

MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE POLEAS PARA HORNOS ROTATORIOS: UN ENFOQUE DESDE EL DISEÑO EXPERIMENTAL

Enhancing the process of manufacture of rotatory oven`s pulleys: an approach from experimental design

RESUMEN

En el presente estudio, se utilizaron las técnicas del diseño experimental para mejorar el proceso de manufactura de poleas usadas en la fabricación de hornos rotatorios. Esto, con el objetivo de identificar los factores y las posibles interacciones que pudieran afectar significativamente el buen desempeño de las tareas de producción. Para minimizar los costos de experimentación y maximizar el uso de la información obtenida en la toma de datos, se hizo uso de un diseño factorial 2k no replicado, inicialmente con cinco factores, el cual fue proyectado a un diseño factorial 2k con tres factores y cuatro réplicas. La variable respuesta es el porcentaje de piezas defectuosas resultante en cada una de las corridas experimentales. Después del análisis de los datos, se obtuvo como resultado que solamente dos de los factores principales son significativos para este proceso; estos son el operario y tipo de herramienta utilizada (buril). Al hacer el análisis de los residuales para verificar el cumplimiento de los supuestos, resultó que el modelo es válido. Con los resultados obtenidos se hicieron recomendaciones prácticas a la empresa INDUSTRIAS GHERSON'S Ltda. para que mejoraran su proceso y disminuyeran el porcentaje de piezas defectuosas y los costos de fabricación (alrededor de \$1'500.000/mes).

PALABRAS CLAVES: Estadística, diseño de experimentos, diseños factoriales 2k, proyección del diseño, mejoramiento de procesos.

ABSTRACT

In the present study, the techniques of the experimental design were used to try to improve the process of manufacture of pulleys used in the production of rotatory ovens. This, with the aim of identifying the factors and their possible interactions among them, that they could significantly affect the good performance of the production tasks. In order to diminish the experimentation costs and maximizing the use of the information collected in the data's taking process, a 2k factorial design was used without replicates, initially with five factors and then the same experiment with three factors and four replicates. The variable answer was the defective percentage of pieces resultant in each one of the experimental runs. After the analysis of the data, it was obtained like result that only two of the main factors are significant for this process; these are the worker and the type of tool (burin) used. Doing the residual's analysis to verify the fulfillment of the assumptions, indicates that the model is valid. With the obtained results, we gave practical recommendations to the company INDUSTRIAS GHERSON'S Ltda., to enhance their process and diminish the defective percentage of pieces and the production's costs (around \$1'500.000/month).

KEYWORDS: Statistics, experimental design, 2k factorial designs, design projection, improving processes.

1. INTRODUCCIÓN

INDUSTRIAS GHERSON'S Ltda. se dedica a la fabricación de Hornos Rotatorios Industriales para el sector panadero. Esta empresa, se encuentra ubicada en el municipio de Itagüí en la Calle 86 N° 48-95.

Se detectó falencias en el proceso de fabricación de las poleas, las cuales son un componente vital para el buen funcionamiento de los hornos. El problema radica en inconsistencias en las dimensiones de la cavidad de la polea (ver Figura 1.) en donde se posiciona la banda, lo

**ALEXANDER ALBERTO
CORREA ESPINAL**
Ingeniero Industrial, Ph. D
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia
alcorrea@unalmed.edu.co

**PEDRO DANIEL MEDINA
VARELA**
Ingeniero Mecánico, Ms.C
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
pemedin@utp.edu.co

**SEBASTIAN VELEZ
JARAMILLO**
Estudiante Ingeniería Industrial
Universidad Nacional de Colombia
svelez@unalmed.edu.co

que perjudica el funcionamiento de los hornos debido a roturas o descarrilamientos de la misma, bien sea porque queda por encima del nivel nominal o por debajo del mismo.



Figura 1. Poleas

Además de lo anterior, se está presentando un 30% de piezas que deben ser reprocesadas y un 7% de desperdicios de materia prima, lo que repercute en los costos globales de la compañía y en el cumplimiento con sus clientes tanto internos como externos.

Para dar solución a dicho problema, se usaron las técnicas del diseño experimental para plantear un modelo que permitiera llevar a cabo una exploración de los factores significativamente influyentes en la variable respuesta, la cual es el porcentaje de piezas defectuosas y con ésto, llegar a tener un proceso con variabilidad reducida y conformidad más cercana con los requerimientos nominales o proyectados, dando cumplimiento a los programas de control de calidad y garantizando el buen funcionamiento del producto final comercializado. El modelo más adecuado, por razones de costos en la experimentación y de desconocimiento de los factores realmente influyentes en el proceso es un diseño factorial 2^k con $k = 5$ factores.

2. MARCO TEORICO

El diseño factorial 2^k es un diseño con K factores que tienen 2 niveles cada uno. El modelo para un diseño estadístico 2^k incluye k efectos principales, $\binom{k}{2}$ interacciones de dos factores, $\binom{k}{3}$ interacciones de tres factores, ..., y una interacción de k factores, es decir, en un diseño 2^k el modelo completo contiene $2^k - 1$ efectos.

El enfoque general para el análisis estadístico de un diseño 2^k , según [6], es : (1) estimar los efectos de los factores, (2) formar el modelo inicial, (3) realizar las pruebas estadísticas, (4) refinar el modelo, (5) analizar los residuales, y (6) interpretar los resultados. El primer paso es estimar el efecto de los factores, examinar sus signos y magnitudes; de este modo el experimentador obtiene información preliminar respecto de los factores y las interacciones que pueden ser importantes y en qué direcciones deberán ajustarse éstos para mejorar la respuesta. Para formar el modelo inicial del experimento,

por lo general se elige el modelo completo, es decir, todos los efectos principales y las interacciones, siempre que se haya hecho por lo menos una réplica de cada una de las combinaciones de los factores involucrados. Después, en el paso (3), se usa el análisis de varianza (ANOVA) para probar formalmente la significancia de los elementos principales y las interacciones, siempre y cuando existan por lo menos 2 observaciones (réplicas) por corrida experimental, de lo contrario, se debe hacer el análisis mediante el método de Daniel [3], el cual plantea examinar un gráfico de probabilidad normal de las estimaciones de los efectos, en el cual los efectos significativos se sitúan por fuera de la línea recta que denota la tendencia. El paso cuatro, consiste en refinar el modelo y suele consistir en la eliminación de las variables no significativas del modelo completo. El paso cinco, es el análisis residual usual para verificar la adecuación final del modelo y los supuestos. En ocasiones, la etapa de refinación del modelo se llevará a cabo después de efectuar el análisis residual, al presentar éste, serias violaciones a los supuestos. El último paso, consiste generalmente en el análisis gráfico: gráficas de los efectos principales y las interacciones, superficie de respuesta o gráficas de contorno. [6]

Incluso para un número moderado de factores, el número total de combinaciones de tratamientos en un diseño factorial 2^k es grande. Debido a que por lo general los recursos son limitados, el experimentador, puede efectuar únicamente una sola réplica del diseño, a menos que esté dispuesto a omitir algunos de los factores originales [1] y [5]. El riesgo que ello implica, es que el modelo puede ajustarse al ruido, es decir, si la respuesta es sumamente variable pueden resultar conclusiones engañosas del experimento. Una forma de asegurarse de que se obtienen estimaciones confiables de los efectos es incrementando las distancias entre los niveles alto y bajo del factor. El uso de la estrategia de una sola réplica es común en los experimentos de exploración cuando hay un número relativamente grande de factores bajo consideración. Una buena práctica en este tipo de experimentos es separar los niveles de los factores de manera agresiva. Una sola réplica de un diseño 2^k , en ocasiones es denominado diseño factorial no replicado, en el cual, no se cuenta con ninguna estimación interna del error o error puro. [6]

Como se planteó anteriormente, el método de Daniel, [3], resuelve este problema, por lo tanto el modelo preliminar se especificará de tal modo que tenga aquellos efectos que aparentemente son diferentes de cero con base en la gráfica de probabilidad normal. Aquéllos aparentemente insignificantes, se combinan como una estimación del error.

En el diseño factorial 2^k replicado, deberán aplicarse las verificaciones de diagnóstico usuales a los residuales, haciendo uso de la ecuación de regresión múltiple que incluye los factores y las interacciones que resultaron significativas en análisis previos, y que en definitiva se

constituye como la ecuación generadora de la superficie de respuesta [5].

Cuando se tiene un diseño factorial 2^k no replicado y después de llevar a cabo el análisis de la gráfica de probabilidad normal planteada por Daniel, para evaluar la significancia de los factores y sus interacciones, se pueden descartar de los planteamientos y análisis posteriores, aquellos factores que no sean significativos por sí solos ni que estén presentes en ninguna de las interacciones significativas. Este procedimiento es comúnmente llamado “proyección del experimento” [6], y de esta forma se focalizan los esfuerzos en aquellos factores que inicialmente parecen influir significativamente en la variable respuesta. Así, un experimento que se había diseñado sin réplicas, puede hacer uso de la(s) réplica(s) ocultas para llevar a cabo el análisis de varianza y obtener una estimación del error o error puro, con el fin de llevar a cabo las pruebas pertinentes a los residuales y validar el modelo.

3. DISEÑO Y ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO

- **Identificación y enunciado del problema:** como se mencionó anteriormente, el problema radica en las dimensiones de la cavidad de la polea en donde se ubica la banda, ya que se están presentando altos niveles de piezas defectuosas en el proceso productivo, lo que está influyendo de forma negativa en los costos de fabricación.
- **Elección de los factores, los niveles y los rangos:** los factores que se tuvieron en cuenta en un principio fueron: operario, torno, velocidad, proveedor y herramienta (ver [2] y [7]). Los niveles para cada uno de ellos fueron: para el factor operario se eligió a Ignacio y a Juan Carlos; para el factor torno, se eligieron los tornos T01 y T02; para el factor velocidad, se eligió trabajar con velocidades de 500 rpm y 750 rpm; los proveedores fueron codificados con los valores 1 y 2; y por último, las herramientas que fueron usadas para llevar a cabo el experimento fueron de material acero rápido y carburo de tungsteno. En resumen, cuatro de los factores seleccionados son de tipo cualitativo y uno de ellos de tipo cuantitativo. De tal forma, no se podrá llevar a cabo el análisis de la gráfica de superficie de respuesta ni de contornos, debido a que es necesario que por lo menos dos de los factores sean de tipo cuantitativo para efectuar dicho análisis.
- **Selección de la variable respuesta:** la variable respuesta, en este caso, es el porcentaje de piezas defectuosas que resultan en cada una de las corridas experimentales. Dicho porcentaje de piezas defectuosas, se calcula a partir de los resultados obtenidos al fabricar un lote de 10 piezas para cada combinación posible de factores y calcular el porcentaje que de este lote resulta defectuoso, según procedimientos establecidos por el sistema de gestión de calidad dentro de la compañía.

- **Elección del diseño experimental:** como se había mencionado anteriormente, resulta útil hacer uso de un diseño experimental que permita incluir el mayor número de factores y que minimice los costos de experimentación. Es por ello, que en un principio se plantea un modelo experimental 2^k con $k = 5$ factores no replicado. De esta manera se cumple con uno de los principios básicos del Diseño Experimental: “No invertir nunca todo el presupuesto en un primer conjunto de experimentos y utilizar en su diseño toda la información previa disponible” [8].

- **Realización del experimento:** para llevarlo a cabo, se generó una tabla con ayuda del programa Minitab (software especializado en estadística) [4], en donde se presenta el orden de las corridas experimentales de forma aleatoria para evitar que factores desconocidos o no tenidos en cuenta pudiesen afectar los resultados obtenidos y tergiversar las conclusiones. Algunos de estos factores podrían ser la fatiga del operario a medida que transcurre su jornada laboral, el calentamiento y las condiciones de afilado de las herramientas (buriles), entre otros. (ver [2] y [7]). La Tabla 1., muestra el orden en el cual se llevaron a cabo las corridas experimentales y los resultados obtenidos para cada una de ellas.

| SeqOrder | RunOrder | OPERARIO | TORNO | VELOCIDAD | PROVEEDOR | herramienta | % DEFECTUOSOS |
|----------|----------|-------------|-------|-----------|-----------|----------------------|---------------|
| 1 | 1 | JUAN CARLOS | 1 | 750 | 2 | ACERO RAPIDO | 30 |
| 6 | 2 | JUAN CARLOS | 2 | 750 | 2 | ACERO RAPIDO | 30 |
| 16 | 3 | IGNACIO | 1 | 750 | 2 | ACERO RAPIDO | 50 |
| 30 | 4 | IGNACIO | 1 | 750 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 40 |
| 7 | 5 | JUAN CARLOS | 2 | 750 | 1 | ACERO RAPIDO | 30 |
| 17 | 6 | JUAN CARLOS | 1 | 500 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 16 |
| 19 | 7 | JUAN CARLOS | 2 | 500 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 8 |
| 18 | 8 | IGNACIO | 2 | 750 | 2 | ACERO RAPIDO | 40 |
| 9 | 9 | JUAN CARLOS | 1 | 750 | 1 | ACERO RAPIDO | 30 |
| 11 | 10 | JUAN CARLOS | 2 | 500 | 2 | ACERO RAPIDO | 20 |
| 26 | 11 | IGNACIO | 1 | 500 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 21 | 12 | JUAN CARLOS | 2 | 750 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 32 | 13 | IGNACIO | 2 | 750 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 4 | 14 | IGNACIO | 2 | 500 | 1 | ACERO RAPIDO | 40 |
| 1 | 15 | JUAN CARLOS | 1 | 500 | 1 | ACERO RAPIDO | 30 |
| 12 | 16 | IGNACIO | 2 | 500 | 2 | ACERO RAPIDO | 60 |
| 20 | 17 | IGNACIO | 2 | 500 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 8 | 18 | IGNACIO | 1 | 750 | 1 | ACERO RAPIDO | 40 |
| 18 | 19 | IGNACIO | 1 | 500 | 2 | ACERO RAPIDO | 50 |
| 27 | 20 | JUAN CARLOS | 1 | 750 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 8 |
| 15 | 21 | JUAN CARLOS | 1 | 500 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 20 |
| 29 | 22 | JUAN CARLOS | 1 | 750 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 8 | 23 | IGNACIO | 2 | 750 | 1 | ACERO RAPIDO | 30 |
| 23 | 24 | IGNACIO | 1 | 750 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 9 | 25 | JUAN CARLOS | 1 | 500 | 2 | ACERO RAPIDO | 20 |
| 20 | 26 | IGNACIO | 2 | 500 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 20 |
| 13 | 27 | JUAN CARLOS | 2 | 750 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 20 |
| 24 | 28 | IGNACIO | 2 | 750 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 30 |
| 19 | 29 | IGNACIO | 1 | 500 | 1 | CARBURO DE TUNGSTENO | 40 |
| 2 | 30 | IGNACIO | 1 | 500 | 1 | ACERO RAPIDO | 40 |
| 21 | 31 | JUAN CARLOS | 2 | 500 | 2 | CARBURO DE TUNGSTENO | 16 |
| 3 | 32 | JUAN CARLOS | 2 | 500 | 1 | ACERO RAPIDO | 40 |

Tabla 1. Formato aleatorizado para recogida de datos experimentales

- **Análisis estadístico de los datos:** debido a que este experimento es no replicado, para hacer el análisis de significancia de los factores principales y las interacciones entre ellos, es necesario hacer uso de la metodología expuesta por Daniel [3] y mencionada en el presente documento en el Marco Teórico. [6]

Como se puede observar en la Gráfica 1, los factores que resultaron significativos son el operario, la herramienta utilizada y la triple interacción entre el operario, el proveedor y la herramienta. Siendo así, los factores torno y velocidad pueden ser excluidos del análisis y proyectar el experimento con el fin de hacer uso de los datos que se

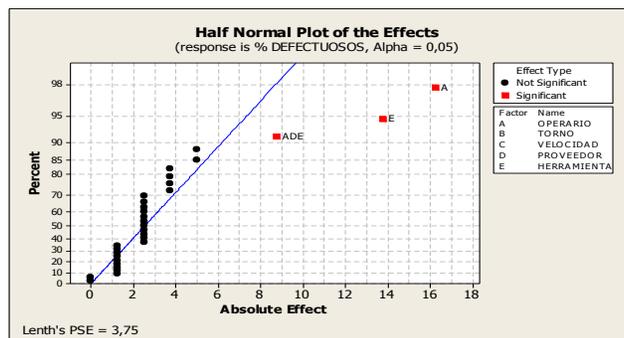
tienen a disposición para analizar el mismo experimento pero en este caso con tres factores y con cuatro réplicas, pudiendo usar la técnica del análisis de varianza o ANOVA, en la cual se hace una estimación del error puro y se puede validar el modelo haciendo los respectivos análisis de los residuales que se generen a partir de él y que se calculan haciendo uso de la ecuación de regresión lineal múltiple para hacer la estimación respectiva y después obteniendo la diferencia entre el valor observado y el valor estimado.

Como el experimento anterior tenía cinco factores y se va a proyectar a uno de tres, entonces se necesitarán ocho datos para evaluarlo y como se cuenta con 32 datos, entonces contamos en este caso, con un experimento replicado 4 veces.

En la Tabla 2., se pueden observar las cuatro réplicas para cada corrida experimental (combinación de factores), además de los valores estimados con la ecuación de regresión lineal múltiple (ver Ecuación 1.), y los residuales originales y los estandarizados. Como ya se había mencionado, los residuales resultan de la diferencia entre las observaciones y los valores estimados.

| Observation | Replicación | OPERARIO | PROVEEDOR | herramienta | % DEFECTUOSOS | ESTIM | RESID | STRESID |
|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|---------------|-------|-------|-----------|
| 1 | 1 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 18 | 0 | 0,000000 |
| 2 | 2 | BARCO | 2 | ACROFARPO | 18 | 18 | 0 | 0,000000 |
| 3 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 28 | 22,5 | 5,5 | 0,362227 |
| 4 | 4 | JUAN CARLOS | 2 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 28 | 2 | 0,063850 |
| 5 | 1 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 18 | 12,5 | -5,5 | -0,362227 |
| 6 | 2 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 18 | 22,5 | -4,5 | -0,300000 |
| 7 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 18 | 22,5 | -4,5 | -0,300000 |
| 8 | 4 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 18 | 22,5 | -4,5 | -0,300000 |
| 9 | 1 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 10 | 2 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 11 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 12 | 4 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 13 | 1 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 12,5 | -5,5 | -0,362227 |
| 14 | 2 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 12,5 | -5,5 | -0,362227 |
| 15 | 3 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 12,5 | -5,5 | -0,362227 |
| 16 | 4 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 12,5 | -5,5 | -0,362227 |
| 17 | 1 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 18 | 2 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 19 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 20 | 4 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 21 | 1 | BARCO | 2 | ACROFARPO | 18 | 18 | 0 | 0,000000 |
| 22 | 2 | BARCO | 2 | ACROFARPO | 18 | 18 | 0 | 0,000000 |
| 23 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 28 | 22,5 | 5,5 | 0,362227 |
| 24 | 4 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 28 | 22,5 | 5,5 | 0,362227 |
| 25 | 1 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 26 | 2 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 27 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 28 | 4 | JUAN CARLOS | 1 | CAMPACHE TUNISTENO | 30 | 27,5 | 2,5 | 0,156250 |
| 29 | 1 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 18 | 0 | 0,000000 |
| 30 | 2 | BARCO | 1 | ACROFARPO | 18 | 18 | 0 | 0,000000 |
| 31 | 3 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 28 | 22,5 | 5,5 | 0,362227 |
| 32 | 4 | JUAN CARLOS | 1 | ACROFARPO | 28 | 22,5 | 5,5 | 0,362227 |

Tabla 2. Formato aleatorizado para análisis de datos experimentales



Gráfica 1. Gráfica de Probabilidad Normal Media

En la Tabla 3., se encuentra el análisis de varianza o ANOVA, donde se puede observar que los efectos principales agrupados son significativos debido a que la

probabilidad de equivocarse al rechazar la hipótesis nula que plantea que los efectos son iguales a cero, es cero (valor p = 0,000). De igual forma, la interacción triple resultó significativa dado que su valor p = 0,003, es decir, la probabilidad de equivocarse al rechazar la hipótesis nula que plantea que la interacción es igual a cero es del 0,3%, o sea, menor que 0,05 o 5% que es el valor de significancia al cual estamos trabajando. Las interacciones dobles no resultaron ser significativas puesto que su valor p = 0,612 > 0,05.

También se puede observar el valor del estadístico R2 = 77,39% y el R2 ajustado = 70,80%, los cuales son aceptables, aunque podrían ser mejores. Éstos, son los porcentajes de explicación de la variabilidad por parte del modelo.

En la parte superior de la Tabla 3., se pueden observar los valores de los efectos estimados (nos indican los cambios ocurridos en la variable respuesta al pasar de un nivel a otro en un factor), los coeficientes de la recta de regresión que son la mitad de los valores de los efectos, a excepción del primero (constante), que representa el promedio general de las observaciones, la desviación estándar de los coeficientes, el estadístico de prueba t y los valores p. Se concluye entonces, que los coeficientes relativos a la constante, el operario, la herramienta y la triple interacción operario, proveedor y herramienta son significativamente distintos de cero y deben ser incluidos dentro de la ecuación de regresión (1).

Estimated Effects and Coefficients for % DEFECTUOSOS (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|--------------------------------|---------|--------|---------|-------|-------|
| Constant | 28,750 | 28,750 | 1,301 | 22,10 | 0,000 |
| OPERARIO | 16,250 | 8,125 | 1,301 | 6,24 | 0,000 |
| PROVEEDOR | 3,750 | 1,875 | 1,301 | 1,44 | 0,162 |
| HERRAMIENTA | -13,750 | -6,875 | 1,301 | -5,28 | 0,000 |
| OPERARIO*PROVEEDOR | 2,500 | 1,250 | 1,301 | 0,96 | 0,346 |
| OPERARIO*HERRAMIENTA | 0,000 | 0,000 | 1,301 | 0,00 | 1,000 |
| PROVEEDOR*HERRAMIENTA | 2,500 | 1,250 | 1,301 | 0,96 | 0,346 |
| OPERARIO*PROVEEDOR*HERRAMIENTA | -8,750 | -4,375 | 1,301 | -3,36 | 0,003 |

S = 7,35980 P-Value = 0,000000
R-Sq = 77,39% R-Sq(pred) = 59,81% R-Sq(adj) = 70,80%

Analysis of Variance for % DEFECTUOSOS (coded units)

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|--------------------|----|---------|---------|---------|-------|-------|
| Main Effects | 3 | 3737,50 | 3737,50 | 1245,83 | 23,00 | 0,000 |
| 2-Way Interactions | 3 | 100,00 | 100,00 | 33,33 | 0,62 | 0,612 |
| 3-Way Interactions | 1 | 612,50 | 612,50 | 612,50 | 11,31 | 0,003 |
| Residual Error | 24 | 1300,00 | 1300,00 | 54,17 | | |
| Pure Error | 24 | 1300,00 | 1300,00 | 54,17 | | |
| Total | 31 | 5750,00 | | | | |

Tabla 3. ANOVA y Estimación de Efectos y Coeficientes

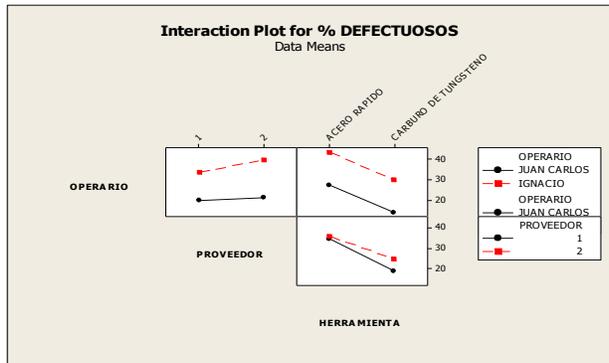
$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_3 X_3 + \hat{\beta}_{123} X_1 X_2 X_3$$

$$\hat{Y} = 28,750 + 8,125X_1 - 6,875X_3 - 4,375X_1 X_2 X_3 \quad (1)$$

Como ninguna de las interacciones dobles fue significativa y la interacción triple a pesar de ser significativa no se considera por el principio de "esparcimiento de los efectos" citado por [6], entonces

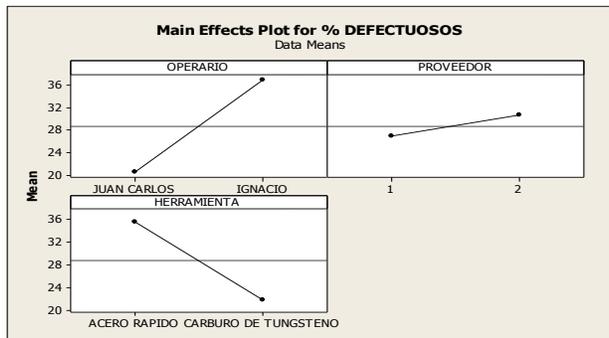
las conclusiones deberán ser extraídas de los análisis que se hagan sobre los efectos principales.

En la Gráfica 2., se puede ver claramente por qué no resultaron significativas las interacciones dobles, puesto que las líneas son casi paralelas, y sus pendientes similares hacen que no se crucen rápidamente, lo que implica que los factores no interactúan para influir significativamente en la variable respuesta porcentaje de defectuosos.



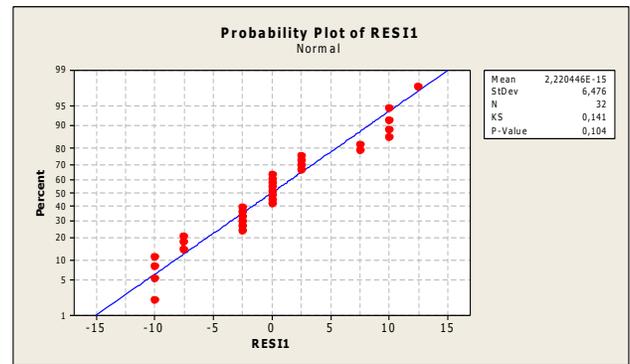
Gráfica 2. Gráfica de Interacciones para % de defectuosos.

La Gráfica 3., corrobora lo indicado por la Tabla 3., lo cual es, la significancia de los factores principales operario y herramienta, es decir, que un cambio en el nivel de alguno de estos factores representa una variación sustancial en el porcentaje de defectuosos.



Gráfica 3. Gráfica de los Efectos principales para % de defectuosos.

En cuanto a la validación del modelo, se puede observar en la Gráfica 4., que los residuales se ajustan a la línea recta de probabilidad normal, además de la prueba de Kolmogorov-Smirnov cuyo valor $p = 0,104 > 0,05$, lo que indica que se acepta la hipótesis nula que plantea que los residuales originales se distribuyen normalmente. Se puede observar también en la Tabla 4., que la media de los residuales originales es 0,00.



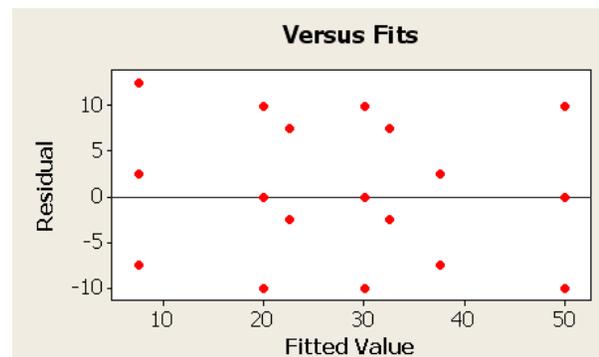
Gráfica 4. Gráfica de Probabilidad Normal para los Residuales Originales- Prueba Kolmogorov-Smirnov

Descriptive Statistics: RESI1

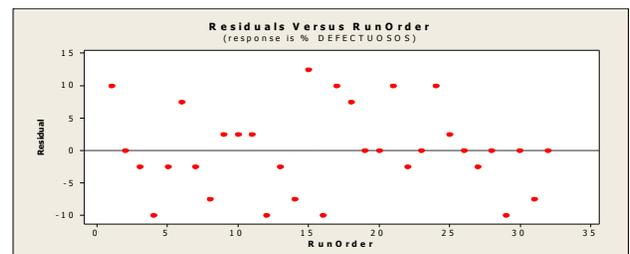
| Variable | N | N* | Mean | SE Mean | StDev | Minimum | Q1 | Median | Q3 | Maximum |
|----------|----|----|------|---------|-------|---------|-------|--------|------|---------|
| RESI1 | 32 | 0 | 0,00 | 1,14 | 6,48 | -10,00 | -2,50 | 0,00 | 2,50 | 12,50 |

Tabla 4. Estadísticas Descriptivas para los Residuales Originales

Por último, se puede analizar la Gráfica 5. y la Gráfica 6., en donde se evidencia que no existen indicios que nos hagan pensar que se viola el supuesto de varianza constante.



Gráfica 5. Gráfica de los Residuales Originales vs. Los valores ajustados.



Gráfica 6. Gráfica de los Residuales Originales vs. Orden de Corridas Experimentales.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la aplicación aquí analizada se concluyó que los únicos factores que resultaron significativos en el proceso de manufactura de las poleas para los hornos rotatorios

en INDUSTRIAS GHERSON'S Ltda. fueron el operario y la herramienta. Ninguna de las interacciones resultó ser significativa. Particularmente, para este caso, Juan Carlos (operario) presenta menor índice de piezas defectuosas en su trabajo, es por ello, que se le sugiere a la empresa que piense en la posibilidad de que Juan Carlos entrene a Ignacio, para de esta manera reducir las piezas defectuosas totales, o dado que aún para Juan Carlos el porcentaje es alto, hacer una reunión con ellos e indagar los motivos por los cuales se está presentando esta situación. Dado que ambos son torneros profesionales, no se debería estar presentando esto, que puede estar ocurriendo por falta de motivación y actitud positiva frente al trabajo.

El estudio también mostró que la herramienta que mejor desempeño presenta en las actividades de maquinado-torneado de las poleas es la de carburo de tungsteno, por lo tanto, se debería pensar en la posibilidad de adquirir algunas de ellas para llevar a cabo este tipo de actividad. Dado sus altos costos frente a los buriles de acero rápido y el trato delicado que presentan este tipo de herramientas, se debe evaluar la relación costo-beneficio que se obtiene al implementar este tipo de buriles en la producción de las poleas.

Debido a que el factor proveedor no resultó significativo en el análisis de los datos, se debe seguir comprando la materia prima a aquél, que presente mejores ofertas a nivel económico.

En cuanto a la programación de la producción, se puede asignar todo el trabajo a cualquiera de los tornos o a ambos simultáneamente, debido a que el factor torno tampoco resultó significativo.

La velocidad con la que se debe trabajar en vista de que no resultó ser un factor significativo es la de 750 rpm, debido a que de esta forma se pueden disminuir los tiempos de maquinado y los consumos de energía.

Con el presente estudio se logró una disminución de alrededor del 17% en porcentaje de piezas defectuosas, al pasar de un promedio de 37% a un 20% en la mejor combinación de los factores significativos, lo que conlleva a un ahorro de 1.500.000\$/mes aproximadamente.

En trabajos futuros, se debe hacer énfasis en el estudio de los factores operario y tipo (material) de la herramienta (buril), con el fin de determinar los parámetros (niveles) óptimos que maximicen el arranque de material y la calidad de las piezas, y minimicen los defectos de dimensión y defectos superficiales, con el fin de disminuir el 20% de piezas defectuosas alcanzadas con esta fase experimental y que pueden ser reducidas aún más en una fase de experimentación posterior.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] BOX, G, et al. (2005). *Statistics for Experimenters, Design Innovations and Discovery*. John Wiley and Sons. USA.
- [2] CASTRO, Evaristo (2007). Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta en la optimización de Parámetros de Maquinado en un Torno CNC. *Revista de Ingeniería Industrial-ITC*. Año 1 No. 1.
- [3] DANIEL, C. (1959). Use of half normal plot in interpreting factorial two level experiments. *Technometrics*. Vol. 1 pp. 311-342.
- [4] GRIMMA, P, et al. (2004). *Estadística práctica con Minitab*. Madrid. Editorial Pearson.
- [5] MEDINA, Pedro D; CRUZ, Arturo y RESTREPO, Jorge H. (2006) Aplicación de un modelo factorial de experimentación en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica* Año XII, No 32. pp 313 – 318.
- [6] MONTGOMERY, Douglas C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. Fifth Edition. John Wiley and Sons. USA.
- [7] RICO, Lázaro, et al. (2005). Predicción de la Rugosidad Superficial del Acero cold rolled 1018 a través de la Metodología de Superficie de Respuesta y Redes Neuronales. *CULCyT*. Año 2 No. 10.
- [8] TORT-MARTORELL, X., et al. (1999). *Métodos estadísticos: Control y mejora de la calidad*. Ediciones UPC. Barcelona.