

## Posibilidades de la Lógica Difusa en Operaciones y Procesos de la Metalurgia Primaria

D. Fernández (a)\*, M. Ordiales (a), J. Sancho (a) and L. F. Verdeja (a)

a Escuela de Minas, Materiales y Energía de Oviedo. Universidad de Oviedo

\* e-mail [uo204693@uniovi.es](mailto:uo204693@uniovi.es)

### RESUMEN

La lógica difusa es una generalización de la lógica clásica, en la cual existe una transición desde el valor verdadero al falso, y que toma sus bases en la teoría de conjuntos borrosos. Se propone en este trabajo la aplicación de la lógica borrosa a un proceso de tratamiento de óxidos de hierro y manganeso mediante el empleo de energía solar térmica concentrada. Para ello, se recopilan datos en una instalación real, y en base a ello se

establecen las variables, y reglas borrosas que definen el sistema de inferencia borroso que se plantea en este caso. De esta manera, podremos ver como la lógica difusa constituye una herramienta de control en un proceso de la industria metalúrgica primaria.

**PALABRAS CLAVE:** metalurgia, lógica difusa, energía solar.

### 1.- INTRODUCCIÓN

La lógica binaria se ocupa de aquellas variables que adoptan dos valores discretos, y se relacionan mediante el empleo del álgebra booleana. Los dos valores que pueden adoptar tienen múltiples notaciones (verdadero-falso, si-no o 1-0), sin embargo, dichas variables solamente pueden tomar esos dos valores [1].

J. Lukasiewicz desarrolló a comienzos del siglo XX los principios de la lógica multivaluada [2]. De esta manera se rompía con la lógica binaria (uno cierto, cero falso), y se daba paso a la aparición de estados intermedios.

Una evolución de la lógica multivaluada surge con Lofti Zadeh en los años 60, al aplicar éste la lógica multivaluada a la teoría de conjuntos [3]. De esta manera, la lógica difusa se basa en el empleo de unas entradas definidas por una serie de conjuntos borrosos, y a partir de ellos extraer una serie de conclusiones precisas mediante lo que posteriormente veremos que son los sistemas de inferencia borrosos. Un logro importante en el desarrollo de la lógica difusa fue establecido por Assilian y Mamdani en 1974 en el Reino Unido al desarrollar el primer controlador difuso diseñado para una máquina de vapor [4]. Sin embargo, no fue hasta 1980 cuando la compañía F. L. Smidth & Co. implantó este tipo de controlador en una planta cementera en Dinamarca.

Por otra parte, las políticas industriales en la actualidad tienden a ser favorables con el medio ambiente, de modo que se plantean nuevas formas de gestionar los residuos-subproductos de los diferentes procesos productivos, sin olvidar, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y las mejoras en

eficiencia energética. Desde la óptica de la metalurgia primaria esta posibilidad emerge a partir del empleo de la energía solar térmica de concentración como fuente de energía en los procesos productivos de esta industria. Sendos trabajos en los que han tomado parte miembros del grupo de investigación así lo demuestran [5-6]. En este trabajo nos centraremos en la segunda investigación.

En la instalación solar del Horno Solar de Odeillo, se llevaron a cabo una serie de campañas de ensayos en los que se trabajaba con óxidos de hierro y de manganeso, bajo diferentes condiciones. Estas mediciones nos permitirán implementar un sistema de inferencia borroso para la gestión de óxidos de hierro y manganeso mediante el empleo de energía solar térmica concentrada.

## 2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1.- Conjuntos Clásicos, Conjuntos Borrosos y Funciones de Pertenencia

Las funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  son empleadas para definir la pertenencia de una entrada (x) a un determinado conjunto borroso (A). De esta manera tenemos que  $\mu_A(x) \in [0,1]$ , donde se cumple que cuanto más cercano al valor 1 se encuentre  $\mu_A(x)$ , mayor será la pertenencia de la entrada (x) al conjunto borroso (A), con 0 indicando que no pertenece en absoluto, y 1 indicando una pertenencia total. Así, un conjunto clásico podría ser definido en base a sus funciones de pertenencia como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Mientras que un conjunto borroso se puede representar como un conjunto de pares ordenados de un elemento x y su valor de pertenencia al conjunto:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\}$$

### 2.2.- Operaciones con Conjuntos Borrosos

Las operaciones con conjuntos borrosos se abordan desde el punto de vista de operaciones borrosas entre sus funciones de pertenencia. Las más utilizadas son las de unión (U), Intersección ( $\cap$ ) y la negación.

La *Intersección Borrosa* (conjunción) de dos conjuntos borrosos, A y B, es otro conjunto borroso C, ( $C=A \cap B$  o  $C = A \text{ y } B$ ), cuya función de pertenencia es:

$$\mu_C(x) = \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

La *Unión Borrosa* (disyunción) de dos conjuntos borrosos, A y B, es un conjunto borroso C ( $C=A \cup B$  o  $C = A \text{ o } B$ ) cuya función de pertenencia es:

$$\mu_C(x) = \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

La *Negación Borrosa* (complemento) de un conjunto borroso A ( $\bar{A}$ ,  $\neg A$ , no A) se define como:

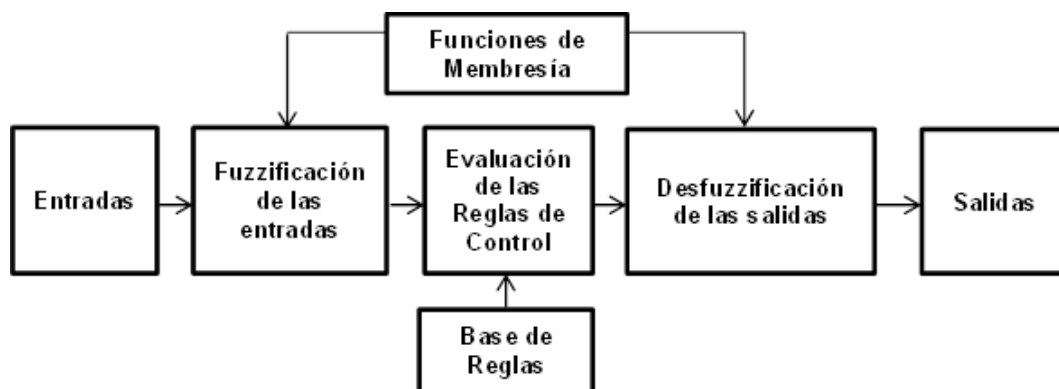
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

### 2.3.- Lógica Borrosa

El conocimiento objetivo (por ejemplo, los modelos matemáticos) y el conocimiento subjetivo (representado por la información lingüística ya que no se puede cuantificar mediante las matemáticas tradicionales, por ejemplo, la información de los operadores de planta) pueden coordinarse mediante la lógica difusa. Esa coordinación mediante la lógica borrosa se realiza según las reglas borrosas, a partir de la aproximación del modelo básico y la aproximación del modelo libre. En la lógica borrosa se usan las reglas heurísticas (también regla borrosa, implicación borrosa o afirmación condicional borrosa) de la forma *SI* (antecedente), *ENTONCES* (consecuente), donde tanto el antecedente como el consecuente constituyen conjuntos borrosos.

### 2.4.- Sistema de Inferencia Borroso

Un sistema de inferencia borroso es una estructura de cálculo que se encuentra basada en los conceptos de la teoría de conjuntos borrosos, las reglas borrosas y el razonamiento borroso.



**Figura 1.** Esquema de un sistema de inferencia borroso.

La estructura básica del sistema de inferencia borroso se muestra en la **Figura 1**, y se encuentra compuesto por tres componentes conceptuales: la base de las reglas (que se encuentra compuesto por una selección de reglas borrosas), la base de datos (que define las funciones de pertenencia empleadas en las reglas borrosas) y el mecanismo de razonamiento (que realiza el procedimiento de inferencia sobre las reglas para obtener una salida o una conclusión razonable). Además, un sistema de inferencia borroso puede utilizar entradas borrosas o numéricas, pero las salidas van a ser conjuntos borrosos que, mediante la desfuzzificación correspondiente, se transforman en un valor numérico que representa óptimamente al conjunto borroso.

### 2.5.- Fuzzificación

La fuzzificación o emborronamiento de una entrada hace referencia al procedimiento mediante el cual se calcula su grado de pertenencia a uno o varios conjuntos borrosos, dentro de los diferentes conjuntos que hay establecidos para la entrada. Para llevar a cabo esta conversión se emplean las funciones de pertenencia.

## 2.6.- Tipos de Sistemas de Inferencia Borrosos

El **Sistema de Inferencia Borroso de Mamdani** fue propuesto por éste como un primer intento de controlar el funcionamiento de una caldera y una máquina de vapor empleando un conjunto de reglas de control lingüísticas obtenidas a partir de los operadores de planta [7]. Una regla típica de este sistema de inferencia borroso es:

Si  $x_1$  es  $A_1$  y/o  $x_2$  es  $A_2$  y/o ...  $x_n$  es  $A_n$  ENTONCES  $z$

El modelo de Mamdani es el más empleado porque se adapta bien al lenguaje humano y es intuitivo.

El **Sistema de Inferencia Borroso de Sugeno** (también conocido como TSK) fue propuesto por Takagi, Sugeno y Kanga [8], con vistas al desarrollo de una aproximación sistemática que generase reglas borrosas de un conjunto de datos de entrada/salida dado. Una regla borrosa típica del modelo TSK tiene por respuesta una función numérica de las variables de entrada que describa la salida según las condiciones planteadas en el antecedente de la regla. Por lo general esta función es polinómica, y en caso de que esa función sea una constante, nos encontramos con un modelo borroso de Sugeno de orden 0, que es un caso particular de Mamdani.

Si  $x_1$  es  $A_1$  y/o  $x_2$  es  $A_2$  y/o ...  $x_n$  es  $A_n$  ENTONCES  $z=f(x_1,x_2)$

El modelo de Sugeno es bastante utilizado por ser eficiente en informática.

En el **Sistema de Inferencia Borroso de Tsukamoto** la salida de cada regla borrosa es expresada mediante un valor numérico inducido por los pesos de las reglas. Habida cuenta de esta salida numérica, Tsukamoto une cada salida de las reglas mediante el método de la media ponderada evitando el tiempo consumido en la desfuzzificación.

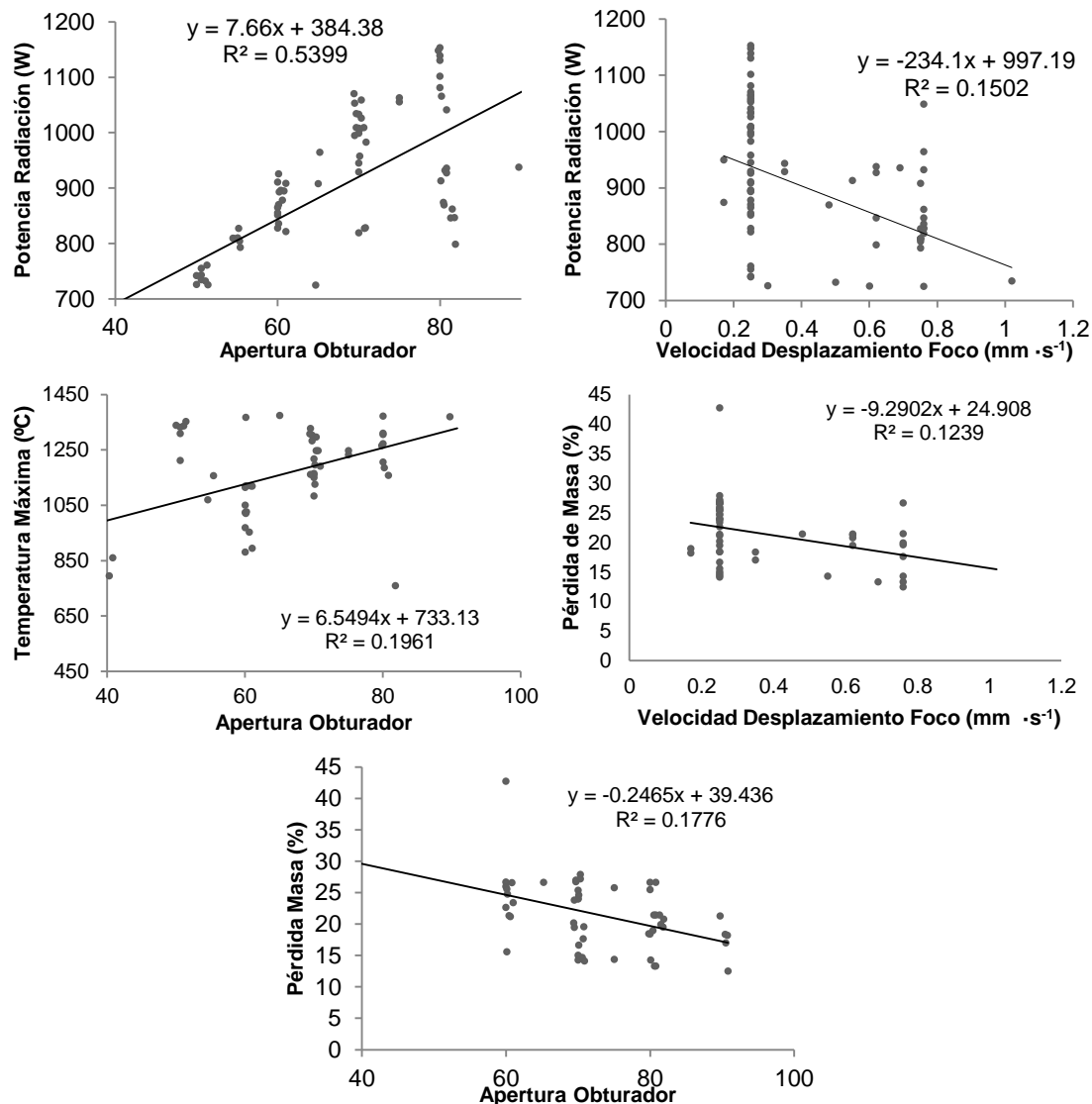
## 2.7.- Desfuzzificación

La desfuzzificación consiste en obtener un valor numérico para cada una de las salidas del sistema a partir de los conjuntos borrosos a los que pertenecen. El *Método del Centroide* consiste en calcular el centro de gravedad de la función de pertenencia global calculada a partir de las funciones de pertenencia de cada una de las salidas y los pesos de cada una de éstas. El *Método del Semifallo (Singleton)* consiste en calcular un promedio de los centroides de las funciones de pertenencia de los conjuntos activados. En caso de que las funciones fueran simétricas, los centroides coincidirían con el punto medio. Para la ponderación se recurre a los pesos de las reglas activadas, o grados de pertenencia de la salida a los subconjuntos correspondientes. El *Método de la Media Ponderada* se basa en el cálculo del promedio entre los valores de salida que se obtendrían para cada uno de los conjuntos borrosos multiplicados (ponderados) por el peso de la correspondiente regla o grado de pertenencia al subconjunto.

## 3.- CASO PRÁCTICO: ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA EN METALURGIA.

La minimización en la generación de residuos, así como la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efectos invernadero se encuentran profundamente arraigados en la conciencia social. De esta manera, surgen nuevas fuentes energéticas y la manera de aplicarlas a otros campos, como es el caso que

nos atañe de la metalurgia primaria. Una de esas nuevas fuentes de energía es la energía solar. El grupo de investigación en Siderurgia, Metalurgia y Materiales de la Universidad de Oviedo, ha venido trabajando desde hace tiempo en el estudio de las posibilidades de aplicar la energía solar, cuando se encuentra adecuadamente concentrada, en el tratamiento de minerales de la industria siderúrgica [5-6]. En este trabajo presentaremos la aplicación de la lógica difusa para el caso del empleo de la energía solar térmica concentrada en el tratamiento de residuos de industria siderúrgica [6].



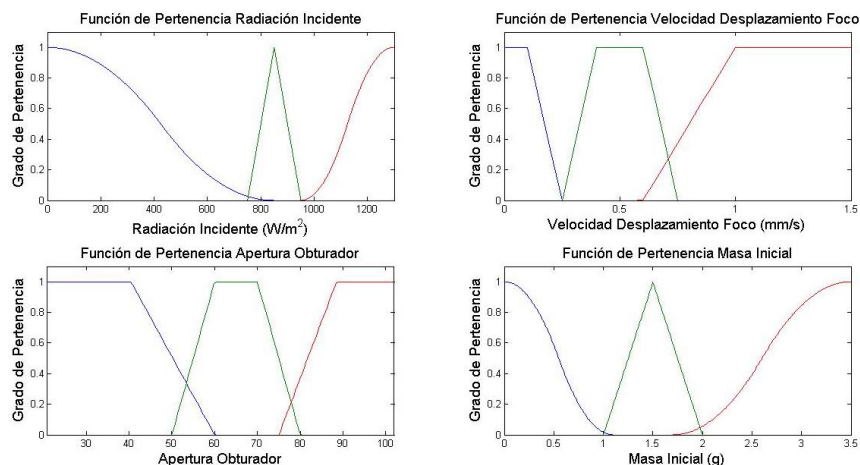
**Figura 2.** Variables con relaciones positivas empleadas para las relaciones positivas y negativas para las reglas *si-entonces*.

La aplicación de la energía solar para el tratamiento de óxidos de hierro y manganeso se basa en disponer los reactivos en un recipiente que se mueve sobre un carril, de modo que el haz de energía solar concentrada se vaya desplazando sobre todos los puntos de la muestra. Como parámetros de entrada del proceso, vamos a tener la radiación incidente (que dependerá de las condiciones meteorológicas), la velocidad de desplazamiento del foco y apertura del obturador (que van a ser parámetros regulados por el operador) y la masa inicial. Mediante el

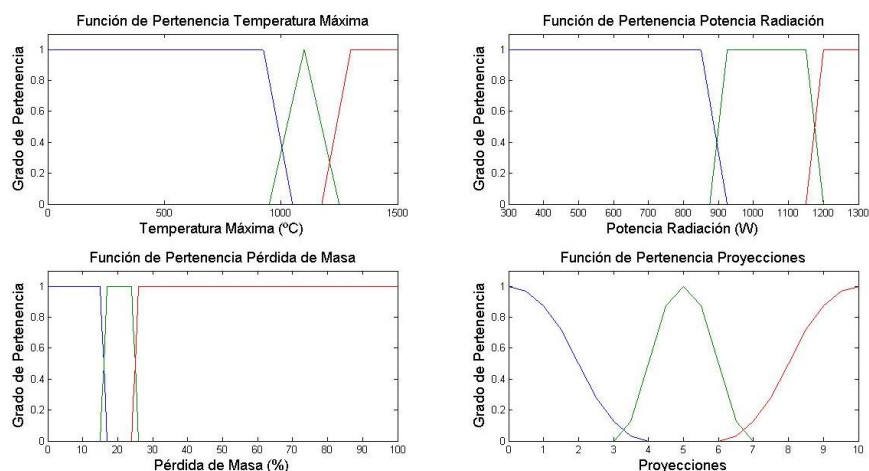
control de estos parámetros se van a conseguir unas condiciones de proceso diferentes como son las temperaturas máximas alcanzadas o la potencia de la radiación que va a incidir sobre la muestra, mientras que la calidad del propio proceso la vamos a medir mediante las proyecciones y las pérdidas de masa. Todas estas variables fueron medidas en los trabajos llevados a cabo en el Horno Solar de Odeillo, y mediante técnicas de análisis estadístico se analizaron las relaciones entre las diferentes variables que se pueden observar en la **Figura 2**. Mediante el software MATLAB se creó un programa informático que nos permitiera realizar el control del proceso teniendo en cuenta las variables planteadas en este trabajo (**Figura 2**).

### 3.1.- Variables lingüísticas

A partir de los trabajos llevados en el Horno Solar de Odeillo se pueden establecer claramente las variables que intervienen en el sistema. Las variables del sistema de inferencia borroso para la entrada son: apertura obturador, velocidad desplazamiento foco, radiación incidente y masa inicial; mientras que para la salida son: temperatura máxima, pérdida de masa, potencia de radiación y proyecciones. Mediante el conocimiento del sistema elaboramos las funciones de membresía del sistema que se pueden observar en las **Figuras 3 y 4**.



**Figura 3.** Funciones de membresía de la entrada.



**Figura 4.** Funciones de membresía de la salida.

### 3.2.- Base de Reglas Borrosas

A partir del conocimiento adquirido en el Horno Solar de Odeillo, y del análisis estadístico podemos establecer la base de las reglas borrosas (**Figura 1**). Las reglas empleadas en el sistema de inferencia borroso se muestran en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Base de reglas del sistema de inferencia borroso.

R1: Si <i>Apertura Obturador</i> Alta Y/O <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Baja ENTONCES <i>Potencia Radiación</i> Alta	R5: Si <i>Apertura Obturador</i> Media ENTONCES <i>Temperatura Máxima</i> Media	R9: Si <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Baja Y/O <i>Apertura Obturador</i> Baja ENTONCES <i>Pérdida de Masa</i> Alta
R2: Si <i>Apertura Obturador</i> Media Y/O <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Media ENTONCES <i>Potencia Radiación</i> Media	R6: Si <i>Apertura Obturador</i> Baja ENTONCES <i>Temperatura Máxima</i> Baja	Si <i>Masa Entrada</i> Alta Y <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Alta Y <i>Radiación Incidente</i> Baja ENTONCES <i>Proyecciones</i> Alta
R3: Si <i>Apertura Obturador</i> Baja Y/O <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Alta ENTONCES <i>Potencia Radiación</i> Baja	R7: Si <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Alta Y/O <i>Apertura Obturador</i> Alta ENTONCES <i>Pérdida de Masa</i> Baja	Si <i>Masa Entrada</i> Media Y <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Media Y <i>Radiación Incidente</i> Media ENTONCES <i>Proyecciones</i> Alta
R4: Si <i>Apertura Obturador</i> Alta ENTONCES <i>Temperatura Máxima</i> Alta	R8: Si <i>Velocidad Desplazamiento</i> Media Y/O <i>Foco Apertura Obturador</i> Media ENTONCES <i>Pérdida de Masa</i> Media	Si <i>Masa Entrada</i> Baja Y <i>Velocidad Desplazamiento Foco</i> Baja Y <i>Radiación Incidente</i> Alta ENTONCES <i>Proyecciones</i> Baja

### 3.3.- Funcionamiento del Programa

El funcionamiento del programa responde a lo planteado en el apartado dedicado a los fundamentos teóricos. Se emplea el lenguaje MATLAB para elaborar un programa informático que nos permita disponer de un sistema de control borroso. Se emplean reglas determinadas a partir de valores numéricos (conocimientos objetivos), y las determinadas a partir de los conocimientos de los investigadores que llevaron a cabo los ensayos en el Horno Solar de Odeillo (conocimientos subjetivos). Se emplea el modelo de inferencia borroso de Mamdani para la evaluación de la base de reglas del sistema de inferencia borroso. Para la salida del sistema de inferencia borroso se emplea el método del centroide o del centro de gravedad.

### 3.4.- Resultados y Discusión

La obtención de una solución general para el control completo de una instalación es compleja y por lo general se incurre en problemas no lineales. En este trabajo ponemos un ejemplo de la aplicación de la lógica difusa para el control de un proceso experimental como es el tratamiento de mineral de hierro y manganeso mediante el empleo de energía solar térmica concentrada. El modelado del proceso es complejo porque se trata de un procedimiento experimental, y hay ciertas variables que no pueden ser determinadas de modo numérico, de modo que se recurre al conocimiento y experiencia de los investigadores que llevaron a cabo las mediciones en el Horno Solar de Odeillo. Así se elaboran las reglas relacionadas con las proyecciones que tienen lugar durante el proceso. Mediante el análisis estadístico se elaboraron el resto de las reglas.

Los ensayos en el Horno Solar de Odeillo se llevaron a cabo en dos campañas (Junio y Septiembre). Una de las series de datos fueron empleadas para definir las condiciones del proceso de control, analizándose las variables que intervienen en el proceso y como se relacionan entre ellas. Por su parte, los datos de la segunda

campaña fueron empleados para la comprobación de que el programa elaborado funcionaba correctamente.

#### 4.- CONCLUSIONES

Se ha dado una visión de la aplicación de la lógica borrosa en la metalurgia primaria, mediante la aplicación de la lógica fuzzy al caso del tratamiento de minerales de hierro y manganeso en un horno solar. Para la puesta en marcha de este sistema de control borroso se desarrolla un programa informático en lenguaje MATLAB, teniendo en cuenta las variables que se determinaron en los ensayos llevados a cabo en el Horno Solar de Odeillo.

Mediante el empleo de técnicas estadísticas se efectuó un análisis de las variables y de las relaciones existentes entre ellas, y de esta manera establecer las reglas *si-entonces* que definen el proceso de control.

Analizando los resultados obtenidos, se puede afirmar que se lograría la creación de un sistema de control borroso para un proceso de tratamiento de mineral de hierro y manganeso mediante energía solar. El siguiente paso a llevar a cabo sería su implementación como sistema de control en una instalación real, y mejorar el sistema de control mediante la introducción de nuevas variables.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Morris, G. Duchén, Diseño Digital, Pearson Educación, Los Ángeles, (2003) 27.
- [2] J. R. Hilera, V. J. Martínez, Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones, Ra-ma Editorial, Madrid (1995) 321-371.
- [3] L. A. Zadeh, Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern, 1 (1973) 28-44.
- [4] E. H. Mamdani, Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant. Proc. IEEE, 121 (1974) 1585-1588.
- [5] I. Ruiz-Bustinza, I. Cañadas, J. Rodríguez, J. Mochón, L. F. Verdeja, F. García-Carcedo, A. Vázquez, Magnetite Production from Steel Wastes with Concentrated Solar Energy, Steel Research International, 84 (2013) 207-217.
- [6] J. Mochón, I. Ruiz-Bustinza, A. Vázquez, D. Fernández, J. M. Ayala, M. F. Barbés, L. F. Verdeja, Transformations in the Iron-Manganese-Oxygen-Carbon System Resulted from Treatment of Solar Energy with High Concentration, Steel Research International, 85 (2014) 1469-1476.
- [7] R. A. Maguiña, Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio, Revista de Investigación de Sistemas e Informática, 7 (2010), 91-104.
- [8] T. Takagi, M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 15 (1985) 116-132.