



Sistema difuso para la fabricación de lámina con tetra pak reciclado

Fuzzy System for Manufacturing of Plate with Recycled Tetra Pak

Edgar Antonio Bayona Ramírez¹ Helbert Eduardo Espitia Cuchango²

Para citar este artículo: E.A. Bayona y H.E. Espitia, "Sistema difuso para la fabricación de lámina con tetra pak reciclado". *Revista Vínculos*, vol 13, no 2, julio-diciembre de 2016, pp. xx-xx

Recibido: 23-03-2016 / **Modificado:** 24-04-2016 / **Aprobado:** 12-06-2016

Resumen

El modelado resulta ser una herramienta de gran utilidad para estudiar y representar los diferentes comportamientos que se tienen en la naturaleza, particularmente cuando el fenómeno a representar está dado por el comportamiento de los humanos, los sistemas de inferencia difusa resultan ser una buena herramienta para esto; un sistema de inferencia difusa proporciona una buena significancia y con el fin de mejorar la exactitud del sistema se pueden emplear algoritmos de optimización para el ajuste del sistema difuso.

En el presente documento se realiza la propuesta y ajuste de un sistema de inferencia difusa para estimar el tiempo de prensado en caliente en la fabricación de una lámina con reciclaje de Tetra Pak. El sistema se propone basado en el funcionamiento del proceso real, posteriormente se realiza el ajuste de los conjuntos difusos empleando un algoritmo de optimización, debido a las características de los conjuntos empleados se utiliza un algoritmo de optimización con restricciones.

Palabras clave: optimización, restricciones, sistema difuso, Tetra Pak.

Abstract

The modeling is a useful tool to study and represent the different behaviors in nature. Particularly when the phenomenon to be represented is given by the human behavior, fuzzy interference systems turn out to be a good tool for this. A fuzzy interference system provides good significance. To improve the accuracy of system optimization algorithms can be used to adjust the fuzzy system.

In this document the proposal and adjust of a Diffuse inference system is performed to estimate the hot pressing time to making a film with Tetra Pak recycling. The system is proposed based on the operation of the actual process. The settings of Diffuse sets are performed using optimization algorithms. Finally, due the characteristics of Diffuse sets optimization algorithms with restrictions are used.

Keywords: optimization, restrictions, fuzzy system, Tetra Pak.

1. Ingeniero mecánico; especialista en educación en tecnología; magíster en ingeniería industrial; docente de Planta de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central. Correo electrónico: ebayona@itc.edu.co
2. Ingeniero Electrónico; ingeniero mecatrónico, especialista en telecomunicaciones móviles; magíster en ingeniería industrial, magíster en ingeniería mecánica; doctor en ingeniería de sistemas y computación; docente de planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: heespitiac@udistrital.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de un operario para la ejecución de cierta labor puede llevar un tiempo considerable dependiendo la tarea a realizar, también algunos aspectos adicionales en su labor se pueden aprender a lo largo del tiempo; por otra parte, por diferentes motivos (jubilación, incapacidad, etc.), cuando la empresa no cuenta con este empleado se puede generar una situación que perjudique la producción o el normal funcionamiento de esta. Por lo anterior, es de gran importancia tener un mecanismo que permita disponer del conocimiento de este experto, siendo una buena opción un modelo de inferencia difusa.

En este documento se presenta la propuesta de un sistema difuso que permite establecer el tiempo de prensado en caliente para una lámina elaborada con reciclaje de Tetra Pak, considerando la humedad relativa y la densidad de la materia prima. El sistema difuso se propone basado en el conocimiento de los operarios, adicionalmente, para lograr una buena precisión en la descripción del fenómeno a modelar, se emplea un proceso de optimización utilizando datos medidos del sistema real.

1.1 Sistemas desarrollados para reciclaje de Tetra Pak

En primer lugar, sobre la recolección selectiva de los residuos de envases y su reciclado, en [1] se revisa el desarrollo de un sistema de separación de los componentes de residuos en fábrica, obteniendo papel con diferentes aplicaciones, papel reciclado en Fiskey (Suecia), papel higiénico o de cocina en Streep (Alemania), bolsas y sacos Kraft en Lerida, España. Por su parte, con el plástico y el aluminio se pueden elaborar distintos productos como alfombrillas o suelas de zapatos; también se pueden tener productos empleando el envase completo como: aglomerado, madera sintética, pallets, etc. Una aplicación final consiste en la recuperación de energía mediante el proceso de incineración.

Sobre trabajos que emplean lógica difusa, en [2] se propone un modelo de reciclaje para estimar la reciclabilidad total; los componentes de este sistema son representados mediante conjuntos difusos y su contribución a la reciclabilidad total es modelada mediante reglas lingüísticas de la forma "si entonces".

Acerca de aplicaciones a nivel nacional, en [3] se realiza un análisis de alternativas de aprovechamiento del RTBA (Reciclaje del envase Tetra Brik® Aseptic) susceptibles de implementarse en Colombia (recuperación de papel, madera sintética y aprovechamiento energético), concluyendo que la metodología de aprovechamiento de corto y mediano plazo presenta las mejores perspectivas de implementación respecto a los volúmenes actualmente generados en el país. También en este trabajo se establecieron los conceptos de diseño necesarios para la implementación de una planta prototipo de tratamiento y aprovechamiento de residuos de Tetra Pak, enfocada en la transformación del envase en dos productos finales (pulpa y madera sintética).

Sobre aplicaciones prácticas del reciclaje, en [4] se propone la construcción de un tablero aglomerado de fibra de coco y cemento como alternativa para la construcción de vivienda; la corteza del coco es desfibrada mediante un molino, después se retiran los residuos de la cascara presentes en la fibra y esta es cortada en longitudes de 2 a 5 mm. Posteriormente, es sometida a un proceso de molienda en un molino de cuchillas con reducción de cribas por etapas y, al final, se retira el polvillo resultante mediante el tamizado. En este trabajo, se llevó a cabo con un diseño experimental factorial multinivel, variando la proporción de fibra y cemento en nueve tableros teniendo un total de 36 muestras.

Por su parte, en [5] se realiza el estudio de una planta de producción de tableros aglomerados de Tetra Pak en Guayaquil, Ecuador, en este estudio se expone que hasta el momento este tipo de empaques no se podían reciclar en Ecuador. Es por esto que al final de su ciclo de vida los empaques Tetra Pak tienen tres efectos: ocupan capacidad de los rellenos sanitarios del país, demandan que se incurra en costos

operativos para su disposición final y reducen la vida útil de los rellenos sanitarios o botaderos.

En [6] se expone que países como Alemania, España y Brasil son pioneros en el reciclaje de Tetra Pak y han tenido experiencia de éxito, hoy en día recuperan hasta el 80% de los desechos que generan; para lograrlo, han desarrollado múltiples procesos que van desde la recuperación de la pulpa y la producción de tableros aglomerados, hasta la comercialización de pulpa, polietileno y aluminio. Sobre técnicas empleadas para el reciclado, en [7] se propone un método para separar la fibra de los componentes principales del envase de cartón para líquidos, esto con el fin de evaluar las ventajas y desventajas del empleo de esta materia prima como fuente de fibras secundarias en la fabricación de papel. La resistencia mecánica del envase postconsumo se reduce por hidratación utilizando hidróxido de sodio; este proceso destruye los puentes de hidrógeno que unen la fibra. El procedimiento permite rescatar 92% de fibra existente en el envase, por ello este material se ubica como potencial alternativa de fuente de fibra secundaria para la fabricación de papel.

Un trabajo adicional se puede observar en [8], donde se tiene como objetivo diseñar un prototipo de máquina transportadora para fabricar láminas de polialuminio; este se obtiene a partir de la trituración del aluminio y el polietileno contenido en el Tetra Pak de postconsumo. En la actualidad se fabrican láminas de diferentes espesores en una prensa en caliente, la cual aprovecha la variación térmica para fundir el polietileno y unirlo con el aluminio.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Tetra Pak

Tetra Pak es una empresa multinacional que diseña y produce soluciones de envasado de cartón y procesamiento para la industria alimenticia; las innovaciones de Tetra Pak se desarrollan en el área de envases asépticos para líquidos, los cuales, combinados con un procesamiento de ultra alta temperatura

(UAT o UHT para las siglas en inglés Ultra High Temperature), permite que los alimentos líquidos puedan ser envasados y guardados bajo condiciones de temperatura ambiente por más de un año [9].

El proceso de fabricación de las láminas de Tetra Pak inicia con una limpieza del envase utilizado previamente en la contención de alimentos líquidos, posteriormente hay un proceso de secado de este material para proceder luego a la molienda de los mismos, logrando hacer una reducción de tamaño del material, para pasar después a la etapa del dosificado según el espesor de lámina deseada, en seguida hay un proceso de prensado en caliente y luego en frío de los tableros para, finalmente, cortar las láminas de Tetra Pak [9].

2.2 Lógica difusa

La lógica difusa tiene su origen en 1965 cuando Lofty A. Zadeh habló de esta teoría como la lógica del razonamiento aproximado; su artículo "Fuzzy sets" se considera como punto inicial de esta propuesta teórica. La lógica difusa surge como una alternativa que permite emular la forma como los seres humanos procesan la información para la toma de decisiones donde se involucran términos lingüísticos en su descripción [10].

La lógica difusa (fuzzy logic) permite tratar información imprecisa como estatura mediana, temperatura baja o mucha fuerza, en términos de conjuntos difusos; estos conjuntos difusos se combinan en reglas para definir acciones, por ejemplo, si la temperatura es alta entonces se debe enfriar mucho. De esta manera los sistemas de control basados en lógica difusa combinan unas variables de entrada (definidas en términos de conjuntos difusos) por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida [11].

2.2.1 Sistemas difusos

Los sistemas difusos permiten modelar procesos no lineales como también adquirir información de un conjunto de datos empleando algoritmos

de aprendizaje; a diferencia de los sistemas neuronales, los basados en lógica difusa permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos directamente o como punto de partida para su optimización [11].

2.2.2 Sistemas difusos basados en reglas

En los sistemas difusos basados en reglas, las relaciones entre las variables se representan por medio de reglas difusas de la forma:

Si la proposición del antecedente **entonces** la proposición del consecuente.

Las proposiciones difusas son declaraciones como:

“es grande” o “es muy grande”

Una característica asociada es denominada etiqueta lingüística y se representa mediante un conjunto difuso en el universo de discurso; las etiquetas lingüísticas son también denominadas constantes difusas, condiciones difusas o nociones difusas [11].

2.3 Optimización no lineal con restricciones

El problema general optimización no lineal con restricciones se puede definir como se muestra en (1).

$$\begin{aligned}
 & \underset{x}{\text{Min}} \quad f(x) \quad \text{sujeto a} \\
 & \quad c(x) \leq 0 \\
 & \quad c_{eq}(x) = 0 \\
 & \quad A \cdot x \leq b \\
 & \quad A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\
 & \quad l_b \leq x \leq u_b
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde A_{eq} es una matriz, x, b, b_{eq}, l_b y u_b son vectores, $c(x)$ y $c_{eq}(x)$ son funciones que retornan valores en forma de vectores, $f(x)$ es una función que retorna en un valor escalar, adicionalmente

$f(x)$, $c(x)$ y $c_{eq}(x)$ pueden ser funciones no lineales [12].

2.3.1 Optimización con restricciones

La optimización con restricciones busca transformar el problema considerado en un problema pequeño que se pueda resolver fácilmente utilizando como base un proceso iterativo; una de las características de este método es la transformación de un problema con restricciones en un problema sin restricciones, esto mediante una función que penaliza las limitaciones que están cerca del límite de la restricción [12].

Las ecuaciones Kuhn-Tucker (KT) son condiciones de optimalidad para un problema de optimización con restricciones. Cuando las funciones $f(x)$ y $G_i(x)$, $i = 1, \dots, m$ son convexas, las ecuaciones KT son necesarias y suficientes para una solución global. Las ecuaciones Kuhn-Tucker se presentan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla G_i(x^*) &= 0 \\
 \lambda_i \cdot G_i(x^*) &= 0 \quad i = 1, \dots, m \\
 \lambda_i &\geq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{2}$$

En (2) la primera ecuación describe la cancelación de los gradientes de la función objetivo y las restricciones en el punto de solución; los multiplicadores de Lagrange (λ_i , $i = 1, \dots, m$) de los gradientes que se van a cancelar son necesarios para equilibrar las desviaciones de la función objetivo y las restricciones de los gradientes. Puesto que solo se incluyen las restricciones activas al anular los gradientes, las limitaciones que no son activas se omiten en esta etapa y los multiplicadores Lagrange se igualan a cero, esto se puede observar en las dos últimas ecuaciones de (2).

La solución de las ecuaciones KT son base de muchos algoritmos de programación no lineal. Para calcular los multiplicadores de Lagrange directamente

en estos algoritmos se utiliza el principio aplicado en los métodos cuasi-Newton, estos métodos son comúnmente conocidos como la Programación Cuadrática Secuencial (SQP, por sus siglas en inglés).

2.3.2 Programación cuadrática secuencial (SQP)

Los métodos SQP son métodos de programación no lineal donde se genera un subproblema de programación cuadrática QP. La idea principal es la formulación de un subproblema QP basado en una aproximación cuadrática de la función de Lagrange como se presenta en (3).

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(\mathbf{x}) \quad (3)$$

El subproblema de programación cuadrática (QP) se puede enunciar como se muestra en (4).

$$\text{Min}_{\mathbf{d} \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H}_k \mathbf{d} + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d}$$

$$\nabla g_i(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d} + g_i(\mathbf{x}_k) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e \quad (4)$$

$$\nabla g_i(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{d} + g_i(\mathbf{x}_k) \leq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m$$

Este subproblema se puede resolver utilizando cualquier algoritmo de programación cuadrática QP; la solución se utiliza para establecer una nueva iteración de la forma indicada en (5).

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (5)$$

El parámetro de longitud α_k se determina por un procedimiento de búsqueda apropiado de modo que se obtenga una disminución suficiente en la función objetivo. La matriz \mathbf{H}_k es una aproximación de la matriz hessiana, de la función de Lagrange, \mathbf{H}_k puede ser actualizada por cualquiera de los métodos Cuasi-Newton, siendo el método BFGS el más empleado [13], [14].

3. PROCESO EMPLEADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN

El método empleado para realizar la identificación de parámetros del modelo difuso se puede apreciar en la Figura 1.

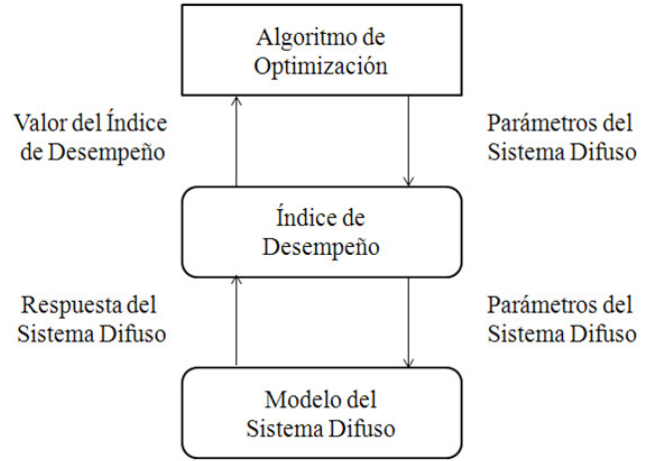


Figura 1. Proceso para la identificación de parámetros del modelo [15].

Como es de apreciar en la Figura 1, primero se implementa una función donde se calcula la respuesta del sistema difuso con la cual se determina el respectivo índice de desempeño a optimizar. Como índice de desempeño se considera la raíz del error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE) el cual se puede calcular con (6).

$$J(\mathbf{X}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [r(n) - s(n, \mathbf{P})]^2} \quad (6)$$

Dónde:

- J : Función objetivo.
- \mathbf{P} : Conjunto de parámetros del controlador.
- n : Índice de tiempo discreto.
- r : Datos reales medidos.
- s : Datos obtenidos del sistema difuso.
- N : Número total de datos tomados.

3.1 Restricciones consideradas para el proceso de optimización

En el caso de emplear una función de pertenencia triangular como la considerada en la Figura 2 se tienen las restricciones mostradas en (7).

$$a < b \text{ y } b < c \quad (7)$$

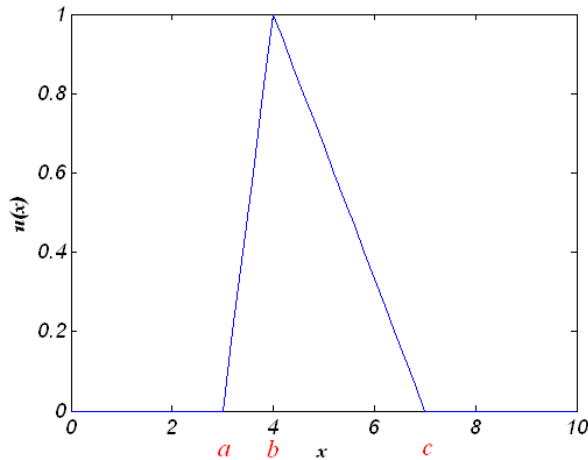


Figura 2. Función de pertenencia triangular.

Fuente: elaboración propia.

Por su parte, cuando se emplea una función de pertenencia trapezoidal como la mostrada en la Figura 3, se tienen las siguientes restricciones indicadas en (8).

$$a < b, b < c \text{ y } c < d \quad (8)$$

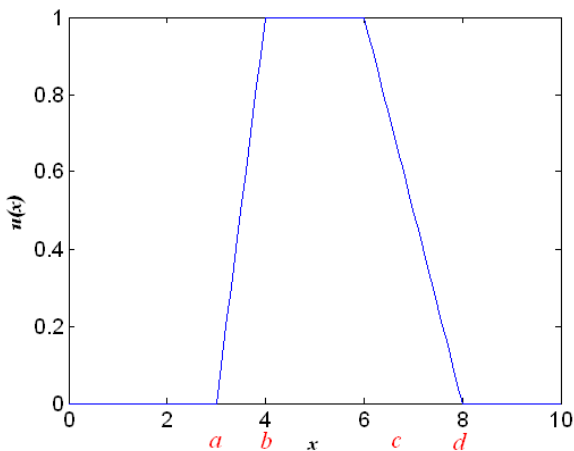


Figura 3. Función de pertenencia trapezoidal.

Fuente: elaboración propia.

4. MODELO PROPUESTO DEL SISTEMA DIFUSO

Para definir los conjuntos difusos se consideraron los valores hallados de la densidad del Tetra Pak molido en un día soleado y un día con lluvia, estos valores se distribuyeron en tres grupos:

De $220 \frac{Kg}{m^3}$ a $241 \frac{Kg}{m^3}$ se definió como **densidad Baja**.

De $242 \frac{Kg}{m^3}$ a $263 \frac{Kg}{m^3}$ se definió como **densidad Media**.

De $264 \frac{Kg}{m^3}$ a $285 \frac{Kg}{m^3}$ se definió como **densidad Alta**.

Por su parte, los valores hallados de la humedad relativa del Tetra Pak molido en el día soleado y en el día con lluvia se distribuyeron en dos grupos:

De 50% a 72% de humedad relativa se definió como periodo seco.

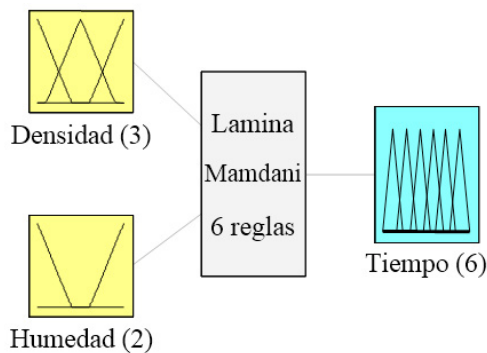
De 73% a 100% de humedad relativa se definió como periodo húmedo.

Con tres conjuntos en la entrada para la densidad del Tetra Pak y dos conjuntos en la entrada para la humedad relativa del ambiente se establecen seis reglas de inferencia; para el sistema general se pueden considerar diferentes espesores de lámina: 4, 6, 9, 12, 15, 19, 25, 30 y 40 mm, a medida de ejemplo en el presente artículo se considera el caso de una lámina de 4mm. Las reglas del sistema difuso para el prensado en caliente con la lámina de 4 mm son:

1. Si la densidad es baja y el periodo seco entonces el tiempo es T1.
2. Si la densidad es media y el periodo seco entonces el tiempo es T2.
3. Si la densidad es alta y el periodo seco entonces el tiempo es T3.
4. Si la densidad es baja y el periodo húmedo entonces el tiempo es T4.
5. Si la densidad es media y el periodo húmedo entonces el tiempo es T5.
6. Si la densidad es alta y el periodo húmedo entonces el tiempo es T6.

Los conjuntos del universo de discurso de salida (tiempo) se consideran con los siguientes valores medios: T1=1800, T2=1872, T3=1944, T4=2016, T5=2088 y T6=2088 segundos.

En la Figura 4 se puede apreciar la estructura del sistema de inferencia difusa propuesto, en el cual se tienen dos universos de discurso de entrada, uno de salida y seis reglas de inferencia.



Sistema Lamina: 2 entradas, 1 salida, 6 reglas.

Figura 4. Sistema difuso propuesto.

Fuente: elaboración propia empleando MTALAB®.

Adicionalmente, para la construcción del sistema difuso se emplean conjuntos triangulares y trapezoidales.

5. DATOS MEDIDOS

Los tiempos para llenar el cargador, cargar la prensa y el paso de prensado de caliente a frío dependen del estado físico de los operarios involucrados y del tiempo recorrido de la jornada de trabajo; por su parte, el tiempo de prensado en caliente depende directamente del espesor de la lámina producida, la densidad del material molido y la humedad relativa del ambiente.

El tiempo de prensado en frío es constante para todos los espesores de las láminas. Las tablas de los tiempos de prensado en caliente según el espesor de la lámina producida, dependiendo de la densidad del Tetra Pak molido y de la humedad relativa, son los mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Tiempo de prensado en caliente para espesor de 4 mm.

Tiempo de Prensado en Caliente para espesor de 4 mm.		
Densidad Kg/m ³	Humedad Relativa %	Tiempo (seg.)
220 - 241	50 - 69	1800
242 - 263	50 - 69	1845
264 - 285	50 - 69	1890
220 - 241	70 - 78	1935
242 - 263	70 - 78	1980
264 - 285	70 - 78	2025
220 - 241	79 - 100	2070
242 - 263	79 - 100	2115
264 - 285	79 - 100	2160

Fuente: elaboración propia.

6. RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Al realizar el proceso de optimización, se obtuvieron los resultados de la Tabla 2 para los sistemas con conjuntos triangulares y trapezoidales con un espesor de 4 mm. Como se puede apreciar se tiene una mejora significativa del índice de desempeño para los dos sistemas difusos considerados.

Tabla 2. Valores de la función objetivo antes y después del proceso de optimización.

Conjuntos triangulares		Conjuntos trapezoidales	
Inicial	Optimizado	Inicial	Optimizado
3266	167	3267	167

Fuente: elaboración propia.

6.1 Resultados empleando conjuntos triangulares

En este caso se emplean conjuntos triangulares para la densidad del Tetra Pak, la humedad relativa del ambiente y para el tiempo de prensado en caliente considerando el espesor de 4 mm. En la Figura 5 se pueden apreciar las funciones de pertenencia bajo, medio y alto asociadas al universo de discurso de densidad, en esta figura se muestran las funciones de pertenencia antes y después del proceso de

optimización. Como puede notarse, no se presenta mayor cambio en estas funciones de pertenencia.

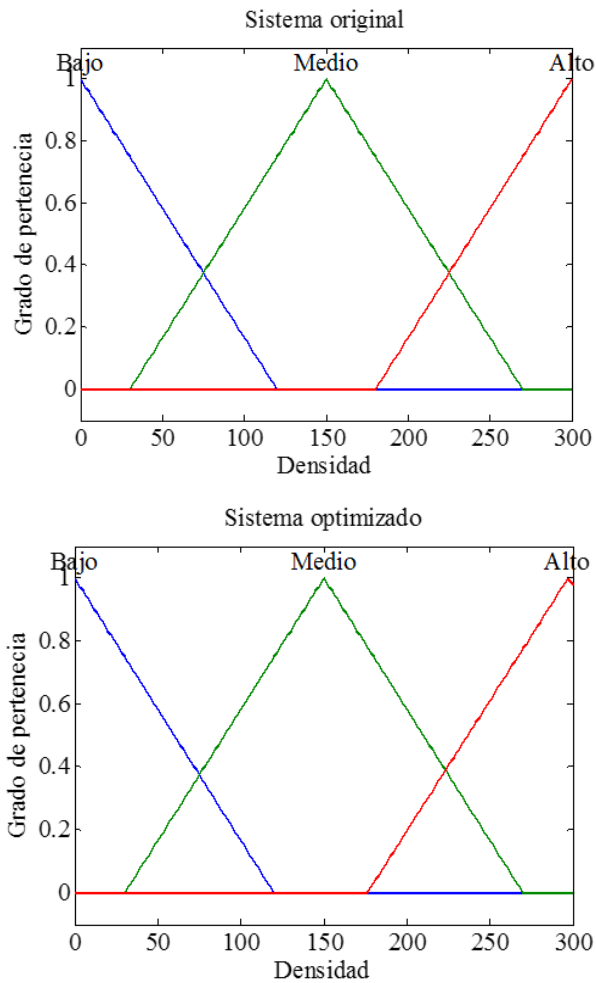


Figura 5. Conjuntos difusos triangulares para la densidad del Tetra Pak.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se pueden apreciar las funciones de pertenencia empleadas para el universo de discurso asociado a la humedad relativa del ambiente. Como se puede observar, se presenta un cambio significativo en la función de pertenencia asociada a la parte alta de la humedad.

Los conjuntos difusos asociados al tiempo de prensado se pueden apreciar en la Figura 7, donde se nota que el mayor cambio luego del proceso de optimización se tiene para la función de pertenencia T6.

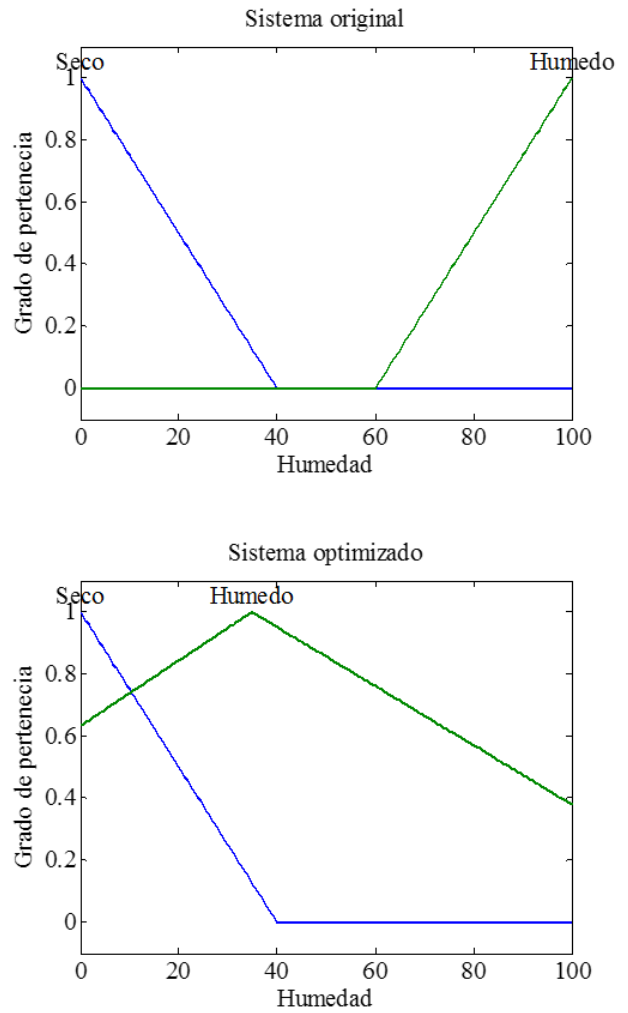
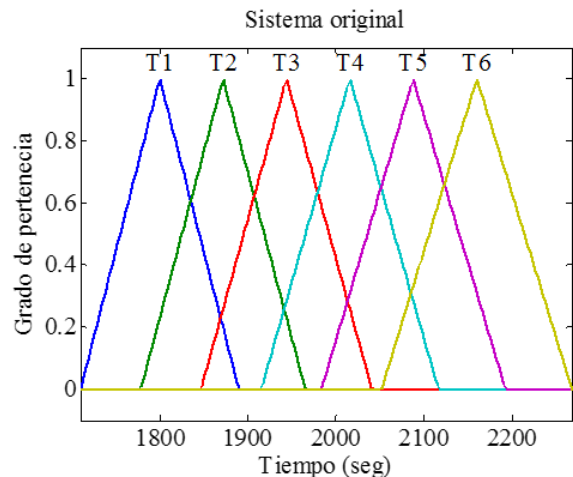


Figura 6. Conjuntos difusos triangulares para la humedad relativa del ambiente.

Fuente: elaboración propia.



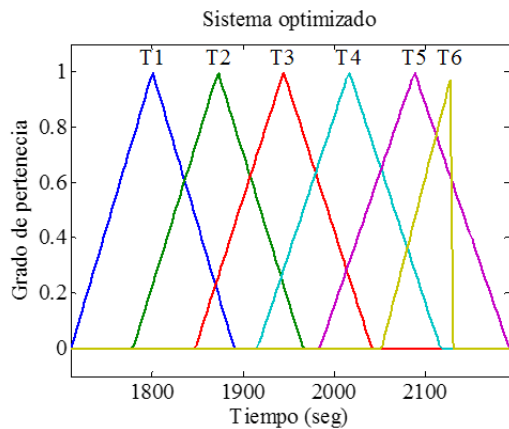


Figura 7. Conjuntos difusos triangulares para el tiempo de prensado.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 8 se puede apreciar la superficie de respuesta para el sistema difuso que emplea conjuntos triangulares, como puede notarse, se tiene un cambio significativo del sistema original luego del proceso de optimización.

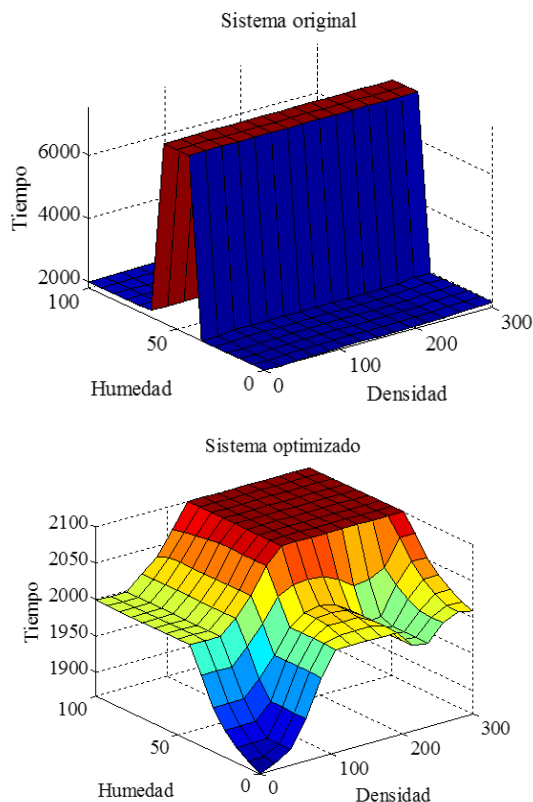


Figura 8. Superficie de respuesta con conjuntos triangulares.

Fuente: elaboración propia.

6.2 Resultados empleando conjuntos trapezoidales

En este caso para la implementación del sistema de inferencia difusa se emplean conjuntos con forma trapezoidal. En la Figura 9 se pueden observar los conjuntos difusos optimizados y sin optimizar para la variable de entrada asociada a la densidad. Como se puede apreciar, en esta figura el cambio logrado después de la optimización no es significativo.

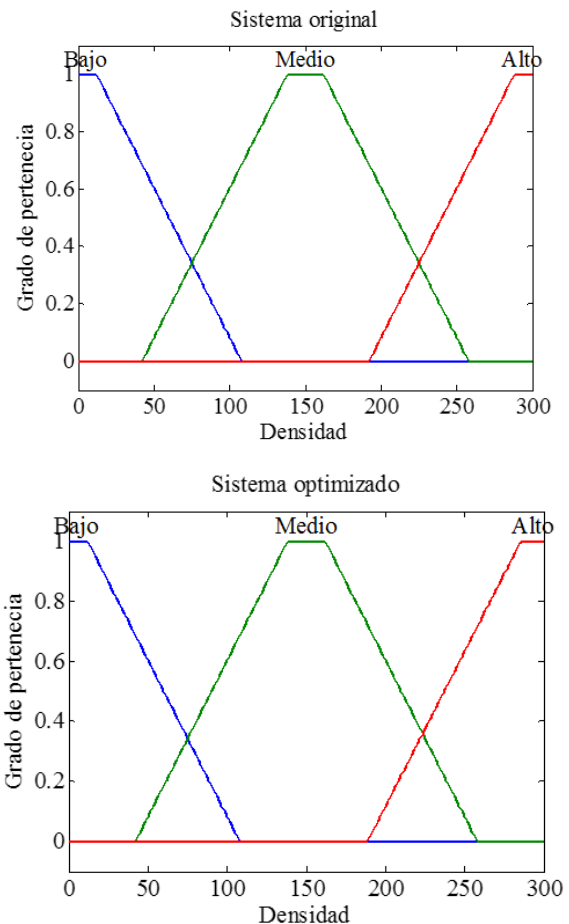


Figura 9. Conjuntos difusos trapezoidales para la densidad del Tetra Pak.

Fuente: elaboración propia.

Los conjuntos difusos trapezoidales para la humedad relativa sin y con optimización se pueden apreciar en la Figura 10, en este caso se observa un cambio significativo en los parámetros de los conjuntos.

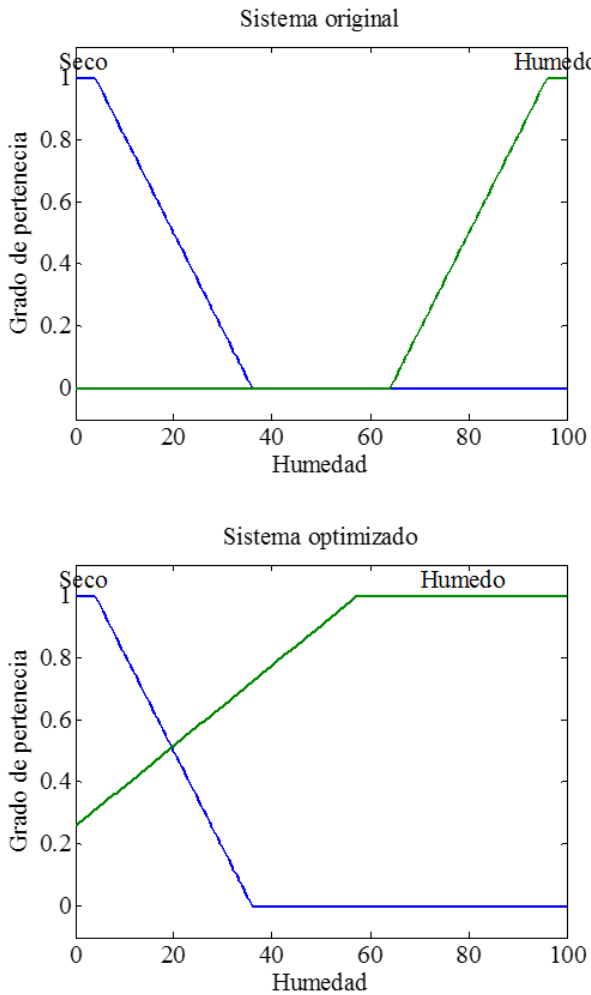


Figura 10. Conjuntos difusos trapezoidales para la humedad relativa del ambiente.
Fuente: elaboración propia.

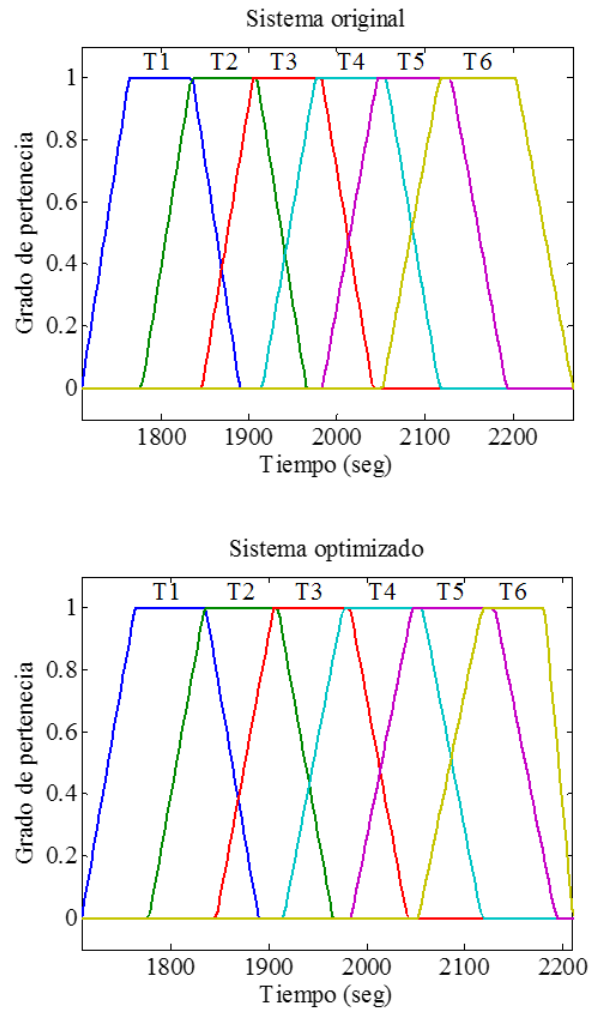
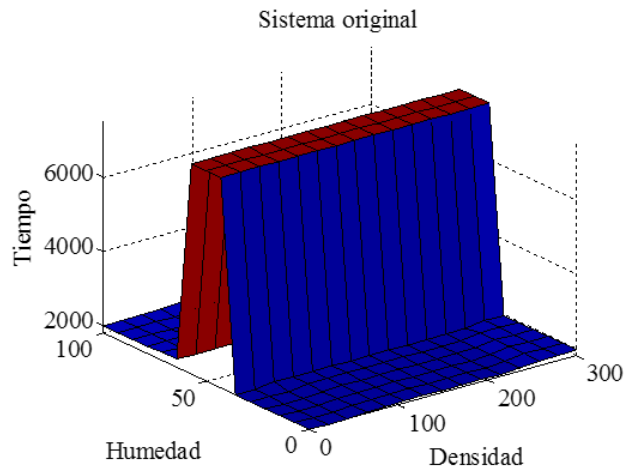


Figura 11. Conjuntos difusos trapezoidales para el tiempo de prensado.
Fuente: elaboración propia.

Los conjuntos trapezoidales para el universo de discurso de salida asociado al tiempo se pueden apreciar en la Figura 11, donde se presentan los conjuntos sin optimizar y después del proceso de optimización, observando que el mayor cambio se tiene para la función de pertenencia T6. Con estos conjuntos difusos del antecedente y del consecuente se obtienen las superficies de respuesta para la lámina de 4 mm que se muestran en la Figura 12. En esta figura se aprecia de forma significativa el cambio que se tiene luego del proceso de optimización.



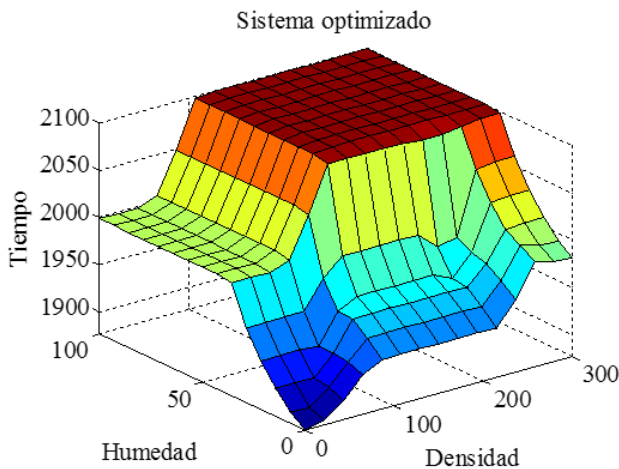


Figura 12. Superficie de respuesta con conjuntos trapezoidales.

Fuente: elaboración propia.

7. CONCLUSIONES

Utilizando una estrategia de optimización con restricciones fue posible el ajuste del sistema difuso descrito mediante conjuntos triangulares y trapezoidales; además, se aprecia que los conjuntos asociados a la humedad en el antecedente y T6 en el consecuente son los que presentan un mayor cambio luego del proceso de optimización.

Por otro lado, con las superficies de respuesta es posible observar de forma cualitativa el ajuste realizado mediante el proceso de optimización.

Los sistemas con conjuntos difusos triangulares y trapezoidales obtuvieron resultados similares lo cual se puede observar en las respectivas superficies de respuesta.

REFERENCIAS

- [1] L. González, "Marketing de Reciclado", Tesis Doctoral en Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 1993.
- [2] Y. Phillis, V. Kouikoglou, X. Zhu, "A Fuzzy Logic Approach to the Evaluation of Material Recyclability". IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 454-458, 2005.
- [3] M. Becerra, C. Villabona, "Diseño conceptual de una planta de tratamiento para el aprovechamiento de residuos de envases asépticos (envases de Tetra Pak) en Bogotá D.C.". Tesis de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, Bogotá D.C., Colombia, 2009.
- [4] M. Novoa, "Elaboración y evaluación de tableros aglomerados a base de fibra de coco y cemento". Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Colima, Colima, México, 2005.
- [5] D. Barreno, N. Yanez, M. Mejía, "Proyecto de Inversión para la Elaboración de Aglomerado a partir del Reciclaje de Tetra Pak". Tesis de Ingeniería Comercial y Empresarial con Especialización en Marketing y Comercio Exterior, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2006.
- [6] J. Obando, M. Escobar, "Modelación del Proceso de Recuperación parcial de envases de Tetra Pak". *Revista EIA*, no. 11, pp. 157-167, Julio, 2009.
- [7] J. Turrado, M. Dávalos, F. Fuentes, A. Saucedo, "Envases de Cartón para Líquidos como Fuente de Fibra Secundaria". *Revista Información Tecnológica*, vol. 23, no. 3, 2012.
- [8] M. Gómez, "Parámetros dinámicos a considerar en el diseño de una máquina transportadora de láminas de polialuminio". *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 4, no. 3, pp. 33-38, julio-agosto-septiembre, 2014.
- [9] TETRAPAK, Marzo 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.tetrapak.com/>
- [10] L. Wang, "A course on Fuzzy Systems and Control". New Jersey, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1997.
- [11] B. M. Del Brio, y A. Sanz "Redes Neuronales y Sistemas Difusos". Alfaomega, Segunda Edición, 2006.
- [12] H. Mora, "Optimización no lineal y dinámica". Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Segunda Edición, 2001.

- [13] M. Perez, "Técnicas de optimización con MATLAB / Optimization Techniques with MATLAB", Createspace Independent Pub, 2014.
- [14] J. Nocedal, S. Wright, "Numerical Optimization". Springer, 2006.
- [15] H. Espitia, F. Sierra, "Controller optimization for a solar tracking system using differential evolution", ". *Tecciencia*, vol. 10, no. 18., pp. 7-13, April, 2015.

