

# Modelado del sistema de enfriamiento primario en máquinas de colada de acero con cristalizador curvo

## Modelling of continuous casting steel during first cooling system with curve mold

Yusdel Díaz-Hernández<sup>I</sup>, Alberto Fiol-Zulueta<sup>I</sup>, José Arzola-Ruiz<sup>II</sup>

I. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica. La Habana. Cuba

Correo electrónico: [ydiaz@udm.cujae.edu.cu](mailto:ydiaz@udm.cujae.edu.cu)

II. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Centro de Estudios de Matemáticas. La Habana. Cuba

Recibido: 29 de octubre de 2013      5 de diciembre de 2013

---

### Resumen

En el proceso de enfriamiento primario durante la colada continua de aceros sucede una serie de transformaciones físicas que inciden directamente en la calidad final del producto. Los modelos matemáticos que explican este fenómeno no pueden ser tratados indistintamente para una instalación u otra debido a las disímiles variables implicadas en el proceso. En esta investigación se obtuvo un modelo físico-estadístico mediante regresiones múltiples sucesivas para el caudal necesario de agua en máquinas de colada continua de aceros con cristalizador curvo. Para el modelado se tuvo en cuenta las variables de operación del enfriamiento en cristalizadores curvos así como la validación estadística en condiciones de explotación en tiempo real. El modelo obtenido permitió estimar el comportamiento de las variables de control del proceso con suficiente precisión.

**Palabras claves:** enfriamiento, solidificación, colada continua, modelado, aceración.

### Abstract

In the process of primary cooling in the continuous casting of Steel there are physical transformations that affect directly the quality of the final product. The mathematical models that explain this phenomenon cannot be applied to different installations because the variables involved in the process are different. In this research, a physical-statistical model was obtained through multiple and successive regression for the flow of water which is necessary in this complex process. For the modeling the variables of operations in the cured cooling systems were taken into account as well as the statistical validation in conditions of exploitation in real time. The model permitted to predict the behavior of the variables with sufficient precision.

**Key words:** cooling, solidifications, continuous casting, modeling, steelmaking.

## Introducción

La tecnología de colada continua de aleaciones metálicas es un proceso relativamente nuevo. En sus inicios las investigaciones se enfocan en modificar la estructura y los componentes mecánicos de la misma [1]. Durante las décadas posteriores, se afianza su utilización en la industria siderúrgica reemplazando paulatinamente al método convencional de colado de lingotes. Estos años se caracterizan por algunos avances en el modelado de este complejo proceso y un desarrollo de tecnologías y accesorios para el vaciado [2]. Estos avances conllevan a que en la actualidad el 95 por ciento del acero que se produce en el mundo sea a través de este método. En los últimos años, las principales investigaciones en esta esfera están encaminadas al mejoramiento de la tecnología a partir de procedimientos efectivos de modelado, simulación y optimización cuyos resultados coincidan con los experimentos prácticos [3]. Estos logros se traducen en un control eficiente del propio proceso.

Dentro del mismo, el enfriamiento primario en el cristalizador ha sido de gran interés debido a la gran incidencia que tiene sobre la eficiencia y la eficacia del proceso. Por lo antes expuesto, en esta investigación se obtiene un modelo matemático estadístico que permite estimar con precisión el flujo de agua necesario en el molde curvo para garantizar el enfriamiento a partir de las variables del proceso medidas en tiempo real. Para esto, se aplican herramientas estadísticas que permiten modelar el proceso y validar sus resultados.

Los primeros estudios acerca del modelado del enfriamiento en las instalaciones de vaciado se deben a *Savage y Pritchard* [4]. Estos autores obtienen en base a experiencias realizadas en un molde estático una expresión parabólica que permite obtener la densidad de flujo calórico  $q_{acero-molde}$  como función del tiempo de permanencia  $t$  en el cristalizador y después mediante un balance de masa estiman el gasto necesario de agua (ecuación 1). Este modelo tiene la ventaja de ser sencillo, sin embargo en condiciones de explotación comienza a perder su efectividad a velocidades de coladas mayores de 1,8 m/min.

$$q_{acero-molde} \left[ \frac{KW}{m^2} \right] = 2608 - 335\sqrt{t} \quad (1)$$

De igual manera, los autores [5] utilizan el modelo de *Mizikar* como referencia. En él se obtiene el caudal total de agua  $Q$  en función de la velocidad de colada  $V_c$  y la temperatura del metal en la artesa  $T_a$ . La bondad de este modelo lineal radica en que usualmente se utiliza como punto de partida para generar tecnologías de colada en condiciones ideales de intercambio de calor acero-molde-agua durante el enfriamiento primario (ecuación 2). No obstante, como la temperatura varía considerablemente a lo largo de la artesa, este modelo resulta a veces inapropiado para el caudal de agua en las líneas frías.

$$Q = 0.048V_c(1143T_a - 862866) \quad (2)$$

Otros autores como *Skorek y Nawrat* [6], refieren la importancia de los métodos numéricos en la obtención de ecuaciones que describan parcialmente la transferencia de calor en el molde. En su estudio, consideran las condiciones de contorno de tercera especie con frontera variable y desarrollan un modelo que permite estimar el perfil de transferencia de calor en el molde y a través de los fundentes. Este modelo es muy complejo y sus resultados no han sido validados en condiciones industriales.

De la misma manera [7], crearon un sistema a partir del modelado de la velocidad de colada en función de la temperatura del metal vaciado. En el procedimiento expuesto, se obtiene el modelo de transferencia de calor y la distribución de las temperaturas a lo largo del cristalizador curvilíneo. Para obtener la distribución de temperaturas se colocó en la pared del molde cierta cantidad de termocouplas malladas de forma uniforme. Los resultados de esta investigación evidencian que la solidificación ocurre por diferentes mecanismos según la posición a la que se encuentre el metal en solidificación y el menisco del molde.

Autores como *Harbert* [8], separan los mecanismos de transferencia de calor durante el enfriamiento por zonas según tipo de instalación. Para las de tipo radial, con el objetivo de estimar el coeficiente de termo transferencia, desarrolla un modelo estadístico para la estimación del coeficiente global de transferencia de calor. Para esto consideran la transferencia de calor a lo largo del cristalizador como estacionaria en las dos direcciones tangenciales a la dirección de colada. Este modelo tiene la ventaja de que el coeficiente de transferencia global recoja en sí las posibles fluctuaciones de las variables medidas por concepto de cambio de fase.

Sin embargo, estas investigaciones previas evidencian que el modelado del enfriamiento primario de metales todavía está en desarrollo, y que no debe ser tratado indistintamente para una instalación u otra debido a las disímiles variables y perturbaciones implicadas en el proceso, aún cuando se observe ciertas regularidades en innumerables experimentos en cuanto a perfil de solidificación del acero en el molde, dependencia de las propiedades físicas con la composición química y la temperatura, etc.

Conocida la no existencia de un modelo global del proceso de enfriamiento primario, en este trabajo se desarrolla un modelo del caudal de agua a través de regresiones múltiples sucesivas validado en condiciones industriales para controlar el enfriamiento primario de máquinas de colada continua con cristalizador curvo.

## Métodos y Materiales

Para la obtención del modelo se construye la instalación experimental que se acopla a la máquina de colada continua tomada como caso de estudio. Esta máquina posee cinco cristalizadores curvos de aleación de cobre y platino con un metro de longitud y radio de curvatura de tres metros. El molde es refrigerado con agua tratada a temperatura ambiente y la longitud metalúrgica de la misma es 15 m lo que permite colados de sección transversal cuadrada desde 90 x 90 hasta 130 x 130 cm. (Fig. 1). Esta instalación es la más utilizada en la colada continua de aceros debido a la alta fiabilidad en la operación del proceso.

A partir de la instrumentación utilizada se recogen las mediciones las cuales se traducen a señal eléctrica mediante el transductor, que permite el almacenamiento de los datos obtenidos en un procesador digital acoplado a todos los instrumentos de medición de la instalación experimental. Los instrumentos citados tienen las siguientes características técnicas:

- Termopar de inmersión tipo K: resulta adecuado para rangos de temperaturas superiores a los 1200 °C. En la investigación se utilizó un modelo de platino-rodio con error de exactitud de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Con él se mide la temperatura del acero (Tar) líquido al introducirse en el baño metálico que contiene la artesa.
- Termómetro digital de alta precisión: se instala en el sistema hidráulico de la Instalación de Vaciado Continuo, justo a la salida del cristalizador (Tcris). Se utiliza para medir la temperatura del agua a la salida del mismo. Realiza lecturas de 0- 120 °C con una precisión de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ .
- Barómetro: se coloca a la entrada del sistema de enfriamiento primario. Realiza lecturas *on time* de la presión del agua (Pa) que se introduce en el cristalizador medida en BAR. El error de precisión de este equipo es  $\pm 10\text{mBar}$ .
- Medidor de Corioli: Se coloca en la entrada del sistema de alimentación de agua de la instalación. Su error de precisión oscila entre  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  L/min.
- Espectrómetro: Para controlar la marca se muestrea el mismo a través del número de colada. El equipo determina en fracciones de peso los elementos principales del acero al carbono, o sea, %C, % S, % P, % Fe y % Mn.
- Sensor de posición: mide la velocidad de colada (Vc) en m/min. Utiliza el Efecto Doppler para su desempeño y almacena sus lecturas en la base de datos acoplada al Programming Logical Computer.

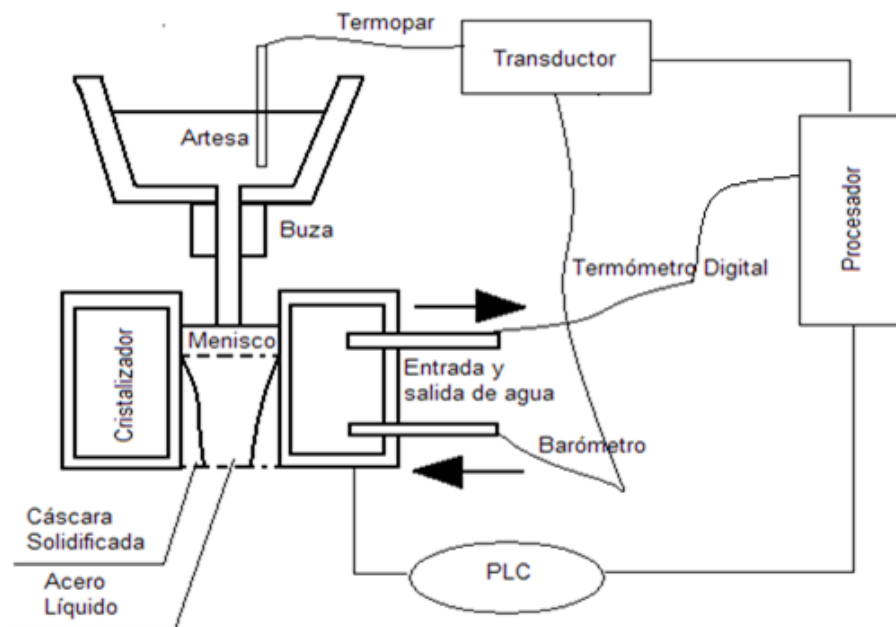


Fig. 1. Instalación experimental en condiciones industriales

Se disponen los equipos con la puesta en marcha de la instalación. Se vierte acero líquido en la artesa hasta la altura deseada y se abren las buzas de forma que se alimente el cristalizador. Una vez que se estabilice el proceso, o sea, que el acero se cuele en condiciones normales sin fluctuaciones en las variables controladas, se comienza a medir en intervalos cortos de tiempo.

El experimento inicia con las lecturas de la temperatura del metal alojado en la artesa mediante el termopar k. Así mismo, durante el enfriamiento primario en el molde, se mide a intervalos la temperatura del agua que sale del molde mediante un termómetro digital. En este trabajo se asume la experiencia planteada por diversos autores [9, 10], para estimar de forma cuantitativa la cantidad de calor extraída al metal durante la solidificación parcial.

En los mismos intervalos de tiempo, se mide la presión del agua a la entrada en el cristalizador mediante el barómetro, puesto que se han encontrado diversos modelos en la literatura especializada [11, 12] que refieren la dependencia directa de la presión como fuerza motriz, con la intensificación de la cantidad de calor extraída durante el enfriamiento.

Después, se registra con el medidor de Corioli y el espectrómetro, la velocidad y la composición química del acero a colar respectivamente. Se consideran estas variables debido a que las propiedades físicas, químicas y tecnológicas son dependientes del sistema de enfriamiento y las transformaciones de fases que se suceden durante el vaciado y permiten caracterizar el enfriamiento primario de las instalaciones de vaciado continuo de acero con moldes curvos.

## Resultados y Discusión

Para la construcción del modelo se tiene en cuenta como variable dependiente el producto escalar del flujo de agua y la diferencia de temperaturas en el cristalizador y como variables independientes, la temperatura del metal en la artesa, la velocidad de colada y la presión a la entrada del molde. Así mismo, se tienen las variables de coordinación con el sistema de mayor envergadura (IVC) y la composición química del acero como perturbación del modelo (Fig. 2).

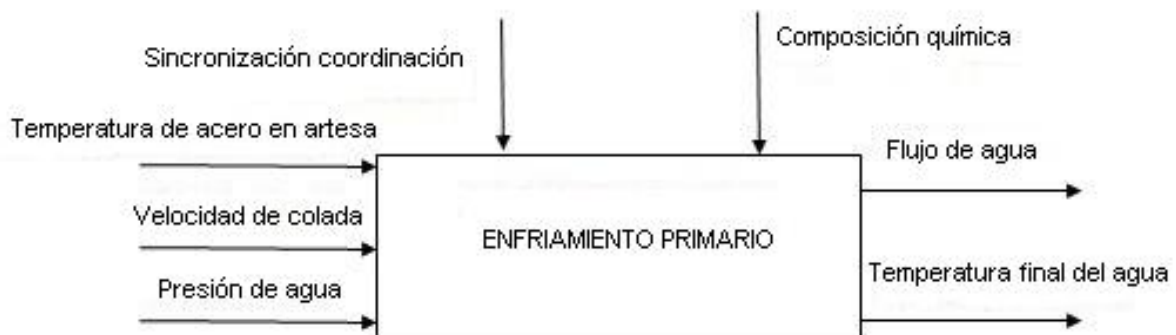


Fig. 2. Análisis externo del enfriamiento primario.

Si se tiene en cuenta las características de las variables del experimento descrito, entonces resulta viable para el diseño estadístico del experimento considerar cuatro variables independientes donde se incluye el conjunto de perturbaciones al modelo como otra variable. Por otra parte, es evidente que el comportamiento de las variables independientes es aleatorio, por esta razón se realiza un diseño del tipo factorial estándar  $3^4$ , obteniéndose como resultado que al menos se deben tener 81 corridas, en este estudio se realizan 96 corridas, pues se replicó varias de ellas.

Para procesar los resultados obtenidos se utiliza un paquete estadístico, en la Tabla I se ofrece el resumen de los resultados obtenidos para cada variable. En ella se aprecia que los parámetros Sesgo y Curtosis estandarizada nunca sobrepasan al valor de dos, lo cual muestra que las variables involucradas siguen una distribución normal. Así mismo, los valores de la Curtosis estandarizada evidencian que no existe una apertura pronunciada de la Campana de Gauss en el espectro de datos medidos. Por otra parte, los valores máximos y mínimos de las mediciones procesadas permiten observar que la variabilidad de estas es aceptable y reflejan las condiciones del proceso en tiempo real.

**Tabla 1.** Resumen estadístico de las variables

Variable	Promedio	V.Max	V.Min	Sesgo Estandarizado.	Curtosis Estandarizada.
%C	0,230	0,210	0,260	-0,90	-1,10
%Mn	0,700	0,840	0,700	0,35	-0,99
%Si	0,185	0,230	0,150	1,40	-1,50
%Cu	0,330	0,420	0,220	-0,77	-1,80
%S	0,024	0,034	0,016	1,60	0,10
%P	0,016	0,025	0,010	1,14	-0,74
Tar	1539,970	1564,000	1515,000	-0,20	0,90
Vc	1,650	1,800	1,500	1,18	-1,11
Tcris	37,900	44,100	33,700	1,90	0,45
Ga	1606,800	1622,000	1590,000	-1,14	-1,53
Pa	5,660	5,800	5,600	1,92	1,80

Para formular el modelo del gasto de agua en el proceso de enfriamiento primario, se someten los datos obtenidos a una regresión múltiple. Esto obedece a la necesidad de obtener el aporte calórico (APORTE) que el agua es capaz de extraerle al acero durante el proceso de solidificación a lo largo del molde. Las primeras regresiones justifican que se desechen las interacciones de tercer y segundo orden entre las variables debido a que el Valor-P de cada una de ellas oscila entre 0,2 y 0,5. El modelo preliminar obtenido mediante regresión con un coeficiente de correlación del 69 por ciento se expone en la ecuación 3.

$$APORTE = 3,69315E6 + 3317,25 \% C - 119398 \% Mn - 121,595 LN \% C + 91247,3 LN \% Mn + 1463,94 LN \% P - 569732 LN T_{cris} - 2214,35 LN V_{col} - 238,379 Pa + 363,445 T_{cris} + 1633,11 T_{cris}^2 + 509,84 V_{col} + 0,22 \% Cu + 0,123 LN \% Si \quad (3)$$

Posteriormente, con el objetivo de refinar el modelo obtenido se realiza una depuración de las variables que estadísticamente no son significativas. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 2. Las variables cuyos resultados del Valor-P son mayores que 0,05 no tienen relación estadísticamente significativa con respecto al aporte de calor del metal al molde por lo que se eliminan de forma escalonada del modelo, es por eso que primero se extrae el % S, el % Cu y el % P respectivamente.

**Tabla 2.** Resumen estadístico de la regresión múltiple.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
%C	-19,6067000	14,4148000	-1,360180	0,0173
%Cu	-1,0566700	3,0075400	-0,351340	0,7262
%Mn	-4,3331600	3,1400300	-1,379970	0,1711
%P	12,6539000	34,4845000	0,366945	0,7146
%S	0,5356130	3,4480000	0,155340	0,8769
%Si	28,0856000	9,4809400	2,962320	0,0039
Ga	-0,0476406	0,0103226	-4,615190	0,0030
Pa	-2,3323100	0,3786530	-6,159510	0,0020
Vc	15,0440000	2,3617100	6,369970	0,0000
Tcris	0,0711232	0,0124831	5,697570	0,0040

Para la realización de la regresión múltiple se realizan los siguientes pasos:

Paso 0: existen 10 variables independientes con sus respectivas interacciones. Ellas explican el modelo de regresión con coeficiente de correlación  $R^2 = 79,93$  por ciento. Si bien este valor es aceptable para condiciones industriales mejora con la eliminación del % S.

Paso 1:

En la regresión múltiple escalonada se obtiene un Valor - P igual a 0,7262 para el % Cu. Al eliminar esta variable se obtiene un coeficiente de correlación  $R^2 = 89,03$  por ciento. Con este valor se considera un modelo bueno, sin embargo, el Valor - P igual a 0,7146 del % P posibilita la obtención de un modelo robusto.

Paso 2:

Cuando no se tiene en cuenta el % P como variable independiente, entonces se obtiene un coeficiente de correlación entre las mismas  $R^2 = 99,93$  por ciento con Cuadrado Medio de los Residuos (CME) menores a 1,5. Con este valor de CME no es posible mejorar el modelo porque no es posible controlar el error. El modelo final obtenido se expone en la ecuación 4.

$$\begin{aligned}
 \text{APORTE} = & 3,69315E6 + 3317,25 \% C - 119398 \% Mn - 121,595 LN \%C + 91247,3 LN \%Mn + 1463,94 LN \% P - \\
 & 569732 LN T_{cris} - 2214,35 LN V_{col} - 238,379 Pa + 363,445 T_{cris} + \\
 & 1633,11 T_{cris}^2 \tag{4}
 \end{aligned}$$

Se valida estadísticamente el modelo mediante una prueba de hipótesis *t de Student*. En esta prueba se consideran dos hipótesis mutuamente excluyentes y exhaustivas a partir de la media determinada por 97 valores obtenidos mediante cálculo utilizando el modelo ( $\mu_{aportC}$ ) y valores reales medidos en la IVC ( $\mu_{aportR}$ ) en tiempo real respectivamente.

- Hipótesis nula:  $\mu_{aportC} = \mu_{aportR}$
- Hipótesis Alternativa.:  $\mu_{aportC} \neq \mu_{aportR}$
- Suponiendo varianzas iguales:  $t = -0,00203599$  valor-P = 0,998378

De interés particular en esta prueba, es el intervalo del 95 por ciento de confianza obtenido para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -0,00203599 hasta 0,998378. El hecho de que contenga al cero es un indicador de que no hay diferencia significativa entre las medias de las variables involucradas en la prueba. El Valor-P obtenido, al ser mayor que 0,05 (tomado como nivel de confianza), indica que no se puede rechazar la hipótesis nula, o sea, que no existe una diferencia significativa apreciable entre las medias de ambas variables.

De igual manera, se realiza una Prueba de *Kolmogorov – Smirnov* para comparar las distribuciones de ambas muestras y comprobar su comportamiento normal. Se considera esta prueba debido a que las poblaciones de ambas muestras son muy grandes para ser procesadas mediante La Prueba de *Chi cuadrado*. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

- Estadístico DN estimado: 0,14433
- Estadístico K-S bilateral para muestras grandes: 1,00514
- Valor- P: 0,265456

En este caso, la distancia máxima es 0,14433 y el valor-P es mayor que 0,05. De lo antes expuesto, se infiere que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones.

Otros resultados que se derivan de las pruebas de comparación se recogen en la Tabla 3. La diferencia entre los estadígrafos obtenidos tales como promedio, máximo y mínimo sustentan la poca variabilidad que existe entre los resultados obtenidos en el modelo y los valores reales.

Por otra parte, entre los coeficientes de variación de ambas muestras, existe una diferencia menor del uno por ciento. Este resultado es válido si se tiene en cuenta que el tamaño de la muestra es grande. Así mismo, la variación de los valores del rango en ambas variables es despreciable, ya que los valores del APORTE medidos y obtenidos en el modelado son del orden de los millares.

**Tabla 3.** Estadígrafos obtenidos en las pruebas de comparación.

	AportC	AportR
Recuento	97	97
Promedio	42,4353	42,4348
Desviación Estándar	1,42	1,81974
Coefficiente de Variación (%)	3,34627	4,28832
Mínimo	38,5424	38,625
Máximo	44,3662	45,075
Rango	5,82372	6,45

Por último, en el gráfico de control (fig. 3) se muestra el comportamiento de 97 valores del APORTE estimado mediante el modelo de regresión y los medidos en la instalación en tiempo real. En este gráfico de control el límite superior e inferior oscila en 1600 y 1470 L/min respectivamente.

Los valores de ambos modelos están prácticamente solapados en un estrecho margen de 120 L/min. De este resultado se deduce que el modelo obtenido puede ser utilizado para estimar el flujo de agua necesario en el molde en condiciones de operación.

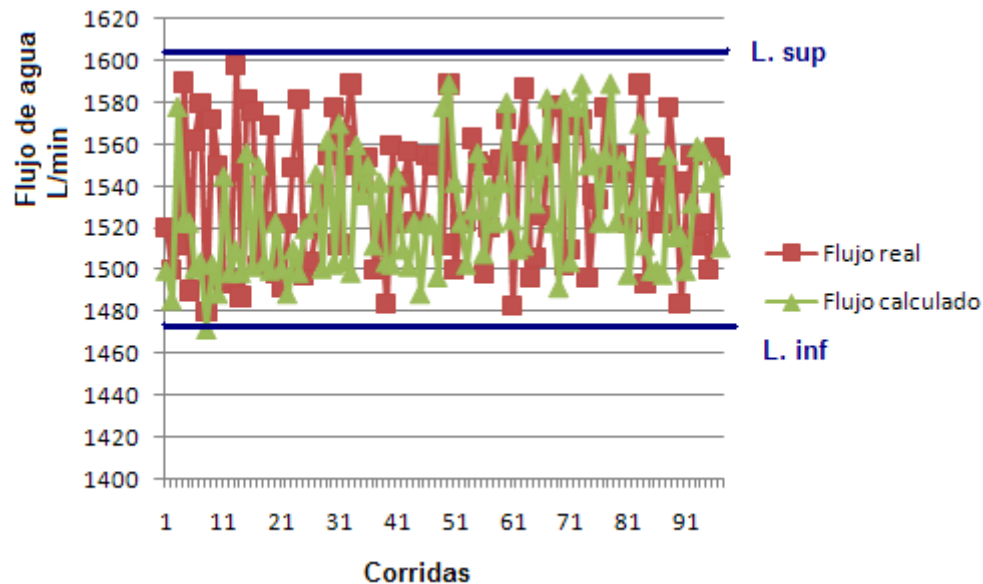


Fig. 3. Comportamiento de los valores obtenidos durante 97 mediciones.

## Conclusiones

El modelo permite predecir el comportamiento de las variables en el enfriamiento primario en cristalizadores curvos durante el proceso de vaciado continuo de aceros en tiempo real.

El hecho de que el nuevo modelo explique el fenómeno con un 99 por ciento de correlación entre las variables demuestra que es factible utilizarlo como modelo alternativo para velocidades de colada mayores a 1,8 m/min.

El comportamiento de los resultados obtenidos concuerdan con la realidad dentro de los límites admisibles para las variables que intervienen en el proceso estudiado y que se controlan estadísticamente a partir de los datos obtenidos.

## Referencias

1. Goldschmit B, "Evolution of continuous casting of metal manufacture". *Journal of materials processing technology*, 2010, vol. 34, nº. 2, p. 42-49, [Consultado el: 15 de marzo del 2012]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0.25562x> ISSN 095-016-2X
2. Palacios, J. M., Arana, J. L. y Larburu, J. I., *Fabricación del acero*, Madrid, España: Editorial Spainfo S.A, 2008, p. 42-48. ISBN 84-481-1728-X
3. Díaz, Y., Fiol, A. y Arzola, J., "Simulación del vaciado continuo de perfiles de aceros al carbono de baja aleación". *Ingeniería mecánica*, 2013, vol. 16, nº. 1, p. 42-49, [Consultado el: 21 de mayo del 2013]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/cgi-bin/wxis.exe/iah/> ISSN 1815-5944
4. Heput, T, y Berciano V, "Modelling and simulations of continuous casting steel". *Revista de Metalurgia* 2009. vol. 48, p 23-26. [Consultado el: 16 de octubre del 2011]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/112323> ISSN 120-298X
5. Arzola, J. *Sistemas de ingeniería*, La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, 2012, p. 292-295. [Consultado el: 20 de septiembre del 2011]. Disponible en: <https://www.dropbox.com/sh/qbbx92zp6tfd8a4/5yq9nkw1aw> ISBN 978-959-07-1762-8

6. Skorek, N, "Inverse finite element technique for identification of thermal resistance of gas-gap between the ingot and mould in continuous casting of metal". *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2010. vol. 17, p. 41-44 [Consultado el: 12 de julio del 2012]. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec/16382570> ISSN 153-154-10.
7. Krishna M, Singh M y Masataka T, "Dual reciprocity boundary element analysis of cooling and conduction problems", *Ironmaking & Steelmaking*, 2009, vol. 38, p. 22-60. [Consultado el: 12 de junio de 2011]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01524863> ISSN 016 91317
8. Habert, G, "A numerical model for a heat flux DSC: Determining heat transfer coefficients within a DSC". *Ironmaking & Steelmaking*. 2009, vol. 36, p. 12-160. [Consultado el: 2 de abril de 2011]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01691317> ISSN 016 91317
9. Guo Z, Saunders N y Schille J, "Modeling of materials properties and behavior critical to casting simulation" *Material Science and Engineers* . 2006. vol. 40A. p. 413 - 414. DOI 10.1016/j.msea2006.09.036 ISSN 578 582
10. Slodicka, M y Schepper, H, "Determination of heat transfer coefficient during solidification of alloys", *Computers methods in applied mechanics and engineering*. 2009, vol. 43, p. 91-98. DOI 10.1016/j.cma.2009.04.010 ISSN 016 91323
11. Janik, M. y Dyja H, "Modelling of three - dimensional temperature field inside the mould during continuous casting of steel". *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2009. vol. 10, p. 62-66, [Consultado el: 13 de enero del 2009]. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec/15315410> ISSN 153-154-10
12. Zarka, J, *Intelligent optimal design of complex systems*. France: Editorial Wards systems, 2008, p. 265-269. ISBN 831-232-869-13