P en el metal en %, en el momento de adicionar mineral de Mn  
 Tao- Tiempo transcurrido desde el momento de adicionar mineral de Mn  
 TP- Tamaño de las partículas del mineral (en mm)  
 T- Temperatura del metal en el momento de adicionar mineral de Mn

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: MNM

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-9,73	1,353	0,0330359	0,0000
CanMin	1,101	9,876	-1,23527	0,0001
Bas	1964	3,02759	-2,04664	0,0411
Bas <sup>-0,015</sup>	-2609,28	841,088	-3,10227	0,0020
C <sup>0,007</sup> P <sup>0,00084</sup>	142,353	33,0426	4,30816	0,0000
C <sup>0,007</sup> Si <sup>0,0012</sup> Bas <sup>-0,015</sup>	1459,95	665,163	2,19487	0,0286
C <sup>0,007</sup> Si <sup>-0,0012</sup> Tao <sup>0,0225</sup>	1035,88	161,451	6,41604	0,0000
LnC	-18,466	5,33047	-3,46423	0,0006
LnSi	0,01467	0,918578	-3,28189	0,0011
LnTao	-23,7587	3,73499	-6,36111	0,0000
Mn	-2,14943	0,565774	-3,7991	0,0002
P	0,798666	0,0480416	16,6245	0,0000
P <sup>0,00084</sup> TP <sup>-0,0012</sup>	-51,8268	4,85788	-10,6686	0,0000
Si	0,482535	30 0,06621	7,28574	0,0000
T	0,00233314	0,0008087	2,885	0,0041
Tao	- 0,0433167	0,0055239	-7,84165	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	5,66853	14	0,404895	147,62	0,0000
Residual	1,59357	581	0,00274281		
Total (Corr.)	7,2621	595			

R-squared = 78,0563 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 77,5275 percent

Standard Error of Est. = 0,0523719

Mean absolute error = 0,0403153

Durbin-Watson statistic = 1,5172

La ecuación de regresión obtenida, resultado del ajuste de los parámetros del modelo a los resultados experimentales, es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 MNM = & - 9,73 + 1,101 * CanMin - 6,1964 * Bas - 2609,28 * Bas^{-0,015} + 142,353 * C^{0,007} P^{0,00084} + 1459,95 * C^{0,007} Si^{0,0012} Bas^{-0,015} \\
 & + 1035,88 * C^{0,007} Si^{-0,0012} Tao^{0,0225} - 18,466 * LnC - 3,01467 * LnSi - 23,7587 * LnTao + 0,798666 * Mn - 2,14943 * P - \\
 & 51,8268 * P^{0,00084} TP^{-0,0012} + 0,482535 * Si + 0,00233314 * T - 0,0433167 * Tao
 \end{aligned}$$

Como el valor P en la tabla ANOVA es menor que 0.01, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables a un nivel de confianza superior al 99 %.

El estadígrafo R – cuadrado indica que el ajuste del modelo explica el 78,0563% de la variabilidad de la composición de Mn en el metal (variable MNM). El ajuste estadístico R-cuadrado, el que es más confiable para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es del 77,5275%. El error estándar de la estimación muestra que la desviación de los residuales es de 0,0523719. El error medio absoluto (MAE) es de 0,0403153 y constituye el valor medio de los residuales. El estadígrafo de Durbin-Watson (DW) verifica los residuales para determinar si existe alguna correlación significativa, dada por el orden de los datos. Como el valor DW es mayor que 1.4, no existe correlación ordinal.

Todos los valores P en la tabla son menores que 0.05 por lo que todos los términos de la ecuación obtenida son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%, por lo que no es necesario suprimir ninguno de ellos de la ecuación.

## 5. Sistema desarrollado de ayuda a la dosificación de las hornadas, CargaMat.

La representación de la información hace referencia de forma general, a tres niveles diferentes. Estos niveles son independientes entre si y se corresponden con los diferentes tipos de entradas de un sistema de ingeniería: Datos de Entrada; Variables de Coordinación, Variables de Decisión.

El primero de estos niveles está constituido por aquellos datos que tienen carácter permanente, es decir, no están asociados a decisiones específicas a nivel de taller ni a nivel de la operación del horno.

El segundo nivel es el de las variables de coordinación, las que adquieren valores fijos para cada corrida del programa, es decir, varían de corrida en corrida y tiene que ver con las condiciones externas, para las que se requiere operar el proceso. En este nivel es donde se define el contenido informativo que establece las condiciones determinadas por las decisiones en el ámbito del taller, específicamente:

- Marca de acero a producir
- Tiempo faltante para concluir la hornada

En el tercer nivel de los datos, se encuentran los correspondientes a las variables de operación del proceso, a las que, en la opción de cálculo, se le asignan valores con el fin de evaluar el comportamiento de los indicadores de eficiencia. En la opción de optimización estos valores son determinados automáticamente por el

sistema con el fin de encontrar un compromiso razonable entre los indicadores de eficiencia.

### Acerca de CargaMat.

CargaMat es un sistema informático para el cálculo de aceros al carbono, el mismo toma como patrón los porcentajes medios de los elementos de la composición química del acero a obtener. El programa realiza reajustes, si son necesarios, según el primer reporte, da opciones de las cantidades de recarburantes a utilizar y el tiempo de recarburación en caso de que sea necesario o los oxidantes y el tiempo de oxidación; y brinda un reporte final con los elementos que componen la carga, las ferroaleaciones y las adiciones no metálicas con las respectivas cantidades a utilizar en dependencia de la cantidad de metal a producir.

### Trabajando con Cargamat.

CargaMat se puede ejecutar utilizando el acceso que se crea con la instalación y aparece en Programas del menú de Inicio del sistema operativo. También se puede ejecutar utilizando el fichero CargaMat.exe que aparece en la carpeta donde se instaló el sistema.

El programa está protegido con claves en la base de datos y utiliza nombre y contraseña para los usuarios del mismo.

Al ejecutar el programa y ser introducidos los datos del Usuario y la Contraseña, si estos son correctos aparece la Ventana principal en la cual están las opciones de CargaMat:

Generalidades: Normas, Marcas, Ferroaleaciones, Elementos de Carga, Pérdidas en los Elementos, Elementos no metálicos, Recarburantes, Oxidantes.

Cálculos: Aceros al Carbono, (Aceros aleados, Hierros grises y aleados)

Utilitarios: Salva, Restaura, Usuarios.

Ayuda: Libro de ayuda, Acerca de.

### Menú Generalidades.

Las opciones Norma y Marca permiten guardar en la base de datos la información acerca de las distintas normas, los materiales, composición química y sus propiedades mecánicas.

La opción Pérdidas en los Elementos permite almacenar los datos de las pérdidas de los elementos antes y después del 1er Reporte en procesos ácidos y básicos.

Las opciones Ferroaleaciones, Elementos de Carga, Elementos no metálicos y Recarburantes permiten almacenar los datos de los materiales según esas clasificaciones que se utilizan en las fundiciones.

**Menú Cálculo.**

Las opciones de este menú permiten realizar los cálculos de los materiales que intervienen en las fundiciones. Hasta el momento solo se encuentra programada la de aceros al carbono.

La opción aceros al carbono permite escoger un material de una norma determinada y realizar los cálculos necesarios para la obtención del mismo. Se toma como patrón los porcentos medios de los elementos de la composición química del Acero a obtener.

Los datos necesarios para los cálculos son (ver figura 2): capacidad del horno (kg) y cantidad de metal a producir (kg), tipo de proceso (ácido o básico), la composición de la carga (ver figura 3: Retorno, Arrabio, ChFe, ChAc) y el por ciento a utilizar de estos (base 100kg), los distintos recarburantes que se pueden utilizar en caso de que sea necesario recarburar, los oxidantes en caso de que sea necesario la oxidación, las ferroaleaciones y las adiciones no metálicas (porcientos), (vea figura 4).

Los cálculos dan como resultado un Primer Reporte con los datos de la carga total calculada en los elementos químicos que componen los elementos de

carga a utilizar, los cuales se comparan con los valores de la marca del metal a producir y permite decidir si es necesario un proceso de recarburación u oxidación y los tiempos de los mismos, así como las cantidades de materiales a utilizar, en un Segundo Reporte. El Reporte Final brindará los valores de las cantidades de elementos de carga, ferroaleaciones y adiciones no metálicas a utilizar para producir el metal.

Los datos anteriores se pueden mostrar en un documento de Excel (ver figura 5).

**Menú Utilitario.**

Tiene opciones generales para la Salva y Restaura de la base de datos y los Usuarios del sistema.

**Menú Ayuda.**

La ayuda del sistema se activa al presionar la tecla F1 o mediante la opción Libro de ayuda de este menú. Es un libro análogo a los que brinda el sistema operativo. En cada ventana aparecerá una explicación de cómo proceder en la misma si se presiona la tecla F1.

La opción Acerca de permite ver la información de la versión del sistema CargaMat.

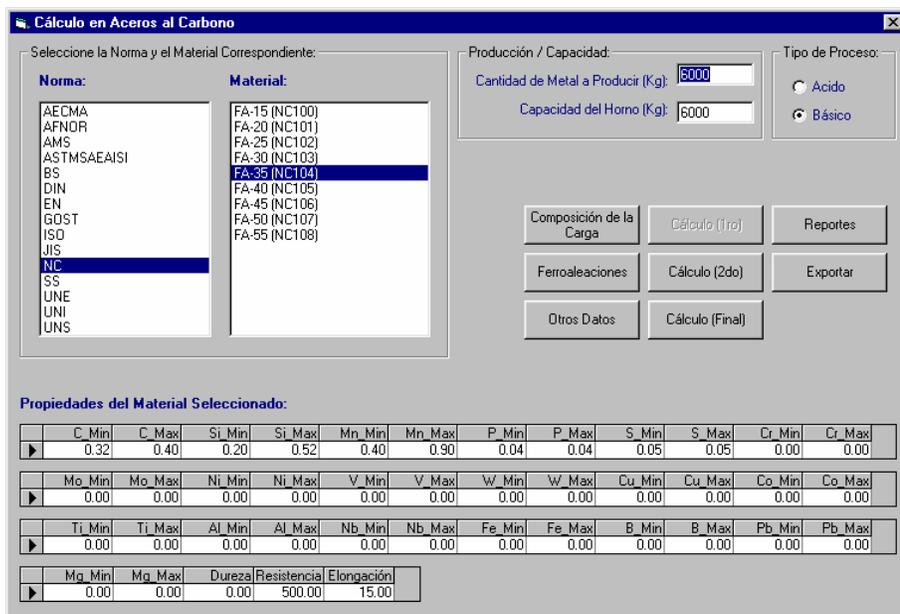


Figura 2 Cálculo de Aceros al Carbono.



## 6. Conclusiones.

Se han logrado los siguientes resultados:

- Se elaboró el análisis externo del sistema de ayuda a la Toma de Decisiones de Dosificación de Hornadas en Hornos de Arco Eléctrico en condiciones de utilización de mineral de manganeso
- A partir del análisis realizado se definieron las relaciones más importantes a desarrollar para completar la modelación matemática requerida para el desarrollo del Sistema mencionado.
- Se realizó la planificación de experimentos, su ejecución y el procesamiento de los datos que permitieron hallar un modelo del contenido del Mn en el acero líquido como función de los parámetros del proceso.
- El error de determinación del incremento del contenido de Mn en el metal líquido es del orden del 0.1 % de contenido. Considerando la posibilidad de rectificar la composición química del acero durante la operación, este error resulta aceptable.
- Se desarrolló un Sistema de Cálculo de la dosificación de las hornadas en condiciones de utilización de mineral de manganeso como una primera etapa del Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones de Dosificación de las Hornadas requerido.

## 7. Bibliografía.

1. Arzola. J. Sistemas de Ingeniería. Editorial Félix Varela, La Habana, 2000, p.482.
2. Astigarra Urquiza Julio. Hornos de Arco para fusión de acero, Teoría de cálculo aplicación. Serie McGraw – Hill n9 Electro tecnologías. 1995.
3. Bozbrinski, B..M. Aleaciones de fundición y tecnología de su fusión en la construcción de maquinaria. / Editorial Mashinostroenie, 1984, p 431.
4. Leiva B. O, Tápanes R. D y Otros. Trabajo de curso. Evolución constructiva en los hornos de arco eléctrico. UDM. Antillana de Acero. La Habana. 2000.
5. Morral, F, R. Metalurgia general. Editorial Reverte. Barcelona, España 1985. p 695.
6. Navas M.E. y Batista C. A. Metalurgia de la Fundición. Universidad de Holguín. 2005. p 452
7. Kudrin V.A. Metalurgia del acero. Editorial MIR 1984 p423.
8. Smirnov N., Cabezas G. y Fanjul A. Producción de acero. Editorial pueblo y educación, Ciudad de La Habana, Cuba. 1984, p 304.
9. Vázquez. S. Inyección periódica automatizada de grafito durante la fusión y afino en la fabricación de acero en HEA. Memorias del XIV Encuentro Nacional de Siderúrgicos, Ixtapa, Gro (México), 2-3 oct 1997.

---

## Systemic analysis of the task of dosage of batches in HAE under use of manganese mineral conditions.

### Abstract:

In this work the results obtained until the moment in the process of the Analysis and Synthesis of an automated system for the dosage of carbon steel heats in electric arc furnaces exposed. The Internal Analysis process carried out includes the experimentation in industrial conditions and the elaboration of the mathematical model of the kinetics of manganese assimilation by the metal. Although until the moment the developed system doesn't include the optimization algorithm, from the analysis carried out it is not difficult to elaborate the required procedure.

**Key words:** Carbon steel production, electric arc furnaces, manganese mineral, engineering systems, processes operation.