

Método Taguchi para mejorar la resistencia del papel kraft para cajas. Un ejercicio práctico

Genaro Horacio Chávez Sánchez

Tecnológico Nacional de México campus Cd. Cuauhtémoc, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Avenida Tecnológico #137, Cd. Cuauhtemoc, Chih, C.P. 31500

Resumen

El proceso de fabricación de papel involucra diversos sistemas mecánicos, electrónicos, químicos y operativos para lograr costo y calidad acorde a las especificaciones del cliente.

Debido a la variabilidad de la materia prima para los papeles kraft café, la cual se compone de cajas que son llevadas a centros de acopio para reciclaje, este proceso de fabricación representa retos especiales en su operación.

Dichas cajas contendrán productos y deben de poder apilarse para transporte y almacenamiento. Por esta razón se necesita una resistencia al aplastamiento con valores cuantificables, repetibles y propios de cada tipo de caja, de acuerdo a lo que van a almacenar.

Este experimento es un desarrollo real del proceso de manufactura de papel, donde se desea conocer el efecto que tienen las variables sobre una característica específica del papel, modificando los niveles de cada variable a valores que indiquen si la característica es relevante o no.

Abstract

The papermaking process involves several systems, either mechanical, electronic, chemical and operative, to achieve good cost and quality according to customers specifications.

Due to the raw stock quality variability for brown kraft paper, which is made out of boxes that are taken to recycling centers, the papermaking process presents special challenges during its production.

This particular case deals with improving brown paper quality, with the variable named ring crush. This particular variable is one of the most important paper qualities to make a box.

Such boxes will contain products inside them and must be able to pile on top of each other for transport and storage. For this reason there is a need for a ring crush strength with values that are quantifiable, repeatable and right according to each type and size of box, depending to what is going to be stored in them.

This experiment is a real development in a papermaking process, where there is a need to know the effect that the variables (or factors) have over an specific paper variable, modifying the levels of each variable to values that will indicate if such strength is affected by such variable.

Palabras claves: cartón, resistencia, aplastamiento, Taguchi, kraft.

Keywords: paperboard, ring, crush, Taguchi, kraft.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando compramos algún artículo como un televisor, o compramos algún alimento crudo o procesado, estos vienen normalmente empacados para su protección durante el transporte, almacenamiento o entrega en casa, en una caja de cartón.

Esta protección a los productos comienza con la fabricación del papel con el cual las cajas son hechas. Una caja típica se fabrica con 3 capas de papel: una interior, otra intermedia y una exterior.

Cada capa de papel está diseñada con características específicas de resistencia para que al ser pegadas todas y hechas cajas, estas tengan la capacidad de soportar los productos que irán en su interior, así como también las estibas que pudiera tener como parte del almacenamiento.

En una fábrica de papel para cartón se procesa normalmente cartón 100% reciclado. Esto representa retos muy importantes para producir un buen papel para cajas.

Dado que el cartón puede venir de procesos anteriores sucesivos de fabricación de papel, este ya viene degradado y sus fibras celulósicas son cada vez más pequeñas, por los cortes y degradaciones que ha sufrido en sus ciclos de trabajo. Adicionalmente, se han agregado tintas para publicidad, gomas para pegar las cajas, grapas, cintas y todo lo que se requiera para hacer cajas.

De igual forma, estas cajas, una vez que fueron utilizadas, recorren un camino interesante: se depositan en un bote de basura o contenedor con diversos productos, como restos orgánicos, basura, plásticos. De allí son recogidas por pepenadores o personas que las recogen para venderlas como cartón a empresas recolectoras, las cuales las venden a las fábricas de papel café. Estos cartones llegan a una fábrica de papel con menos impurezas, sin embargo, son parte de la materia prima y esta debe depurarse.

Una vez limpiado y depurado el cartón, se comienza a mezclar nuevamente con productos químicos para mejorar sus características. También es ayudado por medios mecánicos para orientar mejor las fibras e incrementar la resistencia natural de las fibras celulósicas que tiene.

Dado que se requieren muchos procesos mecánicos y químicos para hacer un buen papel, se decidió realizar un Diseño de Experimentos mediante el método Taguchi para determinar qué variables impactan más en la resistencia del papel. También hay variables que no lo hacen y otras que pueden afectar.

Para fabricar papel se desfibran los cartones en un molino de gran capacidad, típicamente de 40 a 100 ton de volumen, mezclándolo con agua. Esta mezcla desfibrada se bombea hacia etapas de depuración y limpieza para eliminar contaminantes. Una vez que las fibras de los cartones son limpiadas, éstas se almacenan en tanques, todo en un proceso continuo, para luego llevarse a una etapa donde las fibras son talladas o refinadas unas contra otras para incrementar su resistencia al ampliar su área de contacto por el proceso de refinación.

Conforme se avanza en el proceso de fabricación, se van agregando químicos para mejorar la capacidad de la mezcla fibrosa de seguir unida, tanto por métodos mecánicos, como por métodos químicos. Una vez depositada esta mezcla fibrosa en una mesa transportadora especial, se comienza el proceso de eliminar el agua, mediante métodos de gravedad, vacío, prensado y finalmente secado mediante cilindros calentados con vapor en su interior. El proceso de secado lleva de 40 a 90 segundos, desde un nivel de 99 % de agua hasta solamente 6%.

Una fábrica de papel es un proceso productivo continuo, de manera que los experimentos deben de reducirse al mínimo, pues si el papel queda fuera de especificación, el experimento se convierte en algo muy costoso. Esta fábrica de papel opera a una tasa de producción de 25 ton/hora, lo que hace más costoso una falla o desviación de calidad.

El método Taguchi busca solucionar esto, disminuyendo el número de experimentos para minimizar el tiempo y el costo de las pruebas. Cada fábrica de papel tiene sus propias configuraciones, sus propios retos, de manera que este Taguchi ayuda a esta fábrica de forma específica para buscar la mejor combinación de variables de

proceso que logren un papel más resistente. A su vez, se espera que esta metodología pueda ser referencia para otras fábricas de papel en experimentar para mejorar sus procesos específicos y sus propias carencias.

ANÁLISIS TEÓRICO

Se desea realizar un experimento en donde se utilice el método Taguchi para ejemplificar su utilidad y su facilidad de realizarse. Este experimento debe ser suficientemente práctico para que sirva de modelo en otros procesos de cualquier industria, y suficientemente robusto para que ofrezca resultados reales y tangibles para mejorar los procesos con los que se estén trabajando.

Para esto, se diseñó un experimento de tipo ortogonal L8 de 7 factores y 2 niveles en donde se balancea el diseño, para que los niveles de los factores se ponderen equitativamente y se pueda tener un resultado claro, sea exitoso o no.

El Diseño de experimentos tuvo su inicio teórico a partir de 1935 por Sir Ronald A. Fisher, quien sentó la base de la teoría del *Diseño experimental* [1]. Actualmente las aplicaciones son múltiples, especialmente en la investigación de las ciencias naturales, ingeniería, laboratorios y casi todas las ramas de las ciencias sociales.

Para optimizar procesos de fabricación, es necesario conocer que variables consideramos influyen significativamente en dicho proceso y como afectan su desempeño. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando.

La capacidad de experimentar está limitada por el coste en tiempo y en recursos (personal, productos de partida, etc.). Por tanto, una organización óptima de la experimentación deberá contemplar el menor número de experimentos que permita obtener la información buscada [2].

¿QUÉ ES UN EXPERIMENTO ORTOGONAL?

Los sistemas ortogonales fueron adoptados por el Dr. Genichi Taguchi para el diseño de experimentos [3]. Los orígenes de estos sistemas se remontan a 1897 cuando el matemático Jacques Hadamard los inventó [4].

El nombre de experimento ortogonal viene de su forma de arreglo matricial. Típicamente se identifican como L₈, significando un arreglo de 8 corridas.

La metodología Taguchi enfatiza que el diseño sea *robusto*, para que el experimento sea óptimo. Busca *minimizar* la pérdida económica durante la prueba al eliminar condiciones que no sean óptimas durante la corrida [5].

PLANEACIÓN DE UN EXPERIMENTO

Paso 1. Definición del Problema

Dado que la resistencia al aplastamiento en el papel es la variable más importante en el mercado nacional para hacer cajas y vender papel, se realizó el experimento para subir la resistencia incorporando diferentes condiciones del proceso, algunas agregando o modificando químicos, otras modificando las variables de operación del proceso.

Paso 2. Planteamiento del problema y objetivo

El objetivo de este experimento es encontrar la mejor combinación de variable o variables para mejorar la resistencia al aplastamiento del papel, de acuerdo a las variables que se tienen disponibles al momento de realizar el experimento.

La resistencia al aplastamiento se mide en lb/in, así que la variable de respuesta será la resistencia al aplastamiento, cuya lectura se realiza al finalizar el proceso de fabricación de papel mediante un aparato llamado Probador de Ring Crush. Se requieren definir todas las condiciones de la prueba, desde el proceso hasta el uso del equipo de medición, para evitar que los resultados de nuestro DoE sean inválidos.

También deben identificarse los factores de prueba que influyen en la resistencia del papel. Para este experimento se seleccionaron los siguientes factores:

1. Químico para modificar la carga eléctrica del proceso.
2. Apertura del labio horizontal para ajuste de flujo de pasta.
3. Grado de tratamiento de las fibras mediante equipo de refinación krima.
4. Ajuste de sistema de refinación de fibras.
5. Ajuste de relación de la apertura de los dispositivos de flujo de pasta.
6. Relación velocidad del chorro de pasta y velocidad de la tela formadora.
7. Agregado de carbonato de calcio al papel.

Paso 3. Instrucciones de manejo de los factores

Para este experimento se acondicionó la máquina de papel para que sus condiciones de operación fueran estables antes de comenzar con el experimento.

Se llenaron los tanques de fibra celulósica.

Se llenaron los tanques de agua.

El sistema de secado de la máquina se puso temperatura de operación durante 2 horas para evitar choques térmicos, ya que la máquina de papel había estado parada durante 6 horas para realizar mantenimiento preventivo en diversas partes de la misma.

Se puso a operar la máquina a velocidad nominal (970 m/min).

Se acondicionaron los fieltros del sistema de prensas para que estén en preparados para operar correctamente.

Se comenzó a operar la máquina para fabricar papel en condiciones normales de operación. Al lograr esto, con el ajuste de químicos y sistemas de prensado y secado, se establece el punto de calidad inicial del proceso estándar.

Una vez que se alcanza la especificación del papel, se le considerará el inicio del experimento.

Paso 4. Elección de los factores y los niveles

	Factor	Unidad de Medición	Nivel	
			1	2
A	Demanda catiónica	Kg/ton	1.5	0.5
B	Apertura del labio	mm	17	18
C	Dispensor Krima	Kg/ton	4	0
D	Refinación	freeness	400	300
E	Relación L/B	sin unidad	0.7	0.8
F	Relación chorro/tela	sin unidad	0.98	1.024
G	Carbonato de calcio	kg/ton	sin	50

Tabla 1. Variables seleccionadas del proceso para el DoE

DEFINICIONES QUE EXPLICAN POR QUÉ SE SELECCIONARON ESTAS VARIABLES:

Demanda Catiónica: es la carga eléctrica de la mezcla fibrosa, agua y químicos. Esto significa exceso de electrones, y se debe encontrar un balance eléctrico para que las reacciones químicas del proceso sean eficientes.

Apertura del Labio: Para formar la hoja de papel, toda la mezcla fibrosa se pasa a través de una caja especial presurizada la cual tiene una apertura de lo ancho de la máquina de papel y de hasta 30 mm de alto, por la cual sale la pasta y se comienza a formar la hoja. Esta presión y fibras ayudan a formar una hoja de buena calidad.

Dispensador krima: Prensa especial para secar la pasta desde 5% hasta 30% y a la vez lograr tratar las fibras para subir su resistencia.

Refinación: sistema mecánico donde se incrementa la resistencia de las fibras al hacerlas pasar entre dos platinas metálicas especiales.

Relación L/B: relación especial de apertura del labio de la caja de entrada y su posición hacia adelante.

Relación chorro/tela: La pasta sale a una velocidad calculada de acuerdo a la presión que hay en la caja, y cae sobre una malla formadora, en donde esta gira a una velocidad preestablecida. Esta relación de velocidades ayuda formar la hoja.

Carbonato de calcio: mineral que ayuda en opacidad del papel y baja costo, pero hace perder resistencia.

Estos valores fueron seleccionados por un equipo multidisciplinario de producción, control de procesos y mantenimiento para que fueran los factores y niveles a analizar.

Para los factores anteriores se realiza la combinación de cada nivel obteniendo la siguiente tabla, que nos dará el número de condiciones o pruebas a correr en la máquina de papel.

Para cada condición se correrán 3 bobinas completas a excepción de la condición 5 que necesitaremos por lo menos 4 bobinas por ser el cambio de condición más lento de observar en el proceso.

Se obtendrán solo 3 datos de cada una de las corridas, sin embargo, esas tres bobinas representan casi 2 horas de proceso y 40 tons de papel, de manera que es la opción menos costosa de probar y tener datos que puedan ofrecer un resultado medible.

Condición	Coagulante	Labio	Krima	Refinación	Relación L/B	Rel chorro/tela	Carbonato
1	1.5	17	4	400	0.7	0.98	sin
2	1.5	17	0	300	0.8	1.024	50
3	1.5	18	0	400	0.7	1.024	50
4	1.5	18	0	300	0.8	0.98	sin
5	0.5	17	0	400	0.8	0.98	50
6	0.5	17	0	300	0.7	1.024	sin
7	0.5	18	4	400	0.8	1.024	sin
8	0.5	18	4	300	0.7	0.98	50

Tabla 2. Combinaciones desarrolladas para las 8 corridas del experimento.

Los datos obtenidos del ring crush nos ayudarán a valorar aquellos factores que impactan mayormente de forma positiva o de negativa en dicha característica.

Paso 5. Selección de la variable de respuesta

Para determinar el valor del aplastamiento del papel, o ring crush, y su medición sea constante y válida, se realiza en un laboratorio con condiciones de temperatura y humedad controladas [6], con 50% +/- 1% de humedad relativa y 23% +/- 1% de temperatura, para poder acondicionar el papel y asegurar que las condiciones ambientales de medición son constantes. El equipo de medición electrónico permanece encendido de forma continua para mantener su temperatura de operación estable.

Paso 6. Diseño del experimento

La prueba se corre durante 3 días, para completar a realizar las 3 bobinas por cada corrida. Se acordó realizar pruebas solo durante el día. Por la noche la máquina opera en condiciones normales, sin hacer ajustes para pruebas, solo para mantener el papel en especificación, reanudando las pruebas al siguiente día.

RESULTADOS OBTENIDOS

Resultados	Demanda catiónica		Apertura del labio		Krima	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
1	42		42		42	
2	36		36		36	
3	39			39		39
4	42			42		42
5		41.5	41.5			41.5
6		43.5	43.5			43.5
7		38.5		38.5	38.5	
8		41		41	41	

Tabla 3.1. Resultados de las corridas de papel. Primeras 3 variables.

Refinación		Relación L/B		Relación chorro/tela		Carbonato de calcio	
D1	D2	E1	E2	F1	F2	G1	G2
42		42		42		42	
	36		36		36		36
39		39		42	39	42	39
	42		42	41.5		43.5	41.5
41.5		43.5	41.5			38.5	
	43.5			41	43.5		41
41		41	38		38.5		
	41						

Tabla 3.2. Resultados de las corridas de papel. Las 4 últimas variables.

Estos son los resultados obtenidos de las corridas, de todas las bobinas:

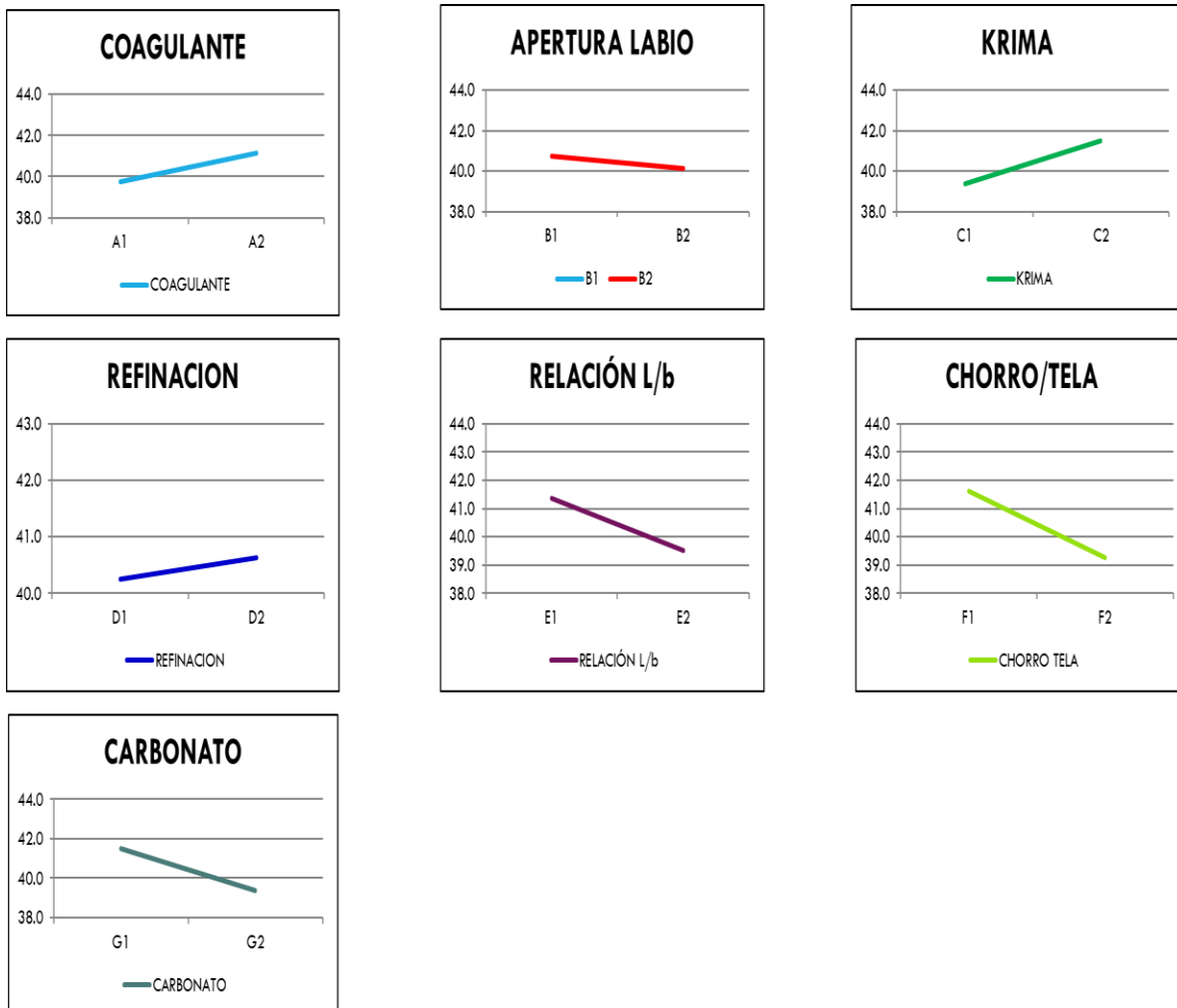
Condición	Bobina	Ring crush	Promedio
1	210	38.7	
1	211	45	42
1	212	42	
2	213	38	
2	215	36	36
2	216	36	
3	217	37	
3	218	39	39
3	219	39	
4	430	43	
4	433	42	42
4	435	41	
5	227	40	
5	228	44	
5	229	41	41.5
5	304	42	
6	425	43	

6	426	43	43.5
6	428	44	
7	419	39	
7	420	39	38.5
7	421	38	
8	422	40	
8	423	41	41
8	424	41	

Tabla 4. Resultados obtenidos de ring crush para cada bobina en la corrida del método Taguchi.

En la corrida 5 se hicieron 4 bobinas por la hora y la necesidad de fabricar una bobina adicional para un cliente.

Adicionalmente se genera gráficas para ver de forma visual las interacciones entre los diferentes niveles de cada factor.



Gráfica 1. Resultados gráficos del comportamiento de la variable con respecto al ring crush.

Tenemos 4 variables cuya pendiente es más pronunciada, representado un cambio mayor entre los niveles del factor:

1. Krima, nivel C2
2. Relación L/B, nivel B1
3. Chorro/tela, nivel F1
4. Carbonato, nivel G1

Esto nos lleva a tener la mejor combinación de variables del experimento. Las celdas marcadas en verde son la combinación más adecuada para este experimento, y que pueda producir mejores resultados.

			Nivel	
	Factor	Unidad de medición	1	2
A	Demanda catiónica	Kg/ton	1.5	0.5
B	Apertura del labio	mm	17	18
C	Dispensor Krima	Kg/ton	4	0
D	Refinación	freeness	400	300
E	Relación L/B	sin unidad	0.7	0.8
F	Relación chorro/tela	sin unidad	0.98	1.024
G	Carbonato de calcio	kg/ton	sin	50

Tabla 5. Mejor combinación de factores y niveles del experimento.

CONCLUSIONES

Con la información obtenida de este experimento, se sientan las bases para desarrollar una siguiente prueba en la máquina de papel con los niveles de los factores que ofrecieron la mejor combinación para incrementar la resistencia al aplastamiento en el papel.

El dispersor no fue necesario, ya que desarrolla la fibra para una característica diferente de la resistencia buscada y le afectó.

La refinación validó que esta desarrolla la resistencia del papel, así como no usar carbonato de calcio, el cual es polvo y siempre reduce la resistencia.

El ajuste L/B ayudó a encontrar una relación mejor que la tradicional para un papel sin requerimiento de resistencia.

Tal vez esta combinación siga no siendo la óptima y se deba considerar que el resultado obtenido pueda ser mejorable y halla que incorporar otras variables que sean relevantes para el desempeño del resultado.

REFERENCIAS:

- [1] Fisher, Ronald A. (1971), The Design of Experiments, New York, Hafner Publishing Company.
- [2] Ferré J. y Rius X. (2002), Introducción al Diseño Estadístico de Experimentos, Universitat Rovira, Tarragona
- [3] Taguchi, G. (1984); "Introduction to Quality Engineering-Taguchi Methods"; American Supplier Institute, Inc.; Romulus, MI
- [4] K. Krishnaiah, (2012) Applied Design of Experiments and Taguchi Methods, PHI Learning Private Limited, India
- [5] Kavanaugh, C.F., Los diseños de Taguchi contra los diseños clásicos de experimentos. Conciencia Tecnológica [en línea]. 2002, (19), [fecha de Consulta 6 de Octubre de 2019]. ISSN: 1405-5597.
Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94401906>
- [6] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1950). *T.A.P.P.I. standards: Testing methods, recommended practices, specifications of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, T-402, New York,
- [7] Gutiérrez P.H.y De la Vara, R.(2012). Análisis y diseño de experimentos, 3ra, Edición, Mc Graw Hill, México.
- [8] Dean, A. y Voss, D. (2013). *Design and Analysis of Experiments*, 2da Edition Springer-Verlag, Nueva York
- [9] Montgomery D.C. (2019). *Design and Analysis of Experiments*. 10ª. Ed. John Wiley & Sons, USA.
- [10] González, M, Diseño de experimentos Robusto (Taguchi), Universidad Politécnica Tlaxcala.

Correo electrónico autor: hochavez@gmail.com