

## Use of the desirability function to optimize a vulcanized product

**María Blanca Becerra Rodríguez<sup>1</sup>, Roberto Zitzumbo Guzmán<sup>1</sup>,  
Jorge Domínguez Domínguez<sup>2</sup>, Jorge Luis García Alcaraz<sup>3</sup>,  
Sergio Alonso Romero<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>CIATEC, Omega 201, Fracc. Industrial Delta. León, Guanajuato, C.P. 37545, México.  
Tel. +524777100011 mblca@hotmail.com, rzitzumb@ciatec.mx, salonso@ciatec.mx.

<sup>2</sup>CIMAT, Unidad Aguascalientes. F. Bartolomé de las Casas, Aguascalientes, Ags. C.P. 20259, México. Tel. +524499185061 jorge@cimat.mx.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Av. del Charro # 450 Norte, Col. Fovissste Chamizal, Cd. Juárez, Chihuahua, C.P. 32310, México Tel. +526566884843 jorge.garcia@uacj.mx

### Abstract

This work shows the simultaneous optimization of three quality characteristics of the manufacturing process of vulcanization: scorch time, maximum tearing strength and cost formulation of development of the rubber-fiber product. Fractional factorial design is an effective tool that is applied when uncertainty about how factors affect the quality characteristics of process is high. Operational factors considered were: carbon black, paraffinic oil, stearic acid, ZnO, EPDM-MA, MBTS, TMTD, fiber, sulfur vulcanizing time and temperature of mixing. The objective was to maximize the scorch time, maximizing tearing strength and minimizing cost of product formulation. The quality characteristics were analyzed by ANOVA. An array was found that simultaneously optimizes three quality characteristics with the desirability function.

**Keywords:** design of experiments, simultaneous optimization, EPDM, natural fiber.

## Aplicación de la función de deseabilidad para optimizar un producto vulcanizado

### Resumen

Este trabajo muestra la optimización simultánea de tres características de calidad del proceso de manufactura de vulcanizado: tiempo de quemado, esfuerzo máximo al desgarrar y costo de formulación de producto caucho-fibra. El diseño factorial fraccionado es una herramienta eficaz que se aplica cuando se tiene una gran cantidad de factores con incertidumbre de cómo afectan las características de calidad de un proceso. Los factores considerados fueron: negro de humo, aceite parafínico, ácido esteárico, ZnO, EPDM-MA, MBTS, TMTD, fibra, azufre, tiempo de vulcanizado y temperatura de mezclado. El objetivo fue maximizar el tiempo de quemado, maximizar el esfuerzo al desgarrar y minimizar el costo de formulación del producto. Las características de calidad fueron analizadas mediante un ANDEVA. Se encontró el mejor arreglo que optimiza simultáneamente tres características de calidad con la función de deseabilidad.

**Palabras clave:** diseño de experimentos, optimización simultánea, EPDM, fibra natural.

## 1. Introducción

El proceso de vulcanizado es un proceso utilizado en diferentes aplicaciones industriales, tales como el automotriz, calzado y otras. Los productos de caucho vulcanizado se obtienen a través de diferentes técnicas y los parámetros operacionales comunes que requieren son la: presión y altas temperaturas y una de las técnicas de moldeo más usada es la de *compresión*, la cual consiste en una prensa hidráulica con platos calientes que cierran el molde manteniendo bajo presión el tiempo necesario para vulcanizar Royo [1] y Morton [2]. Dentro del desarrollo de procesos de manufactura de productos vulcanizados, se están generando diversos tipos de formulaciones que permiten la optimización de características de calidad, donde existe poco conocimiento de los efectos que influyen en el proceso como velocidades de rotores en mezcladores y el tiempo de quemado para mezclar sin pre-vulcanizar. En relación con estos procesos, se han reportado formulaciones sobre la mejora de rendimiento y beneficios obtenidos por reciclado de caucho, bajo la identificación de interacciones en materiales constituyentes durante el proceso de aglutinamiento a altas temperaturas Peralta [3]. Un modelo experimental predictivo fue diseñado para regular la temperatura de fusión y carga de motor en un termoplástico vulcanizado con extrusor de doble tornillo Trifkovic [4]. Se han realizado investigaciones sobre caucho natural reforzado con fibra de *Kenaf* para mejorar las propiedades mecánicas Anuar [5]. Asimismo estudios sobre tiempos de curado, identificando las propiedades de tensión y la morfología de palmera y nano tubos de arcilla con EPDM Ismail [6]. Algunos parámetros como fibras cortas de aramida, concentración de fibras, orientación de fibras con matrices de caucho natural y EPDM, ofrecen mejores características de diseño, altos módulos y esfuerzo máximo al desgarre Shirazi [7]. Las aplicaciones de técnicas estadísticas juegan un rol importante en la optimización de procesos científicos-tecnológicos industriales, desde procesos simples hasta complejos. Algunos diseños experimentales han sido aplicados con éxito en las resoluciones de problemas industriales, es el caso de diseños factoriales y fraccionados que han sido empleados para estudiar los efectos de varios factores sobre variables respuestas específicas varios autores [8-12]. Otras técnicas estadís-

ticas han sido usadas para determinar los puntos óptimos de operación de procesos varios autores [13-17]. Además, los diseños robustos han sido utilizados para obtener productos y procesos insensibles a factores no controlados varios autores [18-21]. En términos generales, el problema de proceso de vulcanizado puede centrarse, en la insuficiencia de tiempo de quemado, pobres propiedades mecánicas de desgarre y alto costo de formulación del producto. De acuerdo a la revisión de literatura realizada no se encontraron reportes que incluyan todos los factores que influyen en el proceso de vulcanizado en un solo experimento. Así, el desarrollo de esta investigación consideró todos los factores de operación del proceso de vulcanizado, reforzado con fibra de *agave tequilana*, con el objetivo de maximizar el tiempo de quemado, maximizar la propiedad mecánica de esfuerzo al desgarre y minimizar el costo de formulación del producto.

## 2. Metodología

La estrategia experimental para la optimización simultánea de tres características de calidad del proceso de vulcanizado que se siguió es la siguiente:

1. Elección de los factores, niveles y selección de características de calidad.
2. Elección del diseño experimental y realización del experimento.
3. Análisis estadístico de los datos por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) para cada característica de calidad.
4. Obtención del modelo de primer orden señalado por Montgomery [22], que represente el comportamiento del proceso entre los valores de los factores estudiados.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=0}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

5. Verificación de supuestos estadísticos de modelos de regresión ajustados a través de los coeficientes de determinación en relación al ANDEVA.
6. Optimización del proceso mediante la función de deseabilidad Gutiérrez [23] y Castaño [24].

$$d_i(X) \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{Y}_i(X) < El_i \text{ o } \hat{Y}_i(X) > ES_i \\ \left[ \frac{\hat{Y}_i(X) - ES_i}{T_i - ES_i} \right]^t & \text{si } T_i < \hat{Y}_i(X) \leq ES_i \\ \left[ \frac{\hat{Y}_i(X) - El_i}{T_i - El_i} \right]^s & \text{si } El_i \leq \hat{Y}_i(X) \leq T_i \end{cases} \quad (2)$$

$$D = \sqrt[n]{d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n} \quad (3)$$

### 2.1. Equipo y material

**Equipo:** Mezclador interno Brabender DDRV-502. Mezclador externo Brabender PM-3000. Prensa hidráulica 38954D11A00. Reómetro de disco oscilante ODR 2000. Molde de acero 150 mm × 150 mm × 3 mm. La máquina de ensayos universales marca Instron, modelo 365 fue validada con el estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad) teniendo una eficiencia mayor al 90% y una incertidumbre de 0,31%. **Materiales:** terpolímero Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) IP4725P (Dow Nordel ®), viscosidad Mooney ML1+4 a 125°C con un contenido del 70% de etileno. Negro de humo N990 (NH). Ácido esteárico SA29 (AE). Óxido de Zinc 821 (ZnO). Aceite parafínico 324 (AP). Disulfuro de benzotiacilo Perkacit Akzo, MBTS (MB). Tiuramdisulfuros ultra aceleradores 80GAF140, TMTD (TM). Agente compatibilizante Fusabond EPDM-MA (EM). Azufre en polvo (AZ) y fibra de agave tequilana (FI).

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Etapa 1: Preparación básica

El proceso del producto caucho-fibra, consistió en programar parámetros operacionales varios autores [25-28]: banbury (120°C, 50 rpm y 10

minutos). Mezclador de rodillos externos (120°C y 20 rpm). Prensa hidráulica (160°C y 137 MPa). Los componentes a mezclarse se pesaron para las diferentes formulaciones del diseño de experimentos: NH (40 y 80 PCR), AP (15 y 40 PCR), AE (0,5 y 2 PCR), ZnO (3 y 5 PCR), EM (2 y 7 PCR), MB (0,7 y 2 PCR), TM (0,1 y 0,6 PCR), FI (10 y 40 PCR) y AZ (1 y 2,5 PCR). La fibra de agave tequilana fue secada previamente (24 horas en estufa de laboratorio a 80°C) Ismail [6].

#### 2.2.2. Etapa 2: Manufactura del producto

Se procedió a manufacturar el producto de caucho-fibra, como se ilustra en la Figura 1. Los componentes entraron por la cámara de mezclado bajo las condiciones de operación Planes [29]: 1 minuto de mezclado EPDM. 3 minutos de mezclado de AE, ZnO, EM, MB, TM. 1 minuto de mezclado de NH y AP. 2 minutos de mezclado de FI y por último 3 minutos para mezclar el AZ. Se laminó el material en el mezclador externo. Se realizaron pruebas reométricas (160°C y 12 minutos) para cada experimento Royo [1]. El moldeo se realizó en prensa hidráulica durante (7 y 10,5 minutos) según lo indicado en el experimento, obteniendo placas de 150 mm × 150 mm × 3 mm. Las pruebas al desgarre ASTM-D624 se realizaron a velocidad de 400 mm/min.

### 2.3. Diseño factorial fraccionado

El esquema experimental planteado para seleccionar las variables importantes del proceso fue un factorial fraccionado  $2_{III}^{11-7} = 16$  [24], es decir, un diseño altamente fraccionado que se encuentra saturado con resolución III, lo cual indica que los efectos principales no se confunden

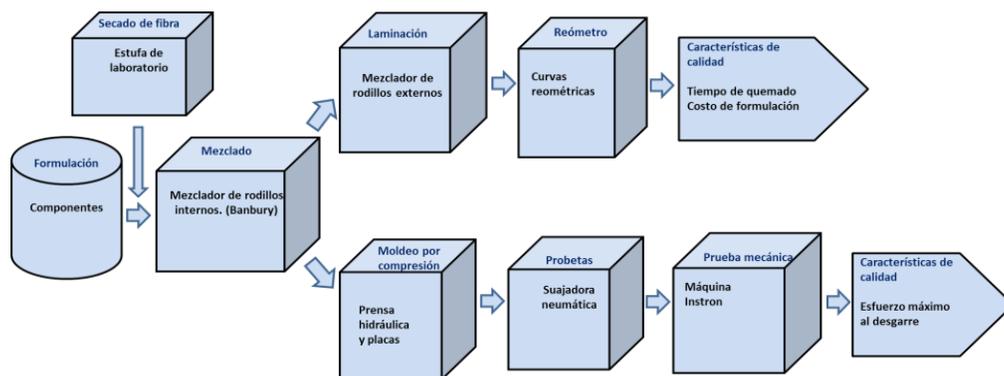


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de manufactura caucho-fibra.

entre ellos, sin embargo si están confundidos con interacciones dobles. En este caso en particular se asume estudiar solamente los factores principales, debido a que romper la estructura alias y estudiar los efectos de las interacciones dobles, implicaría demasiados ensayos experimentales adicionales, lo cual dejaría de ser práctico. En la Tabla 1 se ilustran los factores, niveles y características de calidad del proceso de vulcanizado. El objetivo del proceso de manufactura fue determinar si el cambio, en el nivel de factores tiene un efecto estadístico significativo sobre las características de calidad del producto caucho-fibra.

### 3. Resultados y discusiones

Los experimentos se llevaron a cabo y se hicieron los análisis residuales Gutiérrez [23] para validar los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia, de tal manera que los residuales se comportan bajo una distribución normal con media cero y varianza de uno (las gráficas son omitidas). Lo anterior, indica que los modelos de regresión presentan buena calidad, sin efecto de apalancamiento en las tres características de calidad estudiadas ts1, EMD y Costo. Los resultados y el análisis estadístico se describen en la Tabla 2, están apoyados por el paquete de Minitab.

### 3.1. Análisis de característica de calidad (ts1)

En la Tabla 3 se reporta el ANDEVA de los factores que contribuyen a explicar la característica de calidad (ts1) varios autores [22-24].

En esta tabla se aprecian los efectos principales: NH, AP, TM, MB y AZ importantes para la variabilidad de (ts1); donde TM y MB aceleran la reacción química entre el AZ y el EPDM, mejorando así el tiempo de quemado evitando el pre-vulcanizado de la mezcla. El  $R^2$  ajustada de 84,14% explica los efectos de variabilidad observada, lo que indica que los factores significativos son responsables de la característica de calidad ts1. De acuerdo con las Tablas 3, 5 y 7, la  $R^2$  ajustada es menor que la  $R^2$  debido a que los grados de libertad del Error son más pequeños que el Total del esquema experimental. Se obtuvo el modelo de regresión ajustado relacionado al ANDEVA de la ecuación (1), como se presenta a continuación:

$$ts1 = 3,04 - 0,28NH + 0,44AP + 0,50MB - 0,51TM - 0,46AZ \quad (4)$$

De acuerdo al modelo (4) se estimaron los valores para la característica de calidad (ts1), y con esta estimación se determinó el valor máximo para la característica de calidad (ts1) de 5,5 minutos. En la Tabla 4 se ilustra el arreglo de factores y

Tabla 1  
Factores experimentales, niveles y unidades de medición

Factores	Código	Niveles		Unidades de medición
		Bajo(-1)	Alto (1)	
Negro Humo	NH	40	80	PCR <sup>a</sup>
Aceite Parafínico	AP	15	40	PCR
Ácido Esteárico	AE	0,5	2	PCR
ZnO	ZnO	3	5	PCR
EPDM-MA	EM	2	7	PCR
MBTS	MB	0,7	2	PCR
TMTD	TM	0,1	0,6	PCR
Fibra	FI	10	40	PCR
Azufre	AZ	1	2,5	PCR
Tiempo de vulcanizado	TV	7	10,5	min <sup>b</sup>
Temperatura de mezclado	TMEZ	105	120	°C <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Partes por Cien de Resina, <sup>b</sup> Minutos y <sup>c</sup> Grados Celsius.

Tabla 2  
Resultados del diseño de experimento  $2^{11-7}$  y características de calidad

Exp	Variables Codificadas											Características de Calidad		
	NH	AP	AE	ZnO	EM	MB	TM	FI	AZ	TV	TMEZ	ts1*	EMD**	Costo***
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	2,54	41,50	15,95
2	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	2,27	46,26	14,01
3	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	5,29	35,90	13,95
4	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	2,4	34,71	15,00
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	3,56	40,57	17,27
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	3,33	43,18	13,05
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	2,38	33,31	12,86
8	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	3,44	35,27	15,89
9	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	3,13	40,01	14,65
10	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	2,92	40,45	15,14
11	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	2,69	28,81	15,11
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	3,92	31,84	14,01
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1,85	33,27	15,64
14	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1,27	47,19	14,07
15	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	5,23	31,37	14,01
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,56	31,36	14,90

ts1\* Tiempo de Quemado = Unidad de medición en minutos.

EMD\*\* Esfuerzo Máximo al Desgarre = Unidad de medición en KN/m.

Costo\*\*\* Costo de formulación = Unidad de medición en pesos mexicanos.

Tabla 3  
Análisis de varianza de característica de calidad de (ts1)

Factor	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrados Medios	F0	Valores-P
NH	12,996	1	1,2996	6,92	0,0390•
AP	3,0976	1	3,0976	16,50	0,0066•
ZnO	0,1681	1	0,1681	0,90	0,3806
EM	0,0090	1	0,009025	0,05	0,8337
MB	4,0602	1	4,06023	21,63	0,0035•
TM	4,2642	1	4,26423	22,71	0,0031•
FI	0,0289	1	0,0289	0,15	0,7084
AZ	3,4596	1	3,4596	18,43	0,0051•
TV	0,2450	1	0,245025	1,31	0,2968
Error	1,12647	6	0,187746		
Total	17,7588	15			

$R^2 = 93,65\%$ .  $R^2(\text{ajustada}) = 84,14\%$ . • Significativos.

Tabla 4  
Respuesta óptima para (ts1) del diseño  $2^{11-7}_{III}$

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
NH	-1	1	-1
AP	-1	1	1
AE	-1	1	-1
ZnO	-1	1	-1
EM	-1	1	1
MB	-1	1	1
TM	-1	1	-1
FI	-1	1	1
AZ	-1	1	-1
TV	-1	1	-1
TMEZ	-1	1	1

Valor óptimo estimado = 5,5 minutos.

niveles que maximizan el rendimiento de la característica de calidad (ts1).

### 3.2. Análisis de característica de calidad (EMD)

En la Tabla 5 se reporta el ANDEVA de los factores que más aportan a explicar la característica de calidad (EMD).

El ANDEVA anterior muestra los efectos: NH, ZnO, AZ y AP importantes para la variabilidad de (EMD); donde AP funciona como plastificante y mejora el desempeño de la propiedad mecánica

al evitar un desgarre prematuro. El  $R^2$ ajustada de 88,77% explica los efectos de variabilidad observada, lo que indica que los factores significativos son responsables de la característica de calidad EMD. Se obtuvo el modelo de regresión ajustado relacionado al ANDEVA de la ecuación (1), como se presenta a continuación:

$$EMD = 37,18 + 1,59NH - 4,36AP - 1,65ZnO - 1,36AZ \quad (5)$$

De acuerdo al modelo (5) se estimaron los valores para la característica de calidad (EMD), y con esta estimación se determinó que el valor máximo fue de 48,70 KN/m. En la Tabla 6 se ilustra el arreglo de factores y niveles que maximizan la característica de calidad (EMD).

### 3.3. Análisis de característica de calidad (Costo)

En la Tabla 7 se reporta el ANDEVA de los factores que contribuyen a explicar la característica de calidad (Costo).

El ANDEVA anterior muestra los efectos: NH, AP, TV, FI y EM importantes para la variabilidad de (Costo); donde TV mide el tiempo para vulcanizar el producto adecuadamente sin perjudicar a la propiedad mecánica. Además FI es el refuerzo que mejora la propiedad mecánica y reduce el costo de formulación. EM mejora la interacción entre la fibra y el EPDM. El  $R^2$ ajustada de

Tabla 5  
Análisis de varianza de característica de calidad de (EMD)

Factor	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrados Medios	$F_0$	Valores-P
NH	40,6821	1	40,6821	11,44	0,0148•
AP	304,965	1	304,965	85,72	0,0001•
ZnO	43,5831	1	43,5831	12,25	0,0128•
EM	7,87785	1	7,87785	2,21	0,1873
MB	0,00054	1	0,00054	0,00	0,9906
TM	5,57786	1	5,57786	1,57	0,2571
FI	1,40008	1	1,40008	0,39	0,5535
AZ	29,7379	1	29,7379	8,36	0,0277•
TV	20,1309	1	20,1309	5,66	0,0549
Error	21,3456	6	3,5576		
Total	475,301	15			

$R^2 = 95,50\%$ .  $R^2$ (ajustada) = 88,77%. • Significativos.

97,84% explica los efectos de variabilidad observada, lo que indica que los factores significativos son responsables de la característica de calidad Costo. Se obtuvo el modelo de regresión ajustado relacionado al ANDEVA de la ecuación (1), como se presenta a continuación:

$$\text{Costo} = 14,71 - 0,21\text{NH} - 0,25\text{AP} + 0,51\text{EM} - 0,58\text{FI} + 0,69\text{TV} \quad (6)$$

De acuerdo al modelo (6) se estimaron los valores para la característica de calidad (Costo), y

Tabla 6  
Respuesta óptima para (EMD)  
del diseño  $2_{III}^{11-7}$

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
NH	-1	1	0,96
AP	-1	1	-0,99
AE	-1	1	-0,60
ZnO	-1	1	-0,99
EM	-1	1	-0,98
MB	-1	1	0,42
TM	-1	1	0,96
FI	-1	1	-1,0
AZ	-1	1	-0,98
TV	-1	1	-1,0
TMEZ	-1	1	-0,19

Valor óptimo estimado = 48,70 KN/m.

con esta estimación se determinó el valor mínimo para la característica de calidad a \$12,39. En la Tabla 8 se ilustra el arreglo de factores y niveles que minimizan la característica de calidad (Costo).

### 3.4. Optimización simultánea del proceso

La función de deseabilidad obtenida de las ecuaciones (2) y (3), se encontró el punto factible donde las características de calidad tienen un valor óptimo. La Figura 2 ilustra el resumen del resultado de la función de deseabilidad obtenida.

Tabla 8  
Respuesta óptima para (Costo)  
del diseño  $2_{III}^{11-7}$

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
NH	-1	1	0,99
AP	-1	1	0,99
AE	-1	1	0,91
ZnO	-1	1	0,99
EM	-1	1	-0,99
MB	-1	1	-0,99
TM	-1	1	-0,90
FI	-1	1	0,98
AZ	-1	1	0,48
TV	-1	1	-0,99
TMEZ	-1	1	-0,96

Valor óptimo estimado = \$12,39.

Tabla 7  
Análisis de varianza de característica de calidad de (Costo)

Factor	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrados Medios	$F_0$	Valores-P
NH	0,70980	1	0,70980	25,34	0,0024•
AP	1,02516	1	1,02516	36,60	0,0009•
ZnO	0,01265	1	0,01265	0,45	0,5265
EM	4,31601	1	4,31601	154,11	0,0000•
MB	0,01155	1	0,01155	0,41	0,5444
TM	0,00330	1	0,00330	0,12	0,7429
FI	5,48731	1	5,48731	195,93	0,0000•
AZ	0,00275	1	0,00275	0,10	0,7644
TV	7,71451	1	7,71451	275,46	0,0000•
Error	0,16803	6	0,02800		
Total	19,4511	15			

$R^2 = 99,13\%$ .  $R^2(\text{ajustada}) = 97,84\%$ . • Significativos.

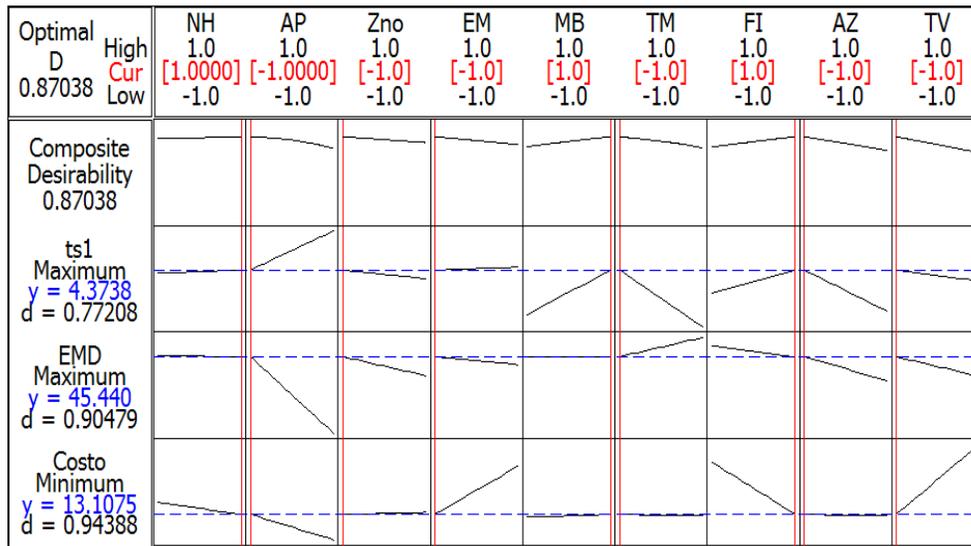


Figura 2. Resultado de la función de deseabilidad para (ts1), (EMD) y (Costo).

En esta figura se observa que solamente hay 9 factores de los 11 iniciales. Esto es debido a que hay dos factores no significativos [24]. Las columnas presentan los nueve factores y en las filas las tres características de calidad. Para la primera característica de calidad (ts1) los factores significativos identificados son: NH, AP, MB, TM y AZ los cuales tienen un efecto al cambiar de nivel -1 a nivel 1. En la optimización de la segunda característica de calidad (EMD) se encontraron significativos los factores: NH, AP, ZnO y AZ. Y como tercera característica de calidad (Costo) se obtuvieron como factores importantes del modelo los efectos significativos: NH, AP, EM, FI y TV. Sin embargo, se destaca que el factor TV tiene un efecto relevante en lo que se refiere al costo. El valor *d* de la gráfica es igual al grado de deseabilidad de las características de calidad, es decir, el valor *d* cercano a 1 significa que la respuesta es deseable. Por lo que refiere a que las características de calidad tienen un valor aceptable de deseabilidad. En cuanto a la deseabilidad global *D* se refiere a que tiene un valor adecuado lo que revela que el proceso de vulcanizado alcanza una respuesta óptima global. Los valores indicados entre corchetes [ ] en la fila de factores corresponden a los niveles que satisfacen las características de calidad del proceso de manufactura de vulcanizado NH=1, AP=-1, ZnO=-1, EM=-1, MB=1, TM=-1, FI=1, AZ=-1 y TV=-1 y con este arreglo se estiman los valores de las características de calidad: ts1=4,3 minutos, EMD=45,4 KN/m y Costo=\$13,10.

### 4. Conclusiones

Este trabajo se aplicó a un diseño factorial fraccionado  $2_{III}^{11-7}$  con él, objetivo de maximizar el tiempo de quemado, maximizar el esfuerzo al desgarrar y minimizar el costo de formulación del producto. Se destaca que es posible optimizar el proceso de vulcanizado aplicando la función de deseabilidad ya que es difícil encontrar que todas las características de calidad cumplan con su valor óptimo al mismo tiempo. La generación de este conocimiento permite una mejora sustancial al proceso de caucho vulcanizado que repercute en ahorro de tiempo y reducción de costo en la formulación sin afectar otras características de calidad del producto. Las soluciones presentadas resultan ser útiles para aplicarse principalmente al proceso de vulcanizado y otros procesos como: extrusión e inyección de plástico. Además permite a los ingenieros de producción identificar los factores que impactan al proceso y lograr así una mayor competitividad tecnológica en el desarrollo de procesos limpios de manufactura de vulcanizado al utilizar un refuerzo a base de fibra natural cuidando y protegiendo el medio ambiente.

### Referencias bibliográficas

- Royo J.: "Manual de tecnología de caucho", Consorcio nacional de industriales del caucho, Barcelona, España, 1984.

2. Morton J.: "Procesamiento de plásticos", Limusa S. A de C. V., México, 1997.
3. Peralta J., Silva H., Hilliou L., Machado A., Pais J. y Williams C.: "Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders". *Construction and Building Materials*, Vol. 36, (2012), 557-565.
4. Trifkovic M., Sheikhzadeh M., Choo K. y Rohani S.: "Model predictive control of twin-screw extruder for thermoplastic vulcanizate (TPV) applications". *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 36, (2012), 247-254.
5. Anuar H. y Zuraida A.: "Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre". *Composites: Part B*, 42, (2011), 462-465.
6. Ismail H. y Shaari S.: "Curing characteristic, tensile properties and morphology of palm ash/halloysite nanotubes/ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) hybrid composites". *Polymer Testing*, Vol. 29, (2010), 872-878.
7. Shirazi M. y Noordermeer J.: "Factors influencing reinforcement of NR and EPDM rubber with short aramid fibers". Conferencia, Milwaukee, (2010), 12-14 October.
8. Seong J., Dong H. y Choon M.: "A study determining the optimal machining conditions for 40,000 rpm ultra high speed spindle system". *Precision Engineering*, 36, (2012), 451-457.
9. Krishnaraj V., Prabukarthi A., Ramanathan A., Elanghovan N., Kumar S., Zitoune R. y Davim J.: "Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates". *Composites: Part B*, Vol. 43, (2012), 1791-1799.
10. Goyal A., Sharma S. y Gupta P.: "Availability analysis of a part of rubber tube production system under preemptive resume priority repair". *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 16(4), (2009), 260-269.
11. White M., García J., Hernández J. y Meza J.: "Cycle time improvement by six sigma project for the increase of new business accounts". *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 16(3), (2009), 191-205.
12. Sutanto P., Picchioni F. y Janssen L.: "The use of experimental design to study the responses of continuous devulcanization process". *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 102, (2006), 5028-5038.
13. Alonso M., Bousbaine A., Llovet J. y Malpica J.: "Obtaining industrial experimental designs using a heuristic technique". *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, (2011), 10094-10098.
14. Madaeni S., Arast N., Rahimpour F. y Arast Y.: "Fabrication optimization of acrylonitrile butadiene styrene (ABS)/polyvinylpyrrolidone (PVP) nanofiltration membrane using response surface methodology". *Desalination*, No. 280, (2011), 305-312.
15. da Costa H., Ramos V., da Silva W. y Sirqueira A.: "Analysis and optimization of polypropylene (PP)/ethylene-propylene-diene monomer (EPDM)/scrap rubber tire (SRT) mixtures using RSM methodology". *Polymer Testing*, Vol. 29, (2010), 572-578.
16. Riza A.: "Hybrid Taguchi-Harmony search algorithm for solving engineering optimization problems". *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 15(3), (2008), 286-293.
17. Domínguez J.: "Optimización simultánea para la mejora continua y reducción de costos en procesos". *Ingeniería y Ciencia*, Vol. 2(4), (2006), 145-162.
18. Besseris G.: "Profiling effects in industrial data mining by non-parametric DOE methods: an application on screening checkweighing systems packaging operations". *European Journal of Operational Research*, Vol. 220, (2012), 147-161.
19. Ramanujam R., Raju R. y Muthukrishnan N.: "Optimization of machining parameters for turning AL-SIC (10P) MMC using Taguchi Grey relational analysis". *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 18(11), (2011), 582-590.
20. Basavaraj Y., Prasad K. y Naidu N.: "Improvement of process capability through six sigma and robust design: case study at an Indian Steel manufacturer". *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 18(9), (2011), 482-492.
21. Chiang F.: "Simultaneous optimization of robust design with quantitative and ordinal data". *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 15(2), (2008), 231-238.

22. Montgomery D.: "Diseño y análisis de experimentos", Limusa Wiley, Universidad Estatal de Arizona, Estados Unidos de América, 2004.
23. Gutiérrez H. y De la Vara R.: "Análisis y diseño de experimentos", McGraw-Hill Interamericana, Guanajuato, México, 2008.
24. Castaño E. y Domínguez J.: "Diseño de experimentos: Estrategias y análisis en ciencia y tecnología". Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 2010.
25. Ruijun G., Bohuslav V. y Chalupova G.: "Effect of variables on the mechanical properties and maximization of polyethylene-aspen composites by statistical experiment design". *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 22(6), (2009), 633-649.
26. Balasubramanian M., Paglicawan M., Zhang Z., Lee S., Xin Z. y Kim J.: "Prediction and optimization of mechanical properties of polypropylene/waste tire powder blends using a hybrid artificial neural network-genetic algorithm (GA-ANN)". *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 21, (2008), 51-69.
27. Zhaobo W., Cheng X. y Zhao J.: "Dynamically vulcanized blends of polyethylene-octene elastomer and ethylene-propylene-diene terpolymer". *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 126, (2011), 272-277.
28. Zhang H., Datta R., Talma A. y Noordermeer J.: "Maleic-anhydride EPM as compatibilizing agent in NR/BR/EPDM blends". *European Polymer Journal*, Vol. 46, (2010), 754-766.
29. Planes E., Chazeau L., Vigier G., Fournier J. y Stevenson I.: "Influence of fillers on mechanical properties of ATH filled EPDM during ageing by gamma irradiation". *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 95, (2010), 1029-1038.

Recibido el 19 de Noviembre de 2012

En forma revisada el 14 de Octubre de 2013