

Optimización del desempeño funcional de los sacos de polipropileno mediante el diseño experimental de Taguchi

Salvatore R.

Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
e-mail: salvatore7reina@gmail.com

Resumen: La metodología six sigma es una herramienta de desarrollo para las empresas que desean ser competitivas con relación a sus similares, por lo que dicho desarrollo se fundamenta en encontrar un modelo de mejora continua cuantitativo, utilizando diseño de experimentos de Taguchi. En la planta de extrusión de sacos de polipropileno se detectó que las características de proceso (CTX) que impactan en la fabricación de sacos de polipropileno son la temperatura del horno, el porcentaje de carbonato y la relación de velocidades de la extrusora. Las características de los sacos de polipropileno (CTY) que determinan el desempeño funcional durante su tiempo de servicio están determinadas por la tenacidad, el porcentaje de elongación del hilo y el título del hilo. La optimización del desempeño funcional de los sacos de polipropileno es el mejoramiento de las características críticas del proceso de acuerdo a las condiciones reales de operación. A estas condiciones se procede a efectuar interacciones entre las características del proceso (CTX) para obtener un proceso robusto o menos susceptible a las variaciones críticas del saco (CTY) durante su fabricación y tiempo de servicio.

Palabras clave: Diseño experimental de Taguchi, sacos de polipropileno, extrusora, six sigma, optimización desempeño funcional, diseño robusto, características críticas del proceso.

Abstract: The Six Sigma methodology is a development tool for companies that want to be competitive in relation to their peers, so that development is based on finding a quantitative model of continuous improvement using Taguchi design of experiments. Extrusion plant in polypropylene bags was found that the processing characteristics (CTX) impacting manufacturing polypropylene bags were the oven temperature, the percentage of carbonate and the speed ratio of the extruder. The characteristics of polypropylene bags (CTY) that determine the functional performance during their service are determined by the tenacity, the percent elongation of the thread and the thread title. The functional performance optimization polypropylene bags is the improvement of the critical features of the process according to the actual operating conditions. In these conditions proceeds to interactions between the process characteristics (CTX) for a robust and less susceptible to critical variations sack (CTY) during manufacture and service time.

Keywords: Taguchi experimental design, polypropylene bags, extruder, sixsigma, functional performance optimization, robust design, critical process characteristics.

1. INTRODUCCION

Las industrias de empaques plásticos en el país, buscan optimizar sus procesos para mejorarlos con programas de disminución de costos y racionalización del gasto, es decir buscar la cuenta que tiene el mayor valor en su sistema contable, se procede hacer un análisis de Pareto 80-20 y se buscan las causas de ese impacto en sus costos de producción. Tradicionalmente se busca en el proceso esas oportunidades de mejora sin considerar el análisis experimental de las variables que impactan al cliente lo que ocasiona los reclamos y devoluciones de los sacos de polipropileno. El optimizar el desempeño funcional, significa obtener un saco robusto volviéndole mínimamente sensible a los factores que causan variabilidad en la fabricación y en el uso. Con la utilización del diseño experimental de Taguchi se optimizará las características funcionales título del hilo, tenacidad y elongación de los sacos de polipropileno. Al realizar la optimización mediante el software estadístico

minitab 16 se encontrará los niveles en los que se calibrará la extrusora respecto al porcentaje de carbonato, temperatura del horno y relación de velocidades.

1.1 Diseño de experimentos de Taguchi

En casi todos los ámbitos de la investigación se efectúan diseños de experimentos, en las que se hacen cambios deliberados de las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las causas de los efectos obtenidos en la respuesta de salida y efectuar análisis de los datos resultantes que derivan en conclusiones para tomar decisiones. El diseño de experimentos es fundamental en el campo de la ingeniería para el desarrollo de nuevos productos, diseño de procesos y en el área de la mejora continua. Por lo que es necesario desarrollar un producto o proceso que se vea afectado en lo más mínimo por fuentes de variabilidad externa es decir un

diseño robusto. En la industria manufacturera es necesario tomar acciones correctivas inmediatas para la solución de problemas en una línea de producción, en una célula de trabajo con la finalidad de optimizar el desempeño funcional del proceso o del producto, por lo que se recurre al diseño experimental de Taguchi [6].

1.2 Matriz ortogonal

La base para el diseño de un experimento utilizando la metodología de Taguchi es la matriz ortogonal o arreglo ortogonal. A pesar de varios tipos de diseños clásicos como el factorial y el fraccionario, la matriz ortogonal se ha asociado tradicionalmente con las técnicas de experimentación de Taguchi. Dicha técnica de experimentación se utilizará no solo por su tradición, sino también porque la matriz ortogonal es eficiente ya que con la obtención de una cantidad relativamente pequeña de datos se pueden obtener conclusiones significativas y verificables. Además los diseños de experimentos que utilizan matrices ortogonales son básicamente simples de entender y sus directrices son fáciles de seguir [2].

Matriz Ortogonal $L_8(2^7)$								
Número	A	B	C	D	E	F	G	Resultados
	1	2	3	4	5	6	7	
1	1	1	1	1	1	1	1	y_1
2	1	1	1	2	2	2	2	y_2
3	1	2	2	1	1	2	2	y_3
4	1	2	2	2	2	1	1	y_4
5	2	1	2	1	2	1	2	y_5
6	2	1	2	2	1	2	1	y_6
7	2	2	1	1	2	2	2	y_7
8	2	2	1	2	1	1	2	y_8

Figura 1. Matriz ortogonal L_8

Para explicar la matriz ortogonal es necesario entender lo que es ortogonalidad que significa estar equilibrado y no mixto, en el contexto de las matrices de experimentación ortogonal significa estadísticamente independientes, el número de niveles de un factor es igual al número de niveles de la otra columna o factor es decir, que cada nivel en una columna se reproducirá el mismo número de veces para mantener el equilibrio del experimento como lo que se muestra en la Fig. 1 [2].

Los diseños experimentales de Taguchi, están basados en arreglos ortogonales, normalmente se identifican con un nombre como L_8 , que indica un arreglo con ocho corridas entre sus propiedades se destaca que es un modelo de datos de efectos fijos, es un diseño fraccionado necesario para obtener resultados en la brevedad posible. Los diseños experimentales clásicos también están basados en arreglos ortogonales, pero se identifican con un exponente para indicar el número de variables, así un diseño clásico 2^3 también tiene ocho corridas. Para entender adecuadamente la matriz ortogonal es necesario estandarizar su nomenclatura para poder definir a cada matriz ortogonal o su respectivo arreglo. Cada matriz puede ser definida de la

forma $L_A(B^c)$, L representa la matriz según Taguchi, A representa el número de corridas experimentales o combinación de factores que puede conducirse en el experimento, B representa el número de niveles entre cada columna y C representa el número de columnas para el diseño experimental [2].

$$F_{(+)} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{n} \tag{1}$$

$$\bar{y}F_{(-)} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{n} \tag{2}$$

$$\Delta_F = |\bar{y}F_{(+)} - \bar{y}F_{(-)}| \tag{3}$$

El promedio de los efectos de los factores en el nivel alto $\bar{y}F_{(+)}$ y bajo $\bar{y}F_{(-)}$ se obtienen de las ecuaciones (1) y (2). El delta Δ_F de la ecuación (3), indica la diferencia de los promedios del factor en el nivel alto y bajo.

1.3 Índices señal de ruido

Al medir la característica de calidad que interesa, se puede evaluar la media y variabilidad. La media se puede evaluar directamente con una lectura o el promedio si son varias lecturas. Para medir la variabilidad de una característica de calidad, se requiere de varias lecturas, se utiliza el rango y la varianza las medidas de mayor frecuencia. La ingeniería robusta utiliza una expresión matemática que involucra la media y la varianza, la que ayuda a la toma de decisiones con respecto a las características de proceso para obtener un diseño robusto. La expresión se denomina, índice señal ruido o SN.

$$SN = -10 \log \left| \frac{1}{n} \frac{(S_m - V_e)}{V_e} \right| \tag{4}[2]$$

$$S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \tag{5}[2]$$

$$V_e = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - S_m \right) \tag{6}[2]$$

Para calcular el índice señal de ruido se debe considerar el tipo de característica de proceso o producto a controlar y optimizar. El índice se diseñó de tal manera que productos más robustos tengan un mayor valor del índice SN, cuando el caso nominal es mejor se obtiene de la ecuación (4).

$$SN = -10 \log \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right| \tag{7}[2]$$

Maximizar la relación SN equivale a minimizar la función de pérdida, es decir el caso menor es el mejor ecuación (7).

$$SN = -10 \log \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right| \tag{8}[2]$$

En el caso mayor es mejor, la cantidad funciona de una manera similar al caso anterior, pero con el inverso. Maximizar una cantidad es equivalente a minimizar la función de pérdida ecuación (8).

1.4 Modelo de datos de efectos fijos

Los factores a los que se va a evaluar se mantendrán fijos durante la experimentación los literales a, b y c son los factores del experimento.

$$y_{ijkl} = \mu_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \begin{cases} i = 1,2,3, \dots, a \\ j = 1,2,3, \dots, b \\ k = 1,2,3, \dots, c \\ l = 1,2,3, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

La distribución de los datos para el diseño de tres factores y número de réplicas $n \geq 2$ se encuentran representados por el modelo (9) [4].

Donde y_{ijkl} es la observación de la característica del producto (CTY), μ_{ijk} es la media de la respuesta para el nivel de cada factor y ε_{ijkl} el error aleatorio del modelo.

$$\mu_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} \quad (10) [4].$$

La media global de los datos μ con sus efectos $\tau_i + \beta_j + \gamma_k$ y las interacciones de los factores $(\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk}$ se encuentran determinados en la ecuación (10). Se supone que los factores son fijos, y los efectos de los factores se definen como las desviaciones de la media global, por lo que $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$, $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ y $\sum_{k=1}^c \gamma_k = 0$. De forma similar las interacciones de los efectos de los factores se mantienen fijas, $(\tau\beta)_{ij}, (\tau\gamma)_{ik}, (\beta\gamma)_{jk}$ y $(\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$ [4].

$$y_{ijkl} = \mu + \varepsilon_{ijkl} \quad (11)$$

El modelo general de la media global de datos con efectos fijos y su error aleatorio se representan en la ecuación (11).

1.5 Análisis de variabilidad (ANOVA)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (12)[4]$$

Para el análisis de variabilidad se considera la suma de los cuadrados totales como se indica en la ecuación (12).

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (13)[4]$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (14)[4]$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{\dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (15)[4]$$

La suma de cuadrados de los efectos principales SS_A, SS_B y SS_C se encuentran a partir de los totales de los factores A ($y_{i\dots}$), B ($y_{\dots j}$) y C ($y_{\dots k}$), en las ecuaciones (13), (14) y (15).

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotales (AB)} - SS_A - SS_B \quad (16)[4]$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i\dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{AC} = SS_{Subtotales (AC)} - SS_A - SS_C \quad (17)[4]$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{\dots jk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{BC} = SS_{Subtotales (BC)} - SS_B - SS_C \quad (18)[4]$$

Para calcular la suma de los cuadrados de las interacciones de dos factores, se necesitan los totales de las celdas AxB, AxC y BxC, la suma de los cuadrados se encuentran por SS_{AB}, SS_{BC} , ecuación (16), (17) y (18).

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_{ABC} = SS_{Subtotales (ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (19)[4]$$

$$SS_e = SS_T - SS_{(ABC)} \quad (20)[4]$$

La suma de cuadrados de la interacción de los tres factores se calcula a partir de los totales de las celdas y_{ijkl} ecuación (19). La suma de los cuadrados del error con le ecuación (20).

Tabla 1. Análisis de variabilidad, ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0
A	SS_A	a-1	MS_A	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b-1	MS_B	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c-1	MS_C	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	MS_{AB}	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	MS_{AC}	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	MS_{BC}	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	MS_{ABC}	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error Total	SS_E SS_T	abc(n-1) abcn-1	MS_E	

Se observa el conjunto de los datos para encontrar la variabilidad del diseño experimental, Tabla 1.

1.6 Fase I metodología Six Sigma (CT flowdown)

Inspirado en la metodología QFD (despliegue de la función de calidad), el CT flowdown (despliegue simplificado de las características críticas para la satisfacción del cliente), asociándolas a parámetros clave de un determinado producto y sus respectivos procesos. El CT flowdown puede ser usado en la fase “define” para identificar proyectos de mejoramiento six sigma, comenzando con la definición de un determinado proceso/servicio como tema de mejoramiento. La matriz de despliegue consta de las CTS (características críticas de satisfacción), son el subconjunto de requisitos o atributos vitales para que el cliente se quede completamente satisfecho con un determinado producto o servicio. Las CTY (características críticas del producto), son el subconjunto de elementos y parámetros del producto que afectan de manera significativa las CTS aplicables al mismo. Las CTX (características críticas del proceso), es el subconjunto de elementos y parámetros del proceso que afectan de manera significativa las CTY aplicables al mismo. En los primeros niveles de despliegue del árbol, las CTX se refieren solo a la estructura de procesos, subprocesos y operaciones relevantes para las CTY [5].

2. MATERIALES Y METODOLOGIA

2.1 Materiales

2.1.1 Polipropileno y carbonato

Se utilizó polipropileno 03H82 con sus propiedades físicas el cual es un polipropileno de procesamiento uniforme, buen color y estable durante el proceso, bajo arrastre de agua, excelente estabilidad del material reprocesado, Este es un grado recomendado por el fabricante para diversas aplicaciones tanto de extrusión como de moldeo por inyección y carbonato de calcio Comai 707-5PS tiene una concentración de CaCO3 del 75% de elevada opacidad,

alta compatibilidad con el polipropileno, de excelente dispersión y baja abrasión, se puede dosificar entre el 2% al 15% basado en el peso del polipropileno comercial con la finalidad de obtener las especificaciones a las que se puede llegar sin que el saco pierda su funcionalidad de acuerdo al sector en el que va a ser utilizado [1].

2.1.2 Extrusora de polipropileno

El proceso de extrusión inicia colocando el polipropileno en una tolva de la que pasa a un cilindro de calefacción y a través del cual se empuja con la ayuda de un tornillo de alimentación. En el extremo opuesto del cilindro de calentamiento, se obliga al material (que se ha calentado y comprimido hasta formar una masa plástica), a pasar a través de una boquilla que da forma a la sección extruida. La extrusora se constituye básicamente de un cilindro hueco donde una o más roscas sin fin, en su interior, transportan el polímero hasta la salida de la boquilla. La tolva, acoplada a la parte trasera del cilindro, almacena y entrega materia prima (resina) y pigmentos, en forma de polvo o pellets a la zona de alimentación de la rosca [3].

2.2 Métodos

2.2.1 Estrategia de optimización

De las cinco fases existentes en la metodología six sigma, se realizó la estrategia de experimentación hasta la aplicación de diseños de experimentos de Taguchi proponiendo una optimización de la misma.

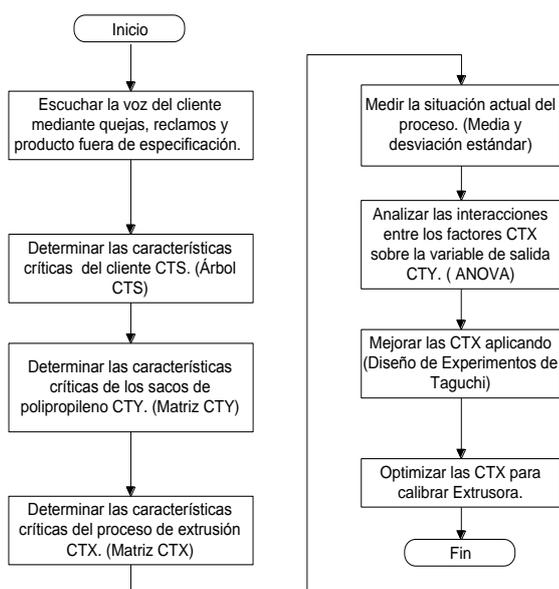


Figura 2. Optimización de la metodología Six Sigma

En la Fig.2, se observa la estrategia a seguir hasta optimizar las CTX en la extrusora de los sacos de polipropileno.

2.2.2 Voz del cliente

La información del cliente se obtuvo de manera reactiva por el sector en el que se efectuaron las ventas de acuerdo a las quejas y reclamos presentados por los mismos.

Tabla 2. Voz del cliente

Mes	Sector	Voz del cliente	Tipo de saco
Enero	Balanceados	Livianos	75gr60cm
Enero	Industriales	Filtra humedad	75gr60cm
		Rotura central y filtra humedad	75gr60cm
Marzo	Abonos	Falla impresión	75gr60cm
Abril	Harinero	Rotura lateral	75gr60cm
Mayo	Industriales	Rotura inferior	75gr60cm
Junio	Industriales	Rotura lateral	75gr60cm
Junio	Molinos	Falla impresión	75gr60cm
		Rotura inferior	75gr60cm
		Rotura lateral	75gr60cm

Por lo tanto, el foco de mejora se debe centrar en los procesos que originen las no conformidades en los sacos que mayor participación tienen en el mercado que son los de 60 cm de ancho, gramaje 75 y que a la vez dan lugar a los reclamos por defectos en rotura, ver tabla 2.

2.2.3 Determinar las características críticas del cliente (CTS)

Se evaluará los requisitos de los clientes para determinar sus CTS.

Tabla 3. Evaluación de los índices CTS

Requisito primario	Requisito secundario	ICC	GNC	Priori
Facilidad de manipulación y almacenaje	Facilidad para transportar con carga de producto	8.9	3	26.7
	Capacidad de mantener su forma dimensional al ser manipulado	8.7	9	78.3
	Facilidad para ser transportado en bandas	8.1	3	24.3
	Facilidad de apilamiento	8.5	3	25.5
Buena protección para conservar producto	Facilidad para conservar higiene	7.9	9	71.1
	Facilidad para resistir a roedores, insectos y bacterias	7.8	9	70.2
	Facilidad para el envasado del producto	7.5	9	67.5
	Excelente resistencia química	7.4	9	66.6
	Facilidad para resistir rasgaduras al estar en contacto con superficies ásperas	7.7	9	69.3
Facilidad para soportar caídas y que no pase el agua	Buena resistencia a la manipulación con producto envasado	8.8	9	79.2
	Facilidad para mantener un dimensionamiento adecuado	8.1	9	72.9
	Facilidad para resistir altas temperaturas	8	9	72
	Facilidad de obstaculizar la filtración de solventes	8.6	9	77.4
Impresión de calidad	Facilidad para ser coloreado	5.1	3	15.3
	Facilidad de realce de marca	5.9	9	53.1
	Facilidad de conservar la tinte en el tiempo	5.7	3	17.1
	Tintas biodegradables	5.5	3	16.5
Menor costo	Mayor durabilidad en el tiempo	6.9	9	62.1
	Facilidad para ser usado nuevamente	6.6	9	59.4
	Facilidad de encontrarse en el mercado	6.7	3	20.1
	Facilidad para ser livianos	6.8	9	61.2

Para la evaluación de los índices en la propuesta de mejora del árbol de las CTS, se diseñó la Tabla 3 para obtener valores de los requisitos primarios hasta los secundarios en conjunto con los técnicos de procesos y calidad para obtener la prioridad en la matriz.

IIC: Índice de importancia para el cliente (5-9).

5: Mínima importancia de requisitos para el cliente.

9: Elevada importancia de requisitos para el cliente.

GNC: Grado de no-conformidad (1, 3,9).

1: Bajo grado de no conformidad.

3: Mediano grado de no conformidad.

9: Alto grado de no conformidad.

2.2.4 Matriz CTY y CTX

La matriz CTY, indica la relación entre los requerimientos del cliente y las características en el saco de polipropileno.

Tabla 4. Matriz CTY

Prior. CTS	CTS Seleccionadas							Prior. CTY	
	1	2	3	4	5	6	7		
	Buena resistencia a la manipulación	Capacidad de mantener su forma	Facilidad de minimizar la filtración de solventes	Facilidad de resistir altas temperaturas	Facilidad de conservar higiene	Facilidad para ser utilizado nuevamente	Facilidad de realce de marca		
CTY	Elongación	9	9	3	3	3	9	3	138
	Tenacidad	9	9	9	3	1	9	3	146
	Dimensiones adecuadas	9	9	1	1	1	3	9	120
	Peso solicitado	9	9	9	3	3	3	3	120
	Buena impresión	1	1	1	9	1	1	9	116
	Denier	9	9	9	9	9	9	3	210
	Ancho de hilo	9	9	9	1	3	3	3	112

En la Tabla 4, se indica la interacción entre las CTS seleccionadas que afectan a las características de los sacos de polipropileno (CTY). Entre las características críticas CTY seleccionadas se encuentran el denier con un puntaje de 210, luego se encuentra la tenacidad con 146, la elongación con 138, dimensiones adecuadas y peso solicitado con 120 respectivamente, buena impresión 116 y finalmente ancho de hilo 112. Las CTY con mayor puntaje corresponden al proceso de extrusión en el cual se centrarán los esfuerzos de mejora para la satisfacción del cliente. Se van a considerar las tres CTY título del hilo, tenacidad y elongación que son las de mayor puntaje.

Tabla 5. Matriz CTX

Prior. CTY	CTS Seleccionadas	CTY Seleccionadas			Prior. CTX	
		1	2	3		
	Especificaciones	Denier	Tenacidad	Elongación		
CTX	% Carbonato en la mezcla	10 - 18%	9	9	9	54
	Presión del tornillo	MAX 160 bar	1	1	3	12
	Velocidad del tornillo	100 - 180 rpm	3	3	3	18
	Temperatura del tornillo	190 - 280 °C	1	9	9	46
	Temperatura del cabezal	MÁX 280 °C	1	9	9	46
	Temperatura de enfriamiento	20 - 50 °C	3	3	3	18
	Temperatura del horno	150 - 180 °C	3	9	9	48
	Relación de velocidad 2do y 3er trio (Contracción)	3-5%	3	9	9	48

En la Tabla 5, se indica las características críticas del proceso con los que se va a efectuar la corrida

experimental de Taguchi, las cuales son obtenidas mediante la matriz CTX según la metodología del despliegue simplificado de las características críticas. Para efectuar el diseño experimental se considera el % de carbonato en la mezcla, temperatura del horno, contracción que son las características de mayor puntaje.

2.2.5 Factores y niveles para el diseño experimental de Taguchi

Para el diseño experimental de Taguchi, se escogen los factores de la tabla 5 que se obtienen del análisis de la matriz de las características del proceso CTX, se analizará tres factores, cuatro interacciones y cuatro réplicas.

Tabla 6. Factores e interacciones escogidos para el diseño experimental L_8

Características del proceso de sacos de polipropileno (CTX) a experimentar		
Factor	A	% de carbonato en la mezcla
Factor	B	Temperatura del horno
Interacción	AxB	% de carbonato en la mezcla*Temperatura del horno
Factor	C	Contracción
Interacción	AxC	% de carbonato en la mezcla*Contracción
Interacción	BxC	Temperatura del horno*Contracción
Interacción	AxBXC	% de carbonato en la mezcla*Temperatura del horno*Contracción

En la Tabla 6, se indica los factores y las interacciones para el diseño experimental L_8 .

3. RESULTADOS

3.1 Creación del diseño L_8

La creación del diseño experimental se lo hace en el software minitab, el cual se encarga de aleatorizar el orden de las corridas que se van a realizar.

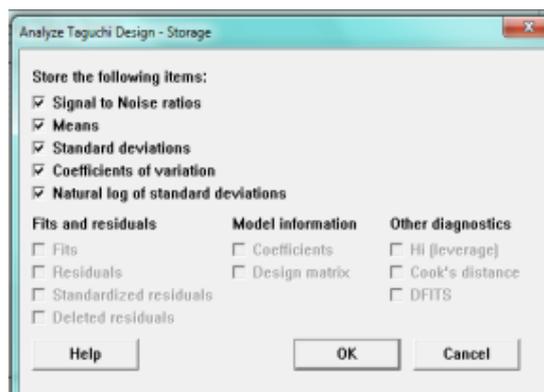


Figura 3. Generación de la señal de ruido y las medias del diseño L_8

En la Fig.3, se indica las opciones para generar los resultados del análisis del diseño experimental de acuerdo al tipo de señal que se escoge que influye sobre la CTY.

Tabla 7. Diseño experimental de Taguchi característica título del hilo

% Carbonato [10-18]%	Temp [150-180]°C	% Carb*Temp emp	r/V2/3 [4,03-5,1]	% Carb*r/V2/3	Temp Hornor	% Carb*Temp Hornor	%				SNRA1	LSTD1	STDE1	MEAN1	CV1
							R1	R2	R3	R4					
1	1	1	1	1	1	1	755	760	751	752	45,422	1,3966	4,0415	754,5	0,0054
1	1	1	2	2	2	2	755	744	740	735	38,832	2,1406	8,5049	743,5	0,0114
1	2	2	1	1	2	2	765	750	780	758	35,552	2,5446	12,738	763,25	0,0167
1	2	2	2	2	1	1	740	721	740	723	36,917	2,3441	10,424	731	0,0143
2	1	2	1	2	1	2	770	748	757	760	38,451	2,2049	9,0692	758,75	0,0120
2	1	2	2	1	2	1	748	740	756	745	40,945	1,9024	6,702	747,25	0,0090
2	2	1	1	2	2	1	780	775	755	756	35,498	2,555	12,871	766,5	0,0168
2	2	1	2	1	1	2	729	748	748	748	37,868	2,2513	9,5	743,25	0,0128

En la Tabla 7, se indica la estructura del diseño experimental de Taguchi con los datos que se ingresan al software representados por las réplicas R1, R2, R3 y R4 para la característica título del hilo. El índice señal de ruido (PSNRA1) es 45,422 que indica en donde la característica denier es menos susceptible a los efectos o variaciones del proceso originando un diseño robusto para esta característica. La media (PMEAN1) de las cuatro réplicas es 754,5 con una desviación estándar (PSTDE1) de 4,0415, aplicando el logaritmo de base 10 (PLSTD1) se obtiene 1,3966 y el coeficiente de variación (CV1) 0,0054, que es la variabilidad no explicada como porcentaje de la media.

Tabla 8. Diseño experimental de Taguchi característica tenacidad

% Carbonato [10-18]%	Temp [150-180]°C	% Carb*Temp emp	r/V2/3 [4,03-5,1]	% Carb*r/V2/3	Temp Hornor	% Carb*Temp Hornor	%				SNRA2	LSTD2	STDE2	MEAN2	CV2
							R1	R2	R3	R4					
1	1	1	1	1	1	1	5,3	4,8	4,1	4,9	19,60270	-0,69482	0,499166	4,775	0,104537
1	1	1	2	2	2	2	5	5,3	5,6	5,7	24,64420	-1,15129	0,316228	5,400	0,058561
1	2	2	1	1	2	2	5,6	5,7	5,9	5,9	31,70850	-1,89712	0,150000	5,775	0,025974
1	2	2	2	2	1	1	5,5	5	5,5	5,3	27,05530	-1,44269	0,236291	5,325	0,044374
2	1	2	1	2	1	2	6	6,1	5,8	5,8	31,93120	-1,89712	0,150000	5,925	0,025316
2	1	2	2	1	2	1	4,2	4	4,5	4,5	24,88430	-1,40671	0,244949	4,300	0,056965
2	2	1	1	2	2	1	5,6	5,5	5,3	5,7	30,19670	-1,76736	0,170783	5,525	0,030911
2	2	1	2	1	1	2	5,3	5,5	6	5,7	25,49740	-1,20862	0,298608	5,625	0,053086

En la Tabla 8, se indica la estructura del diseño experimental de Taguchi con los datos que se ingresan al software representados por las réplicas R1, R2, R3 y R4 para la característica tenacidad. El índice señal de ruido (PSNRA2) es 31,9312 que indica en donde la característica tenacidad es menos susceptible a los efectos o variaciones del proceso originando un diseño robusto para esta característica de hilo. La media (PMEAN2) de las cuatro corridas es 5,925 con una desviación estándar (PSTDE2) de 0,15, aplicando el logaritmo de base 10 (PLSTD2) se obtiene un valor de -1,89712 y el

coeficiente de variación (CV2) es 0,025316, que es la variabilidad no explicada como porcentaje de la media.

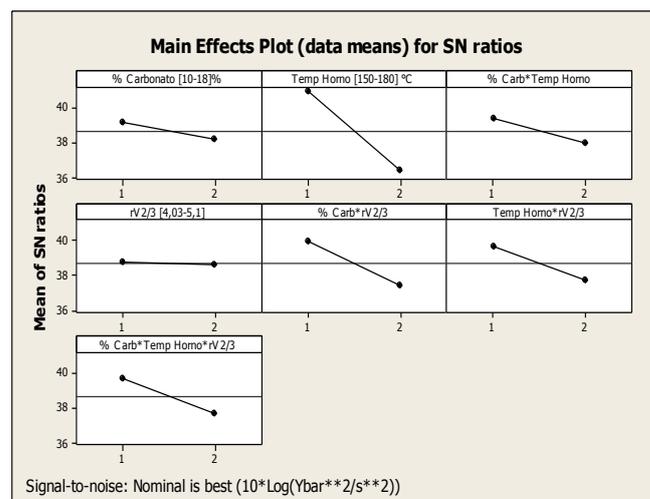
Tabla 9. Diseño experimental de Taguchi característica % elongación

% Carbonato [10-18]%	Temp [150-180]°C	% Carb*Temp emp	r/V2/3 [4,03-5,1]	% Carb*r/V2/3	Temp Hornor	% Carb*Temp Hornor	%				SNRA3	LSTD3	STDE3	MEAN3	CV3
							R1	R2	R3	R4					
1	1	1	1	1	1	1	24,1	24,8	23,7	26,1	27,8278	0,051804	1,05317	24,675	0,0426817
1	1	1	2	2	2	2	23,8	25,1	23,9	24,7	27,7324	-0,463381	0,62915	24,375	0,0258114
1	2	2	1	1	2	2	28,3	25,5	29,7	26,5	28,7428	0,62352	1,86548	27,503	0,0678296
1	2	2	2	2	1	1	28,1	24,9	30,6	25,1	28,5898	0,997747	2,71216	27,175	0,0998036
2	1	2	1	2	1	2	25,4	26,3	24,8	24,9	28,0726	-0,377511	0,68557	25,35	0,027044
2	1	2	2	1	2	1	25,6	26,7	27,2	26,5	28,4586	-0,402971	0,66833	26,5	0,02522
2	2	1	1	2	2	1	25,6	26,6	27,4	26,5	28,4655	-0,305784	0,73655	26,525	0,027768
2	2	1	2	1	1	2	22,6	23	24,9	25,2	27,5475	0,27382	1,31498	23,925	0,0549625

En la Tabla 9, se indica la estructura del diseño experimental de Taguchi con los datos que se ingresan al software Minitab, representados por las réplicas R1, R2, R3 y R4 para la característica % elongación. El índice señal de ruido (PSNRA3) es 28,7428 que indica en donde la característica elongación es menos susceptible a los efectos o variaciones del proceso originando un diseño robusto para esta característica de hilo. La media (PMEAN3) de las cuatro réplicas o corridas es 27,5025% con una desviación estándar (PSTDE3) de 1,86548, aplicando el logaritmo de base 10 (PLSTD3) se obtiene un valor de 0,62352 y el coeficiente de variación (CV3) es 0,0678296, que es la variabilidad no explicada como porcentaje de la media.

3.2 Diseño por señal de ruido (SN)

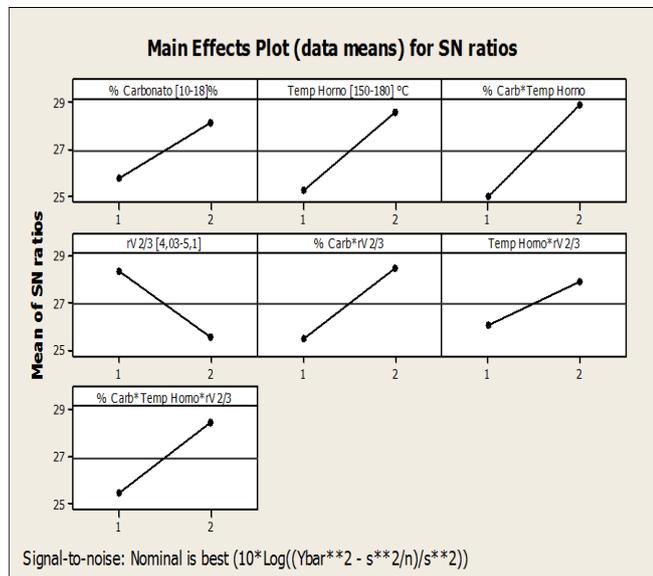
Tabla 10. Efectos principales para señal de ruido, título del hilo



En la Tabla 10, la temperatura del horno es la característica que produce la mayor variabilidad se ajusta en su nivel (1) a 150 °C, % de carbonato en el nivel (1) a 10% y relación

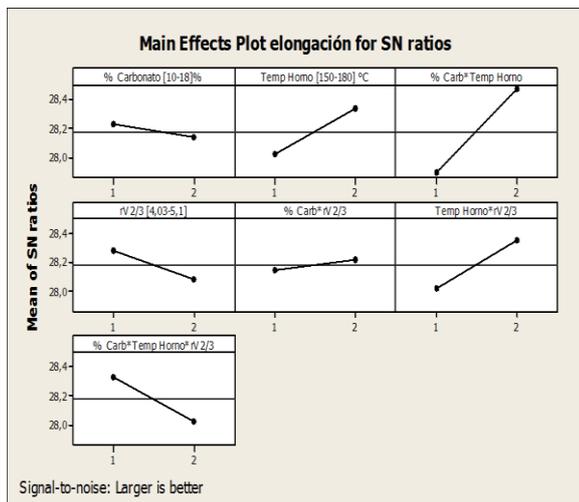
de velocidades de los cilindros dos respecto al tres en su nivel (1).

Tabla 11. Efectos principales para señal de ruido, tenacidad



En la Tabla 11, se indica que la temperatura del horno ocasiona la variabilidad de mayor impacto en la tenacidad, por lo que se la debe ajustar en el nivel (2) a 180 °C. El porcentaje de carbonato se le ajustará en el nivel (2) en 18% y la relación de velocidades del cilindro dos y tres en el nivel (1) a 4,03.

Tabla 12. Efectos principales para señal de ruido, % elongación



Por otro lado en la Tabla 12, la característica que origina la variabilidad del proceso es la temperatura del horno por tal motivo se debe diseñar para hacerlo robusto en (2) a 180 °C, el % carbonato en (1) al 10%, y la relación de velocidades de los cilindros dos respecto al tres en (1) a 4,03.

3.3 Parámetros óptimos de calibración

Una vez que se han identificado las CTX que originan la variabilidad en las CTY se procede a optimizar los niveles en los que se debe calibrar la extrusora en lo que respecta al % de carbonato, temperatura del horno y relación de velocidades de los cilindros dos respecto al tres. Se utiliza Minitab 16 para optimizar las variables.

Tabla 13. Diseño robusto para las tres características de los sacos (CTY)

DISEÑO ROBUSTO CON MINITAB 16

SN Ratio	Mean	StDev	Log(StDev)
40,9452	747,25	6,70199	1,9024
24,8843	4,3	0,244949	-1,40671
28,4586	26,5	0,668331	-0,402971

Factor levels for predictions

% Carbonato [10-18]%	Temperatura homo [150-180] °C	% Carb*Temp homo	rvelocidades [4,03-5,1]	% Carb*rveloc	Temp homo*rveloc	Temp homo*% Carb*%
2	1	2	2	1	2	1

La aplicación de la metodología de diseño de experimentos de Taguchi, hace posible encontrar los óptimos de proceso para proceder a calibrar la extrusora en el nivel (2) en porcentaje de carbonato de calcio (18%), en el nivel (1) la calibración de la temperatura del horno (150°C) y en el nivel (2) la relación de velocidades de los cilindros dos respecto al tres (5,1). Con la propuesta de calibración se puede obtener el título de hilo de 750 denier ± 3%, una tenacidad esperada de 4,3 gr/denier y una elongación esperada de 26,5%. Con lo que se lograría un saco de polipropileno robusto a los imprevistos o señales de ruido en sus procesos de fabricación y en su vida de servicio, como se indica en la Tabla 13.

4. CONCLUSIONES

En la planta de extrusión de sacos de polipropileno se detectó que las características de proceso (CTX) que impactan en la fabricación de sacos de polipropileno son la temperatura del horno, el porcentaje de carbonato y la relación de velocidades de los cilindros dos respecto al tres de la extrusora. Las características de los sacos de polipropileno (CTY) que determinan el funcionamiento para la industria requerida son denotadas por la tenacidad, el porcentaje de elongación del hilo y el título del hilo. El desempeño funcional de los sacos de polipropileno está determinado por la optimización de las características críticas del proceso de acuerdo a las condiciones reales de operación, a estas condiciones se procede a efectuar interacciones entre las características del proceso (CTX)

para obtener un proceso robusto con el que se logre que las características críticas del saco de polipropileno (CTY) durante el tiempo de servicio respondan favorablemente a las condiciones de funcionamiento a las que son sometidas, logrando de esta manera un diseño robusto.

La aplicación de la metodología de diseño de experimentos de Taguchi, hace posible encontrar los óptimos de proceso para proceder a calibrar la extrusora en el nivel (2) en porcentaje de carbonato de calcio (18%), en el nivel (1) la calibración de la temperatura del horno (150°C) y en el nivel (2) la relación de velocidades de los cilindros dos respecto al tres (5,1). Con la propuesta de calibración se puede obtener el título de hilo de 750 denier \pm 3%, una tenacidad esperada de 4,3 gr/denier y una elongación esperada de 26,5% con lo que se lograría un saco de polipropileno robusto a los imprevistos o señales de ruido en sus procesos de fabricación y en su vida de servicio.

REFERENCIAS

- [1] *Hoja técnica Carbonato*, Comai, Referencia Comaster, 2010.
- [2] S.Glent, "*Taguchi Methods*", Addison-Wesley Publishing Company, 3rd ed., 1993.
- [3] J.Lopez. (2010, julio 2). Available: <http://www.slideshare.net/JorgeLopez87/extrusora>.
- [4] D. Montgomery, "*Diseño y Análisis de Experimentos*", 3rd ed. Ed. Iberoamericana, 1993.
- [5] *Los cuatro abordajes sistémicos para la excelencia empresarial*, QualiplusASI Brasil, 2005.
- [6] G. Salvendy, "*Handbook of Industrial Engineering*", 3rd ed. Ed. Wiley-Interscience, EEUU, 2001.