

## Diseño de un sistema de secado con aprovechamiento de calor en la producción de tejas, utilizando lógica difusa apoyada con LabVIEW

MADUJANO-VENEGAS, Claudia\*†, VELÁZQUEZ-TRUJILLO, Sabino, ESCOBAR-GÓMEZ, Elías y RIOS-ROJAS, Carlos.

*Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carr. Panamericana Km.1080, Terán, 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chis., México*

Recibido Octubre 18, 2016; Aceptado Noviembre 23, 2016

### Resumen

En algunas industrias alfareras, que utilizan métodos tradicionales, se observan problemas relacionados con el entorno y las características de la materia prima; siendo uno de los principales problemas el excesivo tiempo de producción debido a un deficiente control del proceso de secado. Se ha observado que los cambios climatológicos (variación de la temperatura y la precipitación pluvial), los desgastes de los moldes de la extrusora y la asignación de tareas afectan el proceso de secado, incrementando el tiempo de producción y en consecuencia las pérdidas. En este artículo se presenta el diseño de un sistema de secado con aprovechamiento del calor en la producción de tejas, con un control difuso; obteniéndose un sistema automatizado capaz de controlar el secado de las tejas que actualmente es difícil de tratar. El método propuesto consta de tres etapas importantes: determinar los parámetros que afectan al método tradicional (temperatura del horno, el tiempo del proceso, temperatura del entorno); diseñar un control difuso considerando los parámetros determinados y calcular la cantidad de calor máxima generada por el horno de cocción (incluyendo la pérdida de calor a través de los ductos); determinar el comportamiento del sistema de secado propuesto. Como resultado se logró reducir al menos un 50% del tiempo de secado con respecto al método tradicionalmente empleado.

**Aprovechamiento de Calor, Transferencia de Calor, Alfarería, Lógica Difusa**

### Abstract

In some pottery industries, using traditional methods, problems related to the environment and the characteristics of the raw material are observed; It is one of the main problems excessive production time due to poor control of the drying process. It has been observed that climatological changes (variation in temperature and rainfall), the wear of the molds from the extruder and assignments affect the drying process, increasing production time and consequently losses. This article presents the design of a drying system with waste heat in the production of tiles, with a fuzzy control; obtaining an automated system capable of controlling the drying of the tiles it is currently difficult to treat. The proposed method consists of three major stages: determining the parameters affecting the traditional method (oven temperature, process time, temperature environment); design a fuzzy control considering certain parameters and calculate the maximum amount of heat generated by the oven cooking (including heat loss through pipelines); determine the behavior of the proposed drying system. As a result it was possible to reduce at least 50% of the drying time compared to traditionally used method.

**Harnessing Heat, Heat Transfer, Potteries, Fuzzy Logic**

**Citación:** MADUJANO-VENEGAS, Claudia, VELÁZQUEZ-TRUJILLO, Sabino, ESCOBAR-GÓMEZ, Elías y RIOS-ROJAS, Carlos. Diseño de un sistema de secado con aprovechamiento de calor en la producción de tejas, utilizando lógica difusa apoyada con LabVIEW. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-9: 29-36

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: ecinereb-7@hotmail.com)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

A través de la historia se ha visto la importancia adquirida del ladrillo y las tejas como un material indispensable en la construcción (Afanador García & J., 2013), la materia prima en la elaboración de las piezas de mampostería es la arcilla, como un material plástico natural en presencia de agua que permite moldearse para luego adquirir una dureza que aumenta considerablemente después de la cocción; existen diferentes tipos de arcillas y sus características de superficie específica, plasticidad, tixotropía y capacidad de absorción dependen del tamaño o la estructura de sus componentes.

La arcilla en su fase de preparación requiere de las etapas: trituración, amasado, moldeo, secado y cocción; la etapa crítica es el secado, debido a que se elimina el 75% por ciento de humedad incorporada, para llevar a cabo la cocción con resultados satisfactorios.

(Martínez López & Lira Cortés, 2016) Estudia el secado de ladrillos de forma experimental, por no existir un modelo universal de secado, aplicando el modelo de Luikov, derivado de la termodinámica de procesos irreversibles para alcanzar los perfiles de humedad en el secado de muestras de ladrillo a diferentes temperaturas, donde se realizó una evaluación de los factores de influencia que afectan al perfil obtenido. Validando el modelo experimentalmente con muestras de ladrillo, secados a temperaturas de 60°C y 80°C; comparando resultados teóricos y experimentales que coincidan en la región del secado, es útil en la determinación del contenido de humedad.

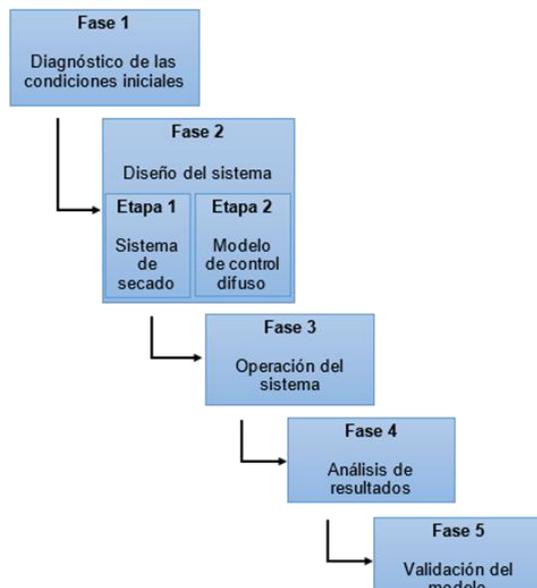
Los cambios evolutivos de los sistemas de control se dividen en tres etapas: el sistema de control on/off (encendido/apagado), el control PID y el control inteligente. El más utilizado actualmente es el Control Lógico Difuso, que se basa en la lógica difusa para desarrollar estrategias de control lingüística a partir del conocimiento experto (Elnour A/Alla Mohammed, 2013).

Para el proceso de secado de las tejas se utilizan métodos automatizados y/o convencionales; los primeros son manipulados mayormente por la industria alfarera con gran disponibilidad de recursos económicos; el segundo es el utilizado tradicionalmente en las localidades donde existe la materia prima.

(Stojanovski & Stankovski, 2011) proponen un sistema de control difuso simulado en MATLAB Simulink de un modelo de fábrica para la producción de ladrillos de arcilla "KIK" en Kumanovo, logrando una automatización adecuada e inteligente que ahorra energía y costos.

## Metodología desarrollada

En la figura 1 se presenta la metodología a seguir, dividiéndose en 5 fases; explicadas a continuación con los resultados obtenidos.

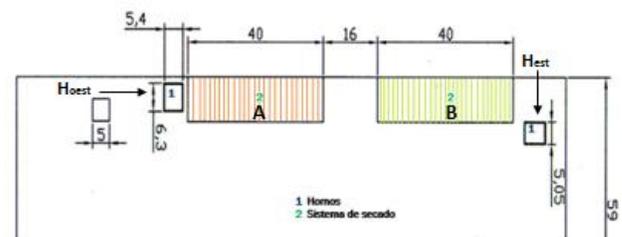


**Figura 1** Metodología del diseño de un sistema de secado con aprovechamiento de calor

### Fase 1. Diagnóstico de las condiciones iniciales

Esta fase se desarrollo mediante visitas frecuentes a la planta, identificando al clima y el tiempo de secado como factores que interrumpen el proceso de producción.

Las mediciones desarrolladas en la planta permiten identificar la ubicación de cada proceso delimitando el área del sistema de secado a diseñar identificado en la **figura 2**. Considerando dos secciones (zona sombreada A y B), cada sección cuenta con un horno de cocción, por ejemplo; la zona A con el horno este (Hest) y la zona B con el horno oeste (Hoest) y las mediciones son 40m de longitud y 10m de ancho; debido al proceso de producción y uso no simultaneo de los hornos, para trabajar con un sistema de secado de la distribución del área seleccionada en indistinta utilizar cualquiera de las dos.



**Figura 1.** Diagrama del área del sistema de secado

### Fase 2 Diseño del sistema

En esta fase se consideran dos etapas como se aprecia en la **figura 1**.

#### Etapa 1. Sistema de secado

Aplicando la ecuación  $Q = mC_p\Delta T$  de la conservación de la energía para el flujo de un fluido, siendo  $Q$  = la transferencia de energía al sistema (J),  $m$  = Masa del aire (Kg),  $C_p$  = Calor específico del aire (J/Kg\*°C),  $\Delta T$  = Diferencial de temperatura (°C) y apoyado de la transferencia de calor se lleva a cabo el análisis termodinámico que permite realizar el cálculo correspondiente para la determinación del tamaño de los ductos mediante el método de caída de presión constante --método de igual fricción--.

Apoyado con el software EES (*Engineering Equation Solver*), se obtienen las dimensiones de los tramos en forma de reducción de los ductos del sistema de secado, que permiten la uniformidad del calor incorporado del horno de cocción al sistema de secado como se observa en la **tabla 1**.

Tramo	W <sup>1</sup> (metros)	H <sup>2</sup> (metros)
a-c	1.213	0.2022
c-e	1.158	0.193
e-g	1.103	0.1838
g-i	0.9925	0.1654
i-k	0.8822	0.147
k-m	0.7719	0.1287
m-ñ	0.6065	0.1011

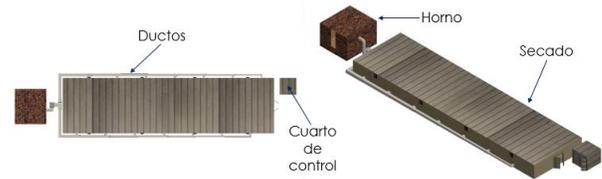
**Tabla 5** Determinación de las dimensiones de los ductos del sistema de secado

Al realizar el análisis termodinámico se identifica el calor máximo generado (168.616KJ) por el horno de cocción, que permite elegir los accesorios; el ventilador centrífugo modelo CLT18 con una capacidad de 11529 m<sup>3</sup>/hr a velocidad de 1850 RPM y los ventiladores murales modelo SB13 con una capacidad de 3600 PCM a velocidad de 1600 RPM. Ambos ventiladores se identifican en la **figura 3**, uno para la inducción del calor generado por el horno de cocción, y otro para eliminar la humedad y reducir temperatura del sistema cuando el secado y proceso del horno es finalizado.



**Figura 2** Accesorios del sistema de secado

El diseño del sistema se apoyo en el software SolidWorks para su identificación, diseñando una cabina de control para realizar un monitoreo constante del sistema y facilitar la detección de fallas; apreciado en la **figura 4**.



**Figura 3.** Diseño del sistema de secado

## Etapa 2. Modelo de control

Con la finalidad de lograr un control de la temperatura y un sistema funcional se diseña un modelo de control difuso en el que se determinan las variables difusas (entrada y salida) junto con el arreglo de las reglas difusas; determinadas a través del diagnóstico de las condiciones iniciales y la experiencia del experto en la producción de tejas. Enseguida se presentan las variables contempladas y el juego de reglas para el modelo de control difuso a utilizar.

Se contemplaron tres variables de entrada:

1. **La temperatura de horno de cocción** se mide de 27°C a 1000°C, considerando tres conjuntos difusos de tipo trapezoidal (determinado por el comportamiento del horno de cocción en operación); “baja” de 27°C hasta 350°C, “media” de 250°C hasta 850°C y “alta” de 750°C a 1000°C (Rodríguez Ramírez, Diego Nava, Martínez Alvarez, Méndez Lagunas, & Aguilar Lescas, 2004).

<sup>1</sup> Ancho del ducto

<sup>2</sup> Largo del ducto

2. La **temperatura del sistema de secado** se mide de 27°C a 130°C considerando cinco conjuntos difusos; “muy baja” tipo triangular de 27°C a 40°C, “baja” tipo trapezoidal de 30°C a 80°C, “media” tipo trapezoidal de 70°C a 110°C, “alta” tipo triangular de 105°C a 125°C y “muy alta” tipo triangular de 120°C a 130°C, las funciones triangulares son debido a los puntos críticos del sistema y las trapezoidales para a los momentos de temperatura estándares. Determinado a partir del experto en el área.

3. El **tiempo** se mide de 0 a 60 horas, con un conjunto difuso “encendido” la función es de tipo trapezoidal de 20 a 60 horas; se considera como variable de entrada con el fin de obtener resultados del secado después del tiempo de operación del horno de cocción (no se incorpora más calor). Debido que los extractores siguen su operación y se requiere observar en que momento establecer una temperatura ambiente en el sistema para retirar el producto.

En las Variables de salida, se contemplaron:

1. La **velocidad del motor** se mide desde 0V hasta 10V, considerando seis conjuntos difusos, “apagado (A)” de tipo triangular de 0V a 1V, “despacio (D)” tipo trapezoidal de 1V a 4V, “media (M)” tipo trapezoidal de 3V a 6V, “un poco rápido (PR)” tipo trapezoidal de 5V a 8V, “rápido (R)” tipo trapezoidal de 7V a 10V y “super rápido (SR)” tipo triangular de 9 a 10 V, las funciones triangulares para los momentos arranque-paro y trapezoidales para lograr el control proporcional del ventilador.

2. La variable **extractor (Ex)** se mide de 0 a 1, considerándose a partir del comportamiento y características de los ventiladores comunes que se miden por niveles, considerando un conjunto “Encendido (E)” de tipo singleton para determinar simplemente si está funcionando o no.

Se desarrolla el arreglo de las reglas difusas con base a la interpretación del experto, las cuales se muestran en la **tabla 2**.

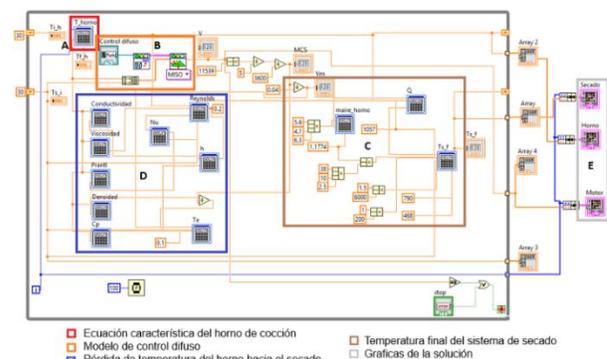
		T_sistema de secado				
		Muy bajo	Bajo	Media	Alta	Muy alta
T_Horno	Baja	A				
	Media	SR	R	M	M	A
	Alta	R	PR	M	D	A y Ex:E
Si “Tiempo” es “Encendido” entonces “Extractor” es “Encendido”						

**Tabla 2** Juego de reglas difusas

### Fase 3. Operación del sistema

En esta fase se obtiene el modelo de control difuso a través del *tools* de “control y simulación” en NI LabVIEW, a partir de la distribución de los ductos, el análisis termodinámico y el modelo difuso. Localizado en el cuadrante B de la **figura 5** que corresponde a la simulación del sistema de secado.

En el cuadrant D son ecuaciones características de los fluidos a diversas temperaturas, factores que se involucran y afectan durante la transferencia de calor realizada entre el horno de cocción y el sistema de secado.



**Figura 5** Diagrama del sistema de secado en LabVIEW

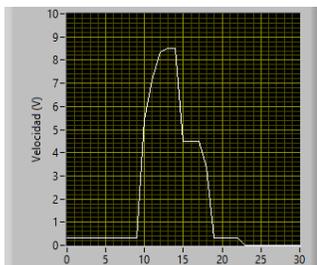
Se determina la ecuación característica del funcionamiento del horno de cocción Según (Salazar Rodríguez, López Carranza, & M. Vreeland, 1993), a través del toolbox de Matlab “Curve Fitting Tool” obteniendo una ecuación de tipo gaussiana con siete variables declarada en la ecuación 1 y esta localizado en el cuadrante A de la simulación del sistema general.

$$f(x) = 361.1 * \exp\left(-\left(\frac{(x-15.36)}{0.6702}\right)^2\right) + 73.49 * \exp\left(-\left(\frac{(x-16.42)}{0.461}\right)^2\right) + 49.14 * \exp\left(-\left(\frac{(x-3.344)}{4.905}\right)^2\right) + 1613 * \exp\left(-\left(\frac{(x-12.1)}{1.895}\right)^2\right) + 1059 * \exp\left(-\left(\frac{(x-12.91)}{2.621}\right)^2\right) + 485.4 * \exp\left(-\left(\frac{(x-13.71)}{5.437}\right)^2\right) - 2690 * \exp\left(-\left(\frac{(x-12.27)}{2.084}\right)^2\right) \quad (1)$$

En el cuadrante C se involucran las posibles pérdidas debido a los solidos y factores del sistema de secado que interrumpan o disminuyan el calor transportado, con el fin de involucrar el mayor de los factores posibles que interfieren y lograr la mayor acertación en los resultados.

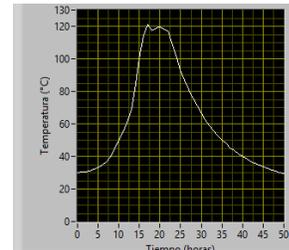
**Fase 4. Análisis de resultados**

En la **figura 6** se presenta el funcionamiento del ventilador que es proporcional al aumento de la temperatura en el sistema de secado; cuando llega a su velocidad máxima y disminuye lentamente la velocidad sin cambios repentinos, logra la máxima eficiencia y pérdidas mínimas.



**Figura 6** Comportamiento del ventilador durante el proceso en LabVIEW

En la **figura 7** se obtiene el comportamiento del sistema de secado observando que entre la hora 15 y 20 del proceso se logra la temperatura de 125°C, como ideal para lograr el secado de las piezas. Y entre la hora 45 y 50 se vuelve a la temperatura inicial, aprovechando el tiempo para retirar las piezas del sistema de secado y preparar el proceso de cocción.



**Figura 7** Diagrama del sistema de secado en LabVIEW

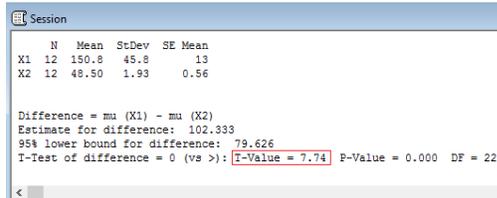
**Fase 5. Validación del modelo**

Con base en los datos obtenidos a través de la simulación del Sistema de secado y los datos del tiempo de secado del método tradicional se obtiene la **tabla 3**, datos que son necesarios para llevar a cabo la validación.

Mes (2016)	Secado del Método Tradicional	Secado del Método Propuesto
Ene	100 horas	47 horas
Feb	100 horas	49 horas
Mar	100 horas	46 horas
Abr	100 horas	45 horas
May	100 horas	46 horas
Jun	175 horas	49 horas
Jul	175 horas	50 horas
Ago	180 horas	50 horas
Sep	180 horas	50 horas
Oct	200 horas	50 horas
Nov	200 horas	50 horas
Dic	200 horas	50 horas

**Tabla 3** Tiempo de secado del Método Tradicional VS el Método Propuesto

Para realizar la prueba de hipótesis se basa en los resultados que se obtienen aplicando el programa MINITAB versión 14 indicado en la **figura 8**, obteniendo el valor del estadístico  $t=7.74$ .



**Figura 8** Obtención de Tcalculada con MINITAB 14

Se considera que la hipótesis nula ( $H_0$ ) asume que el tiempo de secado para el método tradicional ( $\mu_1$ ) y el método propuesto ( $\mu_2$ ) son iguales contra la alternativa ( $H_1$ ) de que el método tradicional es mayor al método propuesto, quedando el planteamiento de la siguiente manera:

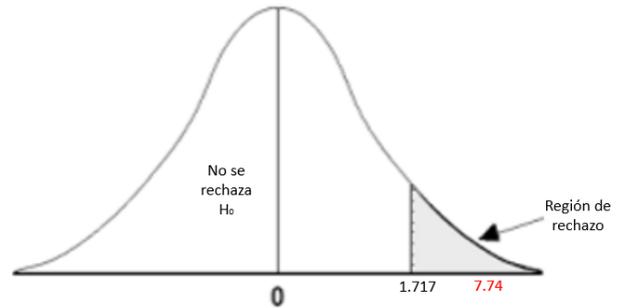
$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

Para comparar con la  $T_{tablas}$ , considerando un valor de significancia de 5%, localizado en la tabla de distribución t de Student se tiene lo siguiente:

$$t_{tablas} = t_{0.05, 12+12-2} = t_{0.05, 22} = 1.717$$

Con los datos mostrados en la **figura 9** se concluye que existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula y en consecuencia no rechazar la hipótesis alternativa.



**Figura 9** Prueba de hipótesis

De lo anterior se concluye que el tiempo promedio de secado del método tradicional en la empresa CERAMITEX es mayor al tiempo promedio del sistema de secado propuesto; implicando que la decisión es inversa al planteamiento, porque la medición es el tiempo y solamente se minimiza, conllevándonos a que el método propuesto es mejor.

**Resultados**

Las corridas de la simulación del sistema de secado se realizan considerando las temperaturas promedios mensuales del año 2016 del municipio de Jiquipilas, Chiapas, México; para los meses de enero a junio son datos reales, para los meses restantes del año se pronosticaron basados en AccuWeather (AccuWeather.com, 2016). Que están indicados en la **tabla 4**.

En la columna 4 de la tabla siguiente se muestran las temperaturas máximas obtenidas en el sistema de secado, oscilando entre los 120°C y 125°C quedando dentro de las reglas difusas establecidas en la fase 2; en la columna 3 se localiza el tiempo en horas donde se alcanzan dichas temperaturas y en la columna 5 el tiempo cuando el sistema restablece la temperatura inicial.

Mes	T_prom	Tie_sec	T_max	Tie_rest
Ene	22.7°C	20 horas	121.25°C	47 horas
Feb	23°C	20 horas	121.44°C	49 horas
Mar	27.7°C	20 horas	124.61°C	46 horas
Abr	28.9°C	17 horas	120.18°C	45 horas
May	30.48°C	20 horas	121.18°C	46 horas
Jun	23.9°C	20 horas	120.01°C	49 horas
Jul	22.75°C	20 horas	121.28°C	50 horas
Ago	22.79°C	17 horas	121.3°C	50 horas
Sep	25°C	20 horas	122.7°C	50 horas
Oct	24.7°C	20 horas	122.5°C	50 horas
Nov	24°C	20 horas	122.07°C	50 horas
Dic	23°C	20 horas	121.44°C	50 horas

**Tabla 4** Resultados del tiempo de secado del sistema

## Conclusiones

Al simular el sistema de secado el rango de temperatura a emplear esta entre 120°C y 125 °C, controlada entre las 17 y 20 horas del proceso mientras que el proceso completo del sistema de secado es posible realizarlo en 50 horas; reduciéndolo al menos en un 50% con respecto al método tradicional.

En consecuencia, el diseño del sistema de secado propuesto; permite coadyuvar en las medianas industrias alfareras que no cuentan con la suficiente dimensión territorial y recurso económico para obtener sistemas que sean competitivos con la gran empresa, basado en la proporción de costos de la producción obtenida y logrando en consecuencia un secado uniforme de las tejas sin interrupciones.

## Referencias

AccuWeather.com (25 de marzo de 2016). Obtenido de AccuWeather.com: <http://www.accuweather.com/es/mx/jiquipilas/236959/month/236959?monyr=6/01/2016>

Afanador García, N., & J., I. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander. *Epsilon*, 101-119.

Martínez López, E., & Lira Cortés, L. (2016). Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 35-44.

Rodríguez Ramírez, J., Diego Nava, F., Martínez Alvarez, C., Méndez Lagunas, L., & Aguilar Lescas, M. (2004). Perfiles de Temperatura en un Horno Ladrillero. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 209-217.

Salazar Rodríguez, J., López Carranza, E., & M. Vreeland, J. (1993). Medida de las Temperaturas de un Horno Artesanal de Mórrope, Departamendo de Lambayaque, Utilizado para la Fabricación Tradicional de Alfarería. *Bull. Ins. ff. études andines*, 685-699.

Stojanovski, G., & Stankovski, M. (2011). Advanced Industrial Control Using Fuzzy-Model Predictive Control. *IFAC*, 10733-10738.