Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM Vol. 15, N.º 30, pp. 85-91 Julio - Diciembre 2012

Modelo empírico del enfriamiento del acero líquido en cuchara de 15 TM: una perspectiva industrial

Continuous cooling model of liquid steelin 15-ton casting ladle: an industrial approach

Salvatore Mancha Gonzales*

Recibido: 05/05/2013 - Aprobado: 12/07/2013

RESUMEN

Se busca desarrollar un modelo matemático que pronostique el decaimiento de la temperatura del acero líquido en una cuchara de 15 TM. Las tomas de temperatura se efectuaron en las coladas de producción, midiéndose la temperatura después de escoriado y antes de vaciar al horno de mantenimiento, también se registró el tiempo entre las dos tomas de temperatura. Luego la data obtenida fue analizada hasta obtener los parámetros del modelo particular (K y T_0). La deducción del modelo fue obtenida a partir de una Ecuación Diferencial Ordinaria (EDO) homogénea. Se comparo el valor del pronóstico del modelo obtenido con nuevos valores de temperaturas medidas. Para efectuar el pronóstico de temperatura se usaron dos valores distintos de T_0 , uno con un valor constante de T_0 , tal como se muestra en el modelo hallado, y otro con T_0 , variable que era numéricamente igual a la temperatura después de escoriado, ambos pronósticos fueron contrastados con varios indicadores. Del cual se determinó la influencia del valor T_0 en el modelo. Se evaluó la estabilidad del parámetro K mediante prueba t-student para las dos series de datos y por último se estima el error total de medición de temperatura considerando el error del pronóstico y el error del equipo empleado.

Palabras clave: modelamiento, acero líquido, colada, decaimiento de temperatura

ABSTRACT

A mathematical model was prepared for liquid steel temperature decay forecast in a 15 ton casting ladle. Temperatures were recorded for the production batches. Additionally, temperatures were also registered after each excoriation and before maintenance furnace was emptied. Time elapsed between temperatures was also taken. The data collected was analyzed until model parameters were obtained (K and To). In order to find the model an ordinary differential equation (EDO) was applied. The model was tested by comparing the forecasted values with new measured temperatures. Two different values of To were used for temperature forecasting. One of these was a constant To as shown in the worked out model. Another temperature To, was variable and numerically equal to the temperature after excoriation. The two forecasts were contrasted with various indicators. From the preceding analysis the influence of To on the model was determined. The k parameter stability was evaluated through a statistical t-test applied to the two data series. Finally the total temperature measurement error was estimated from the forecasted and the equipment errors.

Keywords: modeling, grey cast iron, batch, temperature decay

* Supervisor de Producción en Metalúrgica Peruana S.A - MEPSA. E-mail: salvatore_mancha@mail.com

I. INTRODUCCIÓN

La producción en grandes lotes de piezas de acero, requiere un suministro continuo de acero líquido, por esto, cada cierto tiempo, la unidad de acería envía acero líquido en cantidades considerables a la unidad de vaciado para así mantener la producción de piezas fundidas.

El acero a colar en los moldes debe cumplir con las especificaciones de calidad tanto en su composición química, como de temperatura. Para vaciar el acero a los moldes, primero debe ser vaciado al horno mantenedor que cumple la función de reservorio a condiciones especiales. La temperatura de colada es una condición crítica, pues se tiene riesgo rechazo si no llega con la temperatura adecuada, aun presentando la composición química apropiada. La baja temperatura del acero líquido tendría como causas inmediatas, la baja temperatura de la cuchara por falta de calentamiento apropiado, el tiempo de espera después de vaciado el horno de acería por diversas razones; restos de acero sólido o pastoso en paredes internas de la cuchara lo cual resta temperatura al entrar en contacto con el acero líquido. Por referencias especializadas, este último punto, se tiene a considerar la temperatura *liquidus*:

> Es imprescindible evitar que la temperatura del acero líquido caiga por debajo de la temperatura *liquidus* (es decir, la temperatura en la que el acero comienza a solidificarse). La temperatura *liquidus*, T_{liq}, depende mucho de la composición y puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:
>
> $T_{liq} = 1537 - 78\%C - 7.6\%Si - 4.9\%Mn - 34.4\%P - 38\%S$
>
> En la práctica es necesario mantener la temperatura del acero ligeramente por encima de la temperatura *liquidus*, debido a las variaciones de temperatura dentro del acero (es decir, los bordes y las esquinas tienden a alcanzar una temperatura menor). La diferencia entre la temperatura *liquidus* y la temperatura real se denomina sobrecalentamiento. Asegúrese que el sobrecalentamiento siempre sea superior a los 10 °C para evitar el congelamiento. (Universidad Liverpool, 2007).

Después que el acero es sangrado de acería, es trasladado en cuchara al área de vaciado, seguido debe ser escoriado para remover impurezas, medida la temperatura para decidir si es vaciado o no al horno mantenedor, para después ser vaciado a los moldes. La evaluación composición química del acero es realizada antes de sangrar del horno de acería.

La mayor parte de las veces el acero líquido llega con alta temperatura, lo cual es evidenciado después de medir la temperatura al fin de escoriado, es por esto que se tienen que esperar hasta llegar a la temperatura apropiada para ser vaciado al horno mantenedor. Pero, ¿cuánto se debe esperar para obtener la temperatura apropiada?

Una respuesta se puede encontrar en la construcción de un modelo, esto permitiría relacionar temperatura y tiempo de espera. El modelo se constituiría como herramienta de uso frecuente, aplicable cada vez que se tenga que vaciar colada al horno mantenedor, así se evitaría obstrucciones en ducto de ingreso por metal pastoso; sobrecarga en el horno mantenedor al saber cuánto puedo esperar hasta bajar el nivel de acero; perforaciones de las paredes del horno por alta temperatura del acero líquido. Estas dos últimas condiciones ponen en riesgo la integridad estructural del horno, parte del mecanismo de vasculamiento y la integridad física del hornero a causa del incendio que se generaría al iniciar la fuga.

La modelización para un proceso industrial se ha desarrollado por compañías productoras de acero, como parte de su proceso de investigación y desarrollo aplicado a su propio proceso productivo. Estos modelos buscan satisfacer una necesidad particular, las cuales son implementados en software específico para su proceso productivo. Los elementos que intervienen en su modelo están restringidos a su equipamiento y procedimientos empleados al momento de producir el acero.

Experiencia sobre modelado para proceso de producción de acero a nivel industrial, se hace referencia en presentaciones de la compañía acerera Gerdau, el cual para una etapa específica del proceso de colada continua desarrolló un modelo como se esquematiza en la siguiente imagen. (Ver Figura N.° 1).

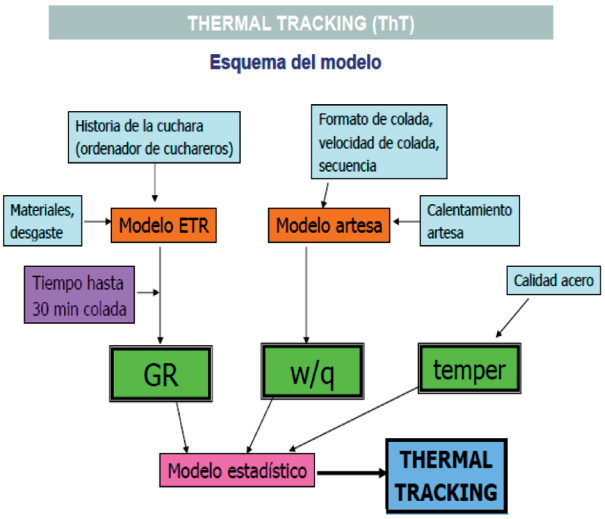

Figura N.º 1. Esquema de modelado en el proceso colada continua - Gerdau

Fuente: GERDAU, 2005.

Para el presente estudio se modelará una ecuación considerando tonelaje constate de acero líquido (15 TM) que es la capacidad de la cuchara, la temperatura del acero después de escoriado y el tiempo de espera hasta que llegue a la temperatura estándar para el ingreso al horno mantenedor.

II. METODOLOGÍA

La elección del modelo se fundamenta en el comportamiento de la variable como es la disminución de la temperatura con respecto al tiempo, lo cual se muestra en la siguiente ecuación diferencial:

Ecuación diferencial ordinal (1.0)

Después de obtener la ecuación particular se analiza la data recolectada, obteniéndose los parámetros del modelo encontrado.

Los datos por analizar fueron la temperatura después de escoriado el tiempo de espera y la temperatura antes de introducir al horno mantenedor.

Después de encontrar los parámetros del modelo, se recolecta otra serie de datos para efectuar una comparación entre

valores pronosticados por el modelo y los datos recolectados. También se evalúa la desviación entre ambos valores, mediante una serie de indicadores, del cual se selecciona la serie que obtuvo menor valor de los indicadores como el modelo más apropiado.

Al obtener dos series de datos de temperaturas, una para la construcción del modelo y otra para la verificación, se evalúa otro parámetro del modelo como es K, para esto se calcula el promedio de K para cada serie de datos y se prueba la estabilidad de este parámetro (K) mediante la prueba t- student.

De (1.0) se despeja

$$\frac{dT}{T} = kdt$$

Integra

$$\int \frac{dT}{T} = k \int dt$$

$$\text{Ln } (T\text{-}T_0) = kt \qquad (2.0)$$

Tomando antilogaritmo y reagrupando

$$T = T_0 e^{kt} \qquad (3.0)$$

Reemplazando T por T_t y $T_0 = C$

$$T_t = C.e^{kt} \qquad (4.0)$$

III. EXPERIMENTACIÓN

La medida de la temperatura de colada en las dos oportunidades, se efectuó con un pirómetro de inmersión para alta temperatura, las puntas del pirómetro fueron termocuplas tipo perecibles, siendo necesario usar una nueva para cada medición, el valor de la temperatura se observó directamente en display del cual se registró la data para el estudio.

Posteriormente la data fue procesada mediante hoja de cálculo Excel, empleando la opción de herramienta de análisis estadístico. Los resultados fueron extraídos de la hoja de cálculo y graficado la curva de la ecuación encontrada.

Los datos experimentales para despejar C y k se muestran en la Tabla N.° 1.

Tabla N.º 1. Resumen de datos experimentales para determinación del modelo

T_0	t	T_t	C	$N = (T_t/T_0)$	Ln(N)	$K = Ln(N)/t$
1568	612	1533	1568	0.977678571	-0.02257432	-3.68861E-05
1645	2009	1528	1645	0.92887538	-0.07378069	-3.67251E-05
1684	1946	1568	1684	0.93111639	-0.07137099	-3.66757E-05
1614	1178	1546	1614	0.957868649	-0.04304462	-3.65404E-05
1683	2674	1525	1683	0.906120024	-0.09858351	-3.68674E-05
1577	226	1564	1577	0.9917565	-0.00827767	-3.66268E-05
1624	1488	1538	1624	0.947044335	-0.05440937	-3.65654E-05
1620	896	1568	1620	0.967901235	-0.03262523	-3.64121E-05
1667	1351	1586	1667	0.951409718	-0.04981048	-3.68693E-05
1663	1837	1554	1663	0.934455803	-0.06779095	-3.69031E-05
1701	2337	1561	1701	0.917695473	-0.08588967	-3.67521E-05
1630	1352	1551	1630	0.951533742	-0.04968013	-3.67457E-05
1628	1448	1544	1628	0.948402948	-0.05297582	-3.65855E-05
1595	564	1563	1595	0.979937304	-0.02026668	-3.59338E-05
1655	1660	1557	1655	0.940785498	-0.06104012	-3.67712E-05
1565	284	1549	1565	0.989776358	-0.01027626	-3.6184E-05
1721	2391	1576	1721	0.915746659	-0.08801553	-3.68112E-05
1618	643	1580	1618	0.976514215	-0.02376597	-3.69611E-05
1696	2544	1544	1696	0.910377358	-0.09389609	-3.69088E-05
1693	2277	1557	1693	0.919669226	-0.08374121	-3.6777E-05
1562	230	1549	1562	0.991677337	-0.00835749	-3.63369E-05
1673	1864	1562	1673	0.933652122	-0.06865137	-3.68301E-05
1696	2749	1533	1696	0.903891509	-0.10104594	-3.67573E-05
1685	2094	1560	1685	0.925816024	-0.07707974	-3.68098E-05
1597	417	1573	1597	0.984971822	-0.01514225	-3.63123E-05
1619	1086	1556	1619	0.961087091	-0.03969025	-3.65472E-05
1670	1576	1576	1670	0.943712575	-0.05793363	-3.67599E-05
1674	1462	1586	1674	0.947431302	-0.05400085	-3.69363E-05
1657	833	1607	1657	0.969824985	-0.03063965	-3.67823E-05
1669	2341	1531	1669	0.917315758	-0.08630353	-3.68661E-05
1648	1997	1531	1648	0.929004854	-0.07364131	-3.6876E-05
1670	2728	1510	1670	0.904191617	-0.10071398	-3.69186E-05
1619	1270	1545	1619	0.954292773	-0.04678476	-3.68384E-05
1603	656	1565	1603	0.976294448	-0.02399105	-3.65717E-05
1675	1935	1560	1675	0.931343284	-0.07112734	-3.67583E-05
1663	1674	1564	1663	0.940469032	-0.06137656	-3.66646E-05
1585	545	1554	1585	0.98044164	-0.01975216	-3.62425E-05
1666	1685	1566	1666	0.93997599	-0.06190095	-3.67365E-05
	PROMEDIO	1644.2				-3.6685E-05

To: Temperatura (°C) después de escoriado el acero líquido

Tt: Temperatura (°C) del acero líquido antes e vertido al horno mantenedor

t: Tiempo transcurrido (s) desde la primera medida de temperatura hasta antes de vaciar la colada al horno mantenedor

C: Constante de la ecuación numéricamente igual a la primera temperatura

Después de encontrar valores C y K para cada dato, se toma promedio de todos estos.

$$C = 1644.2$$

Redondeando a entero. C = 1644

$$= -3.6685 \text{ E-}05$$

La ecuación queda:

$$T_t = 1644e^{-3.6685E-05(t)} \qquad (7.0)$$

Graficando la curva (Ver Figura N.° 2).

El parámetro tiempo (t) está en segundos, el valor de K se muestra como un número muy pequeño (-3.6685 E-05), además de presentar en el eje de las abscisas en escala logaritmos.

Cambiando la escala de tiempo de segundos a minutos (Ver Figura N.° 3).

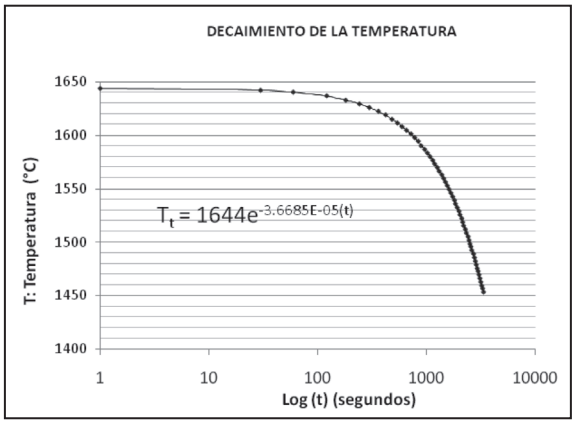

Figura N.º 2. Decaimiento de temperatura de colada en segundos.

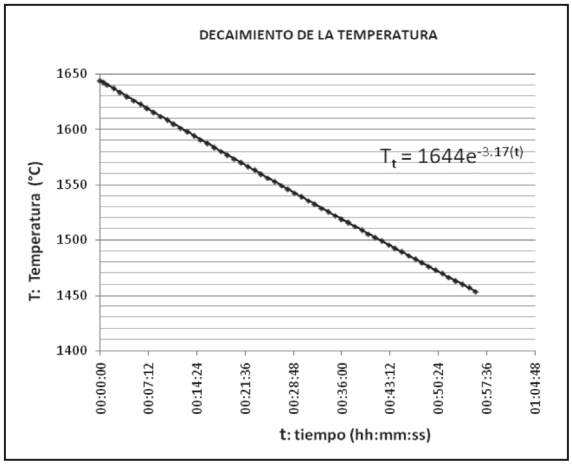

Figura N.º 3. Decaimiento de temperatura de colada en minutos.

La escala de tiempo está con formato (hh.mm.ss) y el respectivo eje no se presenta en escala logarítmica. También se observa que el valor K cambia, producto de la transformación numérica se segundos a minutos. El valor K queda solo con valores centésimos (-3.17), esto es más fácil de emplear para pronosticar temperaturas (T_t) después de un tiempo determinado t, que es muy útil para el hornero que introducirá la colada al horno mantenedor.

De la gráfica se puede entender: si la temperatura inicial de la colada es 1644 °C, después de 55 minutos tendrá una temperatura de 1450 °C, aproximadamente.

Para evaluar el modelo se toma nuevos datos de temperatura y emplea el modelo para pronosticar dos series de valores. La primera serie emplea un valor C fijo (C = 1644), el valor K es igual al del modelo (K = -3.6685 E-05), la siguiente serie el valor C son los valores de temperatura después de escoriado T_0. Los valores tomados se muestran en la Tabla N.° 2.

La comparación de las dos series de datos (Ver Tabla N.°3) se realizara mediante los diversos indicadores.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO

Después de calculado los parámetros de la ecuación es necesaria la evaluación del pronóstico, mediante una serie de estadísticos.

> Para determinar si un pronóstico es adecuado, se usan los estadísticos que se presentan a continuación. La idea general de todos estos estadísticos es que comparan los valores reales con aquellos que han sido pronosticados. Ahora bien, como los errores pueden ser positivos o negativos, la simple suma de ellos no sería de gran ayuda puesto que se cancelarían entre ellos. Es por eso que los índices trabajan ya sea con los errores al cuadrado o con el valor absoluto de los errores.
>
> Normalmente se utilizan estos estadísticos como elementos de comparación con los pronósticos de otros modelos. Se asume que el mejor modelo es aquel que tiene los estadísticos con los menores valores(Court, Williams, 2011).

La utilización de estos indicadores se encuentra ampliamente difundido para los pronósticos obtenidos mediante métodos lineales, y para la evaluación de modelos no lineales también se emplea algunos de estos como se muestran en otros estudios.

> A fundamental concern in forecasting is the measure of forecasting error for a given data set and a given forecasting method. Accuracy can be defined as "goodness of fit" or how well the forecasting model is able to reproduce data that is already known (Makridakis and Wheelwright, 1989).
>
> This study used three standard error measures: mean squared error (MSE), mean absolute percent error (MAPE), and mean absolute deviation (MAD). (Eng Auburn, 1995).

Para este estudio emplearemos los indicadores MSE, MAD y MAPE que presentan las siguientes fórmulas:

Tabla N.º 2. Datos para verificación de pronóstico

T_0	t	T_t	C	N = (T_t/T_0)	Ln(N)	K = Ln(N)/t
1640	1662	1543	1640	0.977679	-0.022574	-3.68861E-05
1605	1011	1547	1605	0.928875	-0.073781	-3.67251E-05
1636	962	1579	1636	0.931116	-0.071371	-3.66757E-05
1680	1842	1570	1680	0.957869	-0.043045	-3.65404E-05
1701	2164	1571	1701	0.906120	-0.098584	-3.68674E-05
1663	1521	1573	1663	0.991756	-0.008278	-3.66268E-05
1666	1594	1571	1666	0.947044	-0.054409	-3.65654E-05
1582	416	1558	1582	0.967901	-0.032625	-3.64121E-05
1663	1767	1558	1663	0.951410	-0.049810	-3.68693E-05
1567	461	1541	1567	0.934456	-0.067791	-3.69031E-05
1635	844	1585	1635	0.917695	-0.085890	-3.67521E-05
1662	2356	1524	1662	0.951534	-0.049680	-3.67457E-05
1621	1504	1534	1621	0.948403	-0.052976	-3.65855E-05
1644	1094	1579	1644	0.945272	-0.056272	-3.64254E-05
1590	932	1537	1590	0.942141	-0.059567	-3.62652E-05
1639	886	1587	1639	0.939011	-0.062863	-3.61051E-05
1671	1627	1574	1671	0.935880	-0.066159	-3.59449E-05
PROMEDIO			1639.1			-3.658E-05

Tabla N.º 3. Resumen de pronósticos y parámetros para análisis

VALORES MEDIDOS			CONSTANTE	Serie 1	PRONOSTICO 1	Serie 2	PRONOSTICO 2
T_0	t	T_t	k	C fijo	T_t	C = T_0	T_t
1640	1662	1543	-3.6685E-05	1644	1546.76	1640	1543.00
1605	1011	1547	-3.6685E-05	1644	1584.14	1605	1546.56
1636	962	1579	-3.6685E-05	1644	1586.99	1636	1579.27
1680	1842	1570	-3.6685E-05	1644	1536.58	1680	1570.23
1701	2164	1571	-3.6685E-05	1644	1518.53	1701	1571.18
1663	1521	1573	-3.6685E-05	1644	1554.78	1663	1572.75
1666	1594	1571	-3.6685E-05	1644	1550.62	1666	1571.37
1582	416	1558	-3.6685E-05	1644	1619.10	1582	1558.04
1663	1767	1558	-3.6685E-05	1644	1540.81	1663	1558.62
1567	461	1541	-3.6685E-05	1644	1616.43	1567	1540.72
1635	844	1585	-3.6685E-05	1644	1593.88	1635	1585.15
1662	2356	1524	-3.6685E-05	1644	1507.88	1662	1524.39
1621	1504	1534	-3.6685E-05	1644	1555.75	1621	1533.99
1644	1094	1579	-3.6685E-05	1644	1579.33	1644	1579.33
1590	932	1537	-3.6685E-05	1644	1588.74	1590	1536.56
1639	886	1587	-3.6685E-05	1644	1591.42	1639	1586.58
1671	1627	1574	-3.6685E-05	1644	1548.75	1671	1574.18

$$MSE = \sum_{j=t+1}^{t+r}\left(y_j - g_{t,j}\right)^2/r \quad (8.0)$$

$$MAD = \sum_{j=t+1}^{t+r}\left(y_j - g_{t,j}\right)/r \quad (9.0)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{j=t+1}^{t+r}\left|\frac{y_j - g_{t,j}}{g_{t,j}}\right|}{r} * 100 \quad (10.0)$$

Donde:

y_j = Valor observado de los datos

$g_{t,j}$ = Valor pronosticado por la ecuación

r = número de periodo

Para este estudio se busca determinar la desviación de los valores observados de los pronosticados, para ambas series de datos. El resumen de los valores se ve en las Tablas N.° 4, 5 y 6.

Tabla N.º 4. Resumen de datos pronosticados para la serie 1 y cálculo de indicadores

r	y_i	$g_{t,j}$	$[y_i - g_{t,j}]$	$[y_i - g_{t,j}]^2$
1	1543	1546.76	-3.759	14.131
2	1547	1584.14	-37.143	1379.625
3	1579	1586.99	-7.993	63.896
4	1570	1536.58	33.421	1116.962
5	1571	1518.53	52.465	2752.592
6	1573	1554.78	18.219	331.948
7	1571	1550.62	20.378	415.246
8	1558	1619.10	-61.101	3733.388
9	1558	1540.81	17.187	295.409
10	1541	1616.43	-75.431	5689.806
11	1585	1593.88	-8.878	78.822
12	1524	1507.88	16.123	259.964
13	1534	1555.75	-21.750	473.084
14	1579	1579.33	-0.327	0.107
15	1537	1588.74	-51.741	2677.131
16	1587	1591.42	-4.424	19.574
17	1574	1548.75	25.254	637.746
			Σ =	19939.431
			MAPE =	117290.8%

Tabla N.º 5. Resumen de datos pronosticados para la serie 2 y cálculo de indicadores

r	y_i	$g_{t,j}$	$[y_i - g_{t,j}]$	$[y_i - g_{t,j}]^2$
1	1543	1542.996	0.004323	1.869E-05
2	1547	1546.563	0.436734	1.907E-01
3	1579	1579.271	-0.27087	7.337E-02
4	1570	1570.227	-0.22673	5.141E-02
5	1571	1571.185	-0.18478	3.414E-02
6	1573	1572.749	0.250573	6.279E-02
7	1571	1571.373	-0.37283	1.390E-01
8	1558	1558.04	-0.04045	1.636E-03
9	1558	1558.62	-0.61999	3.844E-01
10	1541	1540.722	0.277937	7.725E-02
11	1585	1585.153	-0.15257	2.328E-02
12	1524	1524.386	-0.3862	1.491E-01
13	1534	1533.985	0.01488	2.214E-04
14	1579	1579.327	-0.32716	1.070E-01
15	1537	1536.556	0.443926	1.971E-01
16	1587	1586.584	0.415822	1.729E-01
17	1574	1574.182	-0.18197	3.311E-02
			Σ =	1.69751
			MAPE =	9.9854%

Tabla N.º 6. Resumen de resultados de indicadores para ambas series de datos

SERIE	MSE	MAD	MAPE
1	1172.9076	-5.2647	1.7043
2	0.0998	-0.054	0.0173

Los resultados de los indicadores muestran claramente que la serie 2 es la que presenta menores valores en todos los indicadores, por lo que se considera emplear el modelo con el valor C igual a la temperatura después de escoriado.

4.2. Estabilidad del parámetro k

Para analizar la estabilidad del parámetro k, se analizaron los K calculados para construir el modelo (n = 38) y los valores de K a partir de los datos confirmatorios (n = 17). El valor c se consideró a la temperatura después de escoriado.

El promedio de K calculado para la primera serie de datos (Xa) fue contrastado con el promedio de K (Xb) obtenido de la serie de datos de verificación, mediante la prueba t-Student, con el objeto de determinar si existe alguna diferencia entre los promedios de K. La prueba de hipótesis a plantear será:

$$H_o: X_a = X_b$$

$$H_a: X_a \neq X_b \qquad (11.0)$$

Se encuentra que p-valué $>$ [0.0963 $>$ 0.05]; Se rechaza la alterna y se acepta la H_0, es decir los promedios son iguales (Tabla N.° 7).

4.3. Determinación del error total de medición

Después de encontrar parámetros del modelo, determinar su influencia y verificar su estabilidad queda por determinar el error total de la medición. Para determinar esto se tiene que considerar lo siguiente:

Tabla N.º 7. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	Kconstruccion	*Kverificacion*
Media	-3.66854E-05	-3.65821E-05
Varianza	5.47311E-14	7.72353E-14
Observaciones	38	17
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	27	
Estadístico t	-1.336227774	
P(T<=t) una cola	0.096314028	[p-value]
Valor crítico de t (una cola)	1.703288423	

Para tratar correctamente los resultados de las mediciones escribir y estimar objetivamente la veracidad del valor obtenido de la magnitud que se mide, hay que tener en cuenta la precisión limitada del aparato de medida, así como estimar los errores sistemáticos y accidentales (Spiridonov, Lopatkin, 1973).

El error total será igual a:

Error total = Error equipo + Error accidental

$$E_t = E_q + E_{ac} \qquad (12.0)$$

Error equipo (E_q): Valor obtenido de información técnica del equipo o fabricante ($\pm$ 10 °C $\approx$ 0.01

Error accidental (E_{ac}): Valor calculado mediante fórmula:

$$E_{ac} = \frac{t_{1-\alpha}[gl] * S}{\sqrt{n}} \qquad (13.0)$$

t_{1-a} [gl] : Valor crítico de t para los grado de libertad(gl)
S : raíz cuadrada de la varianza
n : número de datos

Remplazando datos:

$$E_{ac} = \frac{(1.6870) * \sqrt{5.47311E-14}}{\sqrt{38}}$$

$$E_{ac} = \frac{(1.6870) * (2.3394E-7)}{6.164414}$$

$$E_{ac} = 6.402178E-8 \qquad (14.0)$$

El error accidental $E_{ac} < 0.01$; también $E_{ac} < E_q$

Se puede observar que el error de equipo es significativamente mayor que el error accidental, por lo influye más en la validez del pronóstico.

V. CONCLUSIONES

1. La determinación de la ecuación para la pérdida de temperatura del acero líquido fue alcanzada, obteniéndose el siguiente modelo:

$$T_t = 1644e^{-3.6685E-05(t)} \quad \text{t en segundos}$$

$$T_t = 1644e^{-3.17(t)} \quad \text{t en minutos}$$

2. Para el cálculo de temperatura de ingreso al horno mantenedor es apropiado emplear la temperatura después de escoriado como reemplazo de constante C, pues así se minimiza el error del pronóstico.
3. El parámetro k del modelo puede emplearse hasta tres cifras significativas sin mostrar mayor repercusión en el pronóstico.
4. La determinación de los parámetros se realiza con una carga casi constante de acero líquido como es 15 TM, si bien las referencias muestran la influencia de la composición química sobre la temperatura *solidus*, queda aún por determinar si una alteración en la masa de acero tendrá una mayor influencia sobre el parámetro K.
5. Después de calculado el error total del pronóstico se encuentra que la mayor fuente de error vendría del factor de equipo, por lo que tendría realizar calibraciones periódicas del equipo a fin de minimizar mayores distorsiones.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la empresa Metalúrgica Peruana S. A., por permitirme resolver problemas que desafían los conocimientos profesionales y por propiciar más estudios de investigación en los que colabora con la revisión de los fundamentos científicos y tecnológicos de las diversas disciplinas de la ingeniería. Al IIGEO de la Universidad Mayor de San Marcos por la asesoría, revisión y corrección de esta publicación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. "Simulación de la colada continua, versión 1.60. Guía del Usuario", (2007) ©The University of Liverpool [En línea] URL<http://www.steeluniversity.org/content/html/spa/CC_UserGuide.pdf> Consulta, 29 de abril 2013.
2. "Simulación y Modelización Procesos Acería" (2005). Gerdau I+D Europa [En línea] URL<http://www.gerdau.es/pdf/tecnologia/05_es.pdf> Consulta, 29 de abril 2013
3. Court E. y Rengifo E. (2011). Estadísticas y Econometría Financiera. Editorial CENGAGE Learning.
4. A comparison of Traditional Forecasting Techniques and Neural Networks (1995) [En línea] URL <www.eng.auburn.edu/~wilambm/pap/1995/ANNIE'95_A_comparison_of_traditional_forecasting.pdf > Consulta, 26 de abril 2013.
5. Spiridonov, V.P., Lopatkin A.A. (1973). Tratamiento Matemático de Datos Físico Químicos. Editorial MIR, pp. 72.