

# MODELACIÓN DE LA DENSIDAD DE PULPA DEL SEDIMENTADOR SD-109 A, CON AYUDA DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES.

**Autores: MsC. Deynier Montero Góngora<sup>1</sup>, Ing. Yoandris Columbié Fornaris<sup>2</sup>,  
Lic. Leonardo Rodríguez Mestre<sup>3</sup>**

*1,2,3 Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*

**Resumen:** En la presente investigación se aborda la temática de las redes neuronales artificiales, aplicada a los procesos industriales, en específico al proceso de sedimentación de pulpa en la UBP “Lixiviación” de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para el desarrollo de la investigación se identificaron las principales variables que caracterizan el proceso y se tomaron datos que comprenden un período de un mes de explotación de la instalación, a los cuales se le realizó un análisis de regresión paso a paso hacia atrás. Este análisis permitió determinar que el coeficiente de correlación lineal no alcanzó valores superiores a 0,6. Se identificó una red neuronal del tipo feed – forward backpropagation de dos capas para modelar la densidad de pulpa; que alcanzó valores de coeficiente de correlación de 0,91 en su entrenamiento y validación, así como 0,67 en su generalización.

**Palabras claves:** red neuronal artificial, feed-forward backpropagation, sedimentación de pulpa.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas de control modernos en un contexto mundial constituyen un papel fundamental en el desarrollo de soluciones a inconvenientes o problemas presentados en las aplicaciones domésticas e industriales. Los principales aportes de los sistemas de control modernos a nivel industrial contribuyen a la innovación tecnológica, la rentabilidad y la mantenibilidad de los procesos a los cuales se controla.

Dentro de las estrategias de control avanzado que se investigan para la automatización de procesos complejos se encuentran: el control adaptable, control predictivo basado en modelos, control robusto, control inteligente, entre otros. El control inteligente descansa en varias técnicas como: lógica difusa, algoritmos evolutivos, redes neuronales artificiales.

Las redes neuronales artificiales pueden ser usadas con efectividad y precisión para la modelación de sistemas con dinámicas complejas, especialmente para procesos no lineales que varían en el tiempo. El interés creciente en las redes neuronales se debe a su gran versatilidad y al continuo avance en los algoritmos de entrenamiento de redes y en el hardware (Ljung & Sjöberg, 1992; Isermann, Ayoubi, Konrad, & Reiss, 1993; Valverde, 2007; Santos, 2011).

Las empresas productoras de níquel se caracterizan por presentar procesos continuos de gran complejidad; que requieren de la automatización para lograr mayor eficiencia en sus producciones. La Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, ubicada en Moa,

provincia de Holguín, opera según el esquema de lixiviación carbonato-amoniaco del mineral reducido.

Esta empresa cuenta con la UBP "Lixiviación", donde se deben cumplir ciertas especificaciones: en los sedimentadores de pulpa la descarga debe ser regulada de tal manera que, aun retirando lodo con la menor humedad posible, sustancialmente la misma cantidad de sólidos por día que es alimentado al sedimentador debe ser retirado en la forma de lodo espesado. Si la alimentación al sedimentador varía grandemente, la descarga debe ser regulada para remover una cantidad de lodo aproximadamente igual a la cantidad media de sólidos que entra al espesador, siendo que cambios frecuentes en bombeo son indeseables. Por todo esto es importante mantener un control de la densidad de la pulpa a la salida de los sedimentadores.

Existe insuficiente conocimiento por parte de los operadores de cómo controlar las principales variables que se registran en el sedimentador. Se han producido constantes averías que han impedido la operación continua del sedimentador SD-109 A debido a la elevada aglomeración de mineral en todas las estructuras de la cercha y brazos, provocando torque desigual en los brazos y la acumulación de sólidos en las cámaras superior e inferior del alimentador. Se ha detectado además obstrucción elevada de sólido en la línea de entrada a la cámara superior del alimentador.

Se toma como problema de la investigación las ineficiencias en el control de la densidad de la pulpa en el fondo del sedimentador SD-109 A de la UBP "Lixiviación" y como objetivo obtener un modelo neuronal artificial para la densidad de pulpa en el fondo del sedimentador a partir de las principales variables de entrada; utilizando Matlab como herramienta de cálculo.

### **Descripción del proceso de sedimentación de pulpa**

Los sólidos se sedimentan formando una pulpa con una densidad de 1700-1750 g/L, la cual es movida por los brazos de los sedimentadores (Figura 1) hacia el centro de este, donde es succionada y bombeada a dos sedimentadores, actuando estos como una segunda etapa de sedimentación (etapa pasiva de la lixiviación), en la cual la pulpa no recibe floculación magnética ni aereación, solo separación de fases. El reboso de los sedimentadores de segunda etapa es enviado completamente a través de bombas centrífugas al tanque colector donde se mezcla con la parte de licor de primera etapa, que luego son enfriados y destinados a usar como licor de recirculación en las canales de contacto.

La pulpa de fondo de los sedimentadores de la tercera etapa es enviada al área de lavado, esta área está compuesta por dos series, (A y B) con cinco sedimentadores cada una, denominados etapas de lavado, recibiendo floculación magnética a través de electroimanes que están situados en medio de cada una de estas etapas para aumentar sus velocidades de sedimentación. Esto se utiliza en todas

las etapas de lavado, para lograr de esta forma en cada sedimentador una mejor separación de fase (líquido- sólido) (Manual de operaciones Lixiviación, 2015).

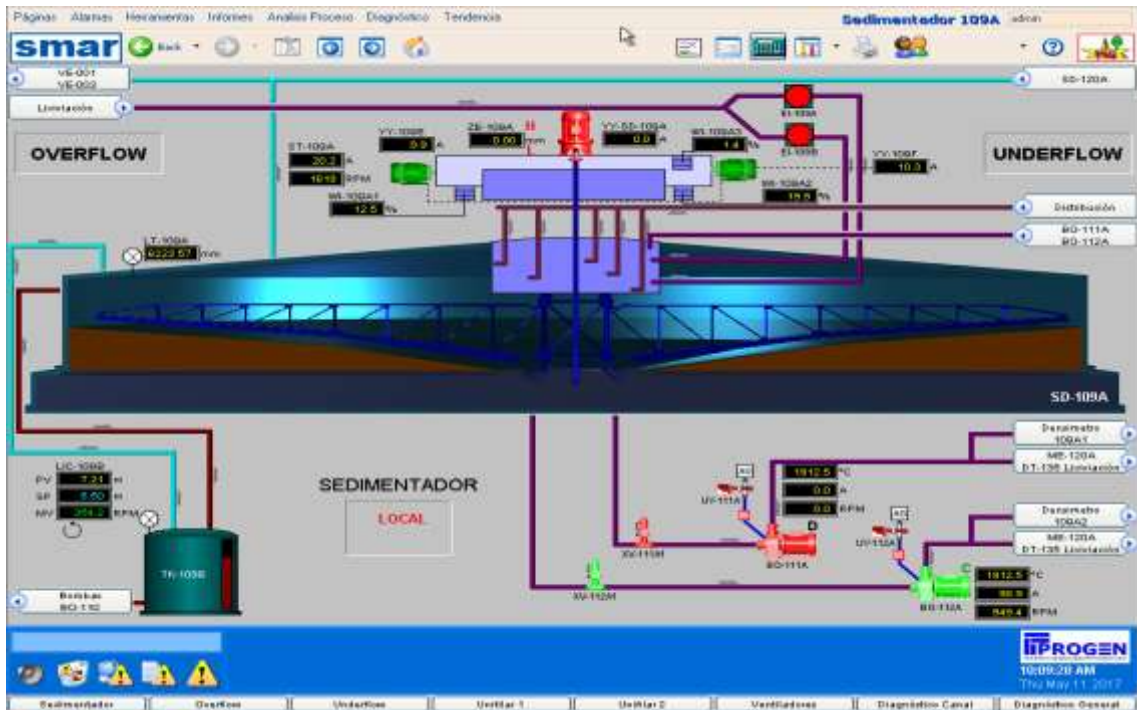


Figura 1. Diagrama esquemático del sedimentador.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sedimentador de pulpa es un objeto de modelación físico-matemática complejo con gran número de parámetros de entrada y de salida, los cuales se encuentran en una compleja interdependencia (Figura 2).

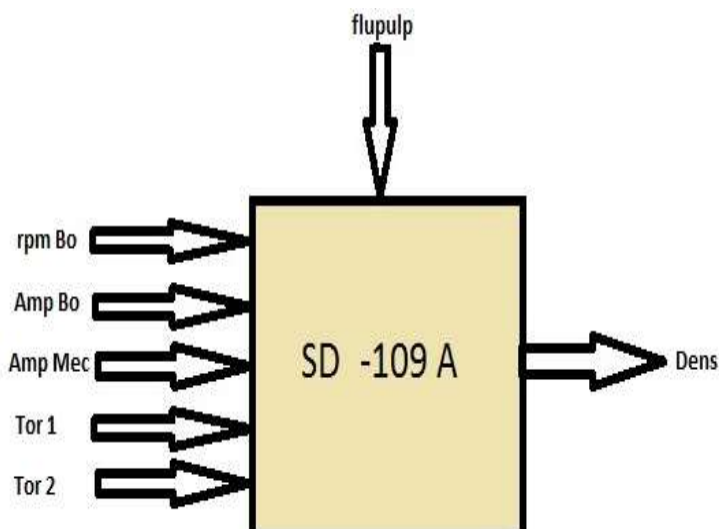


Figura 2. Esquema estructural del proceso de secado del mineral

Los parámetros de entrada en el proceso son:

- rpmBo⇒Velocidad del motor del alimentado [rpm]
- AmpBo⇒Corriente de la bomba Bo-112A [A]
- AmpMec⇒Corriente en los motores del mecanismo principal [A]
- Tor1⇒Torque en motor 1(Wt-109 A1)de brazos raspadores [lb\ft]
- Tor2⇒ Torque en motor 2(Wt-109 A2) de brazos raspadores [lb\ft]

Como parámetro de salida se toma:

- Dens⇒Densidad de la pulpa [t/m<sup>3</sup>]

Además de los parámetros de entrada y de salida, resulta importante destacar una perturbación propia de este proceso y que ejerce influencia sobre el mismo, ella es:

- Flujopulp ⇒Flujo de pulpa alimentado al Sedimentador [Kg/h].

Debido a la automatización existente en el proceso, los valores de los parámetros del proceso son sensados por el instrumento correspondiente a cada uno de ellos y la señal se envía al ordenador ubicado en la oficina de control del proceso. Los datos obtenidos se registraron cada 48 s y se tomaron los valores de 1 mes.

La figura 3 muestra el comportamiento de la densidad de pulpa en el fondo del Sedimentador SD-109 A, entre sus valores mínimos y máximos de 1673 y 1693 g/L respectivamente, para el mes de trabajo.

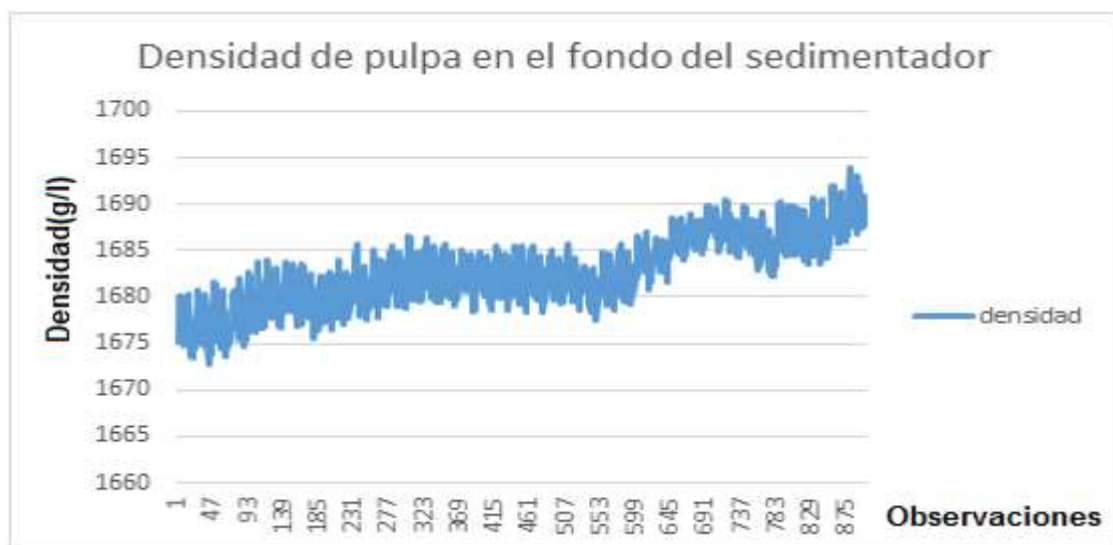


Figura 3. Gráfico de control para la variable dependiente.

Una vez analizada la base de datos y a través de un análisis estadístico descriptivo se determinaron las funciones de muestra que evalúan las medidas de tendencia central y dispersión de la muestra (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Resumen del análisis estadístico descriptivo de la muestra para un mes.

<b>Estadísticas</b>	<b>Dens</b> (g/L)	<b>Amp Bo</b> (A)	<b>Rpm Bo</b> (RPM)	<b>Tor1</b> (lb\ft)	<b>Tor2</b> (lb\ft)	<b>Amp Mec</b> (A)
Media	1682,7	104,4	938,7	11,9	12,8	20,03
Desv. estándar	3,9	1,8	2,2	2,3	2,2	0,04
Varianza	15,2	3,5	4,97	5,5	4,8	0,001
Curtosis	-0,4	-1,1	14,5	-1,3	-1,2	-0,5
Coef. asimetría	0,15	-0,14	-1,7	-0,03	0,04	0,19
Mínimo	1672,7	97,6	914,4	7,7	9,3	19,9
Máximo	1693,9	107,6	942,5	16	17,3	20,1
N. Conf (95 %)	0,2	0,12	0,14	0,15	0,14	0,002

De acuerdo con el análisis de los datos procesados mediante la utilización del software Statgraphics Plus V 5.1, se muestra el modelo matemático que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas.

$$Dens = 1233,7 + 0,58 * AmpBo + 17,5 * AmpMec - 0,96 * rpmBo + 1,9 * Tor1 + 1,8 * Tor2$$

La tabla 2 muestra el análisis de regresión para la temperatura de los gases de salida, donde se aprecia un coeficiente de determinación de 0,6

**Tabla 2.** Resumen del análisis de regresión.

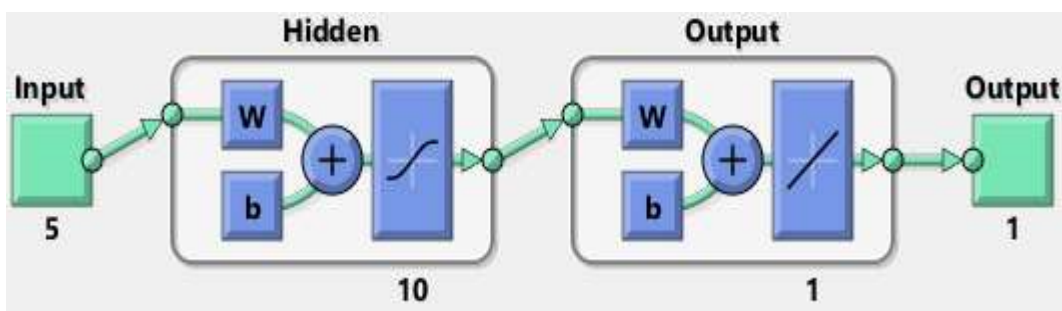
ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN	
Coefficiente de determinación $R^2$	0,6011
$R^2$ ajustado	0,5978
Error absoluto medio	1,9872
Error estándar	2,4748
Estadístico Durbin-Watson	0,5507
Auto correlación de residuos en retraso 1	0,7223

### Redes neuronales artificiales

La determinación del tipo de red neuronal, del número de capas y de la cantidad de neuronas en cada capa que mejor caracterice el proceso de sedimentación de pulpa, se llevó a cabo mediante un proceso de ensayo y error en el que se juega con el número de neuronas y el máximo error admisible.

A través del Toolbox (nnstart) de Matlab se evaluó el desempeño de los modelos neuronales artificiales empleando el error medio cuadrático y el coeficiente de correlación entre los valores reales y los obtenidos por la red (Spencer, 2009). El objetivo fue dotar a la red de un número adecuado de neuronas en la capa oculta, para aprender las características de las posibles relaciones existentes entre los datos de la muestra. Mediante el proceso de ensayo y error se identificó la estructura *feed-forward backpropagation* de mejores resultados.

La red propuesta está compuesta por dos capas: una capa oculta y una de salida. La capa de salida solo contará con una unidad, la cual indicará el valor de la densidad de la pulpa de salida asociado a cada vector de entrada presentado a la red. La capa oculta contará con un número variable de neuronas. Esquemáticamente el modelo propuesto de red neurona artificial para estimar la densidad de pulpa en el fondo del sedimentador SD-109A tiene la forma que se muestra en la figura 4.



**Figura 4.** Representación esquemática de la Red neurona artificial empleada.

La tabla 5 muestra las variables de entrada a la red neuronal artificial, las cuales serán utilizadas en ese orden en el entrenamiento, validación y generalización de la misma.

**Tabla 5.**Resumen de los datos para la Red neurona artificial.

No.	rpmBo	AmpBo	AmpMec	Tor 1	Tor 2	Dens
1	Rpm <sub>1</sub>	AmpBo <sub>1</sub>	AmpMec <sub>1</sub>	Tor1 <sub>1</sub>	Tor 2 <sub>1</sub>	Dens <sub>1</sub>
2	Rpm <sub>2</sub>	AmpBo <sub>2</sub>	AmpMec <sub>2</sub>	Tor1 <sub>2</sub>	Tor 2 <sub>2</sub>	Dens <sub>2</sub>
3	Rpm <sub>3</sub>	AmpBo <sub>3</sub>	AmpMec <sub>3</sub>	Tor1 <sub>3</sub>	Tor 2 <sub>3</sub>	Dens <sub>3</sub>
n	Rpm <sub>n</sub>	AmpBo <sub>n</sub>	AmpMec <sub>n</sub>	Tor1 <sub>n</sub>	Tor 2 <sub>n</sub>	Dens <sub>n</sub>

La variable dependiente (Dens: Densidad de la pulpa) queda en función de las variables que aparecen en la tabla 5.

$$\text{Dens} = f(\text{AmpBo}, \text{Ampmec}, \text{rpmBo}, \text{Tor1}, \text{Tor2})$$

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 5 muestra el comportamiento de los coeficientes de correlación para el entrenamiento, validación, prueba y ajuste de la red neuronal artificial (se asume como modelo neuronal artificial para la densidad de la pulpa en el fondo del sedimentador “nnDens” y la densidad real “Dens”).

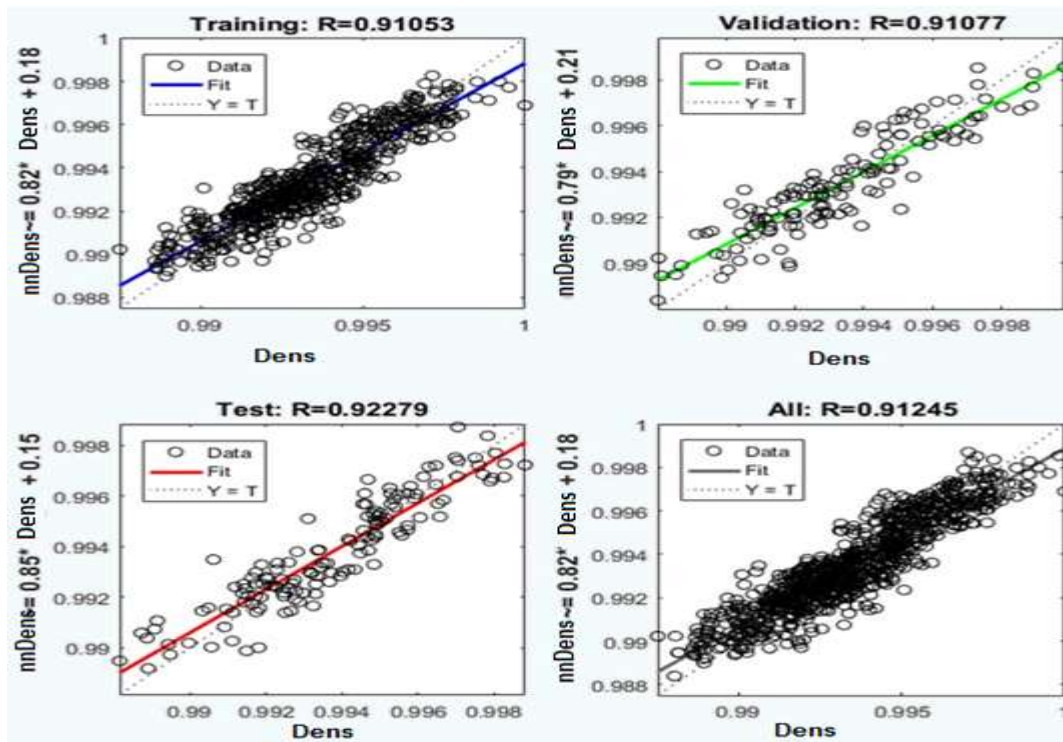


Figura 5. Coeficientes de correlación de la red neuronal.

La figura 6 muestra la generalización de la red con 902 datos no presentados durante el entrenamiento, donde se aprecia un coeficiente de correlación de 0,66.

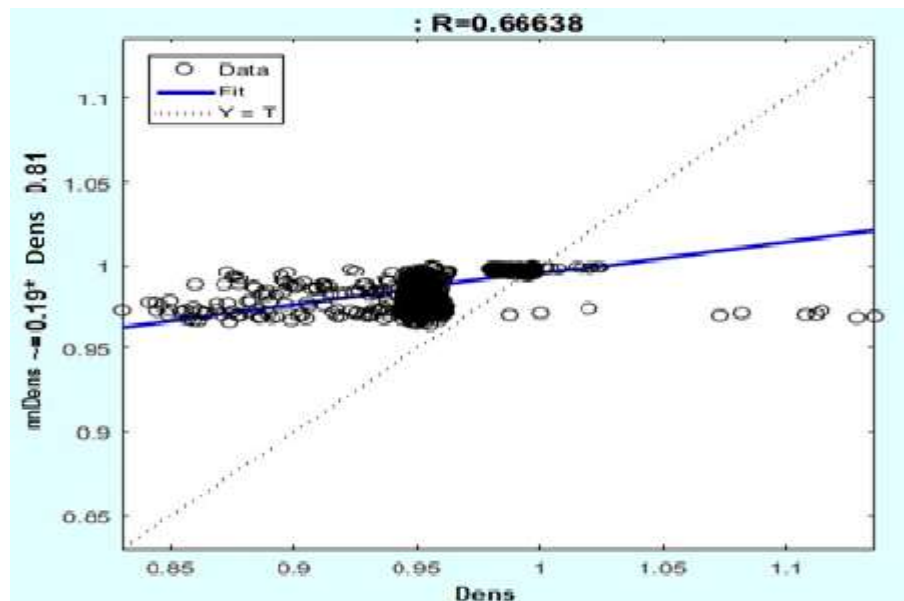


Figura 6. Generalización de la red.

Como conclusiones quedó demostrada la capacidad de la red feed-forward backpropagation para la simulación de procesos de sedimentación de pulpa en la industria. La estructura que mejor caracteriza el comportamiento de la densidad de pulpa en el sedimentador está caracterizada por dos capas con 10 neuronas en la capa oculta y una en la capa de salida, con método de aprendizaje Levenberg-Marquart (`trainlm`), y las funciones de transferencia: log-sigmoidal (`logsig`) y lineal (`pureline`).

## REFERENCIAS

1. Ljung, L, Sjöberg, J (1992). IEEE Workshop on Neural Networks for Signal. Processing. IEEE Service Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854-4150.
2. Isermann, R., Ayoubi, M., Konrad, H., & Reiss, T (1993). tools, Model based detection of tool wear and breakage for machine.
3. Manual de Operaciones (2015). UBP "Lixiviación". Cmte. Ernesto Che Guevara, Moa.
4. Valverde, R. y. (2007). Identificación de sistemas dinámicos utilizando redes neuronales RBF. RIAI, 4(2), 32 - 42.
5. Santos, M (2011). Un Enfoque Aplicado del Control Inteligente. RIAI, 8, 283–296.
6. Spencer, R (2009). Identificación del proceso de enfriamiento del mineral en el proceso CARON, con ayuda de Redes Neuronales Artificiales. Tesis de maestría, ISMM.