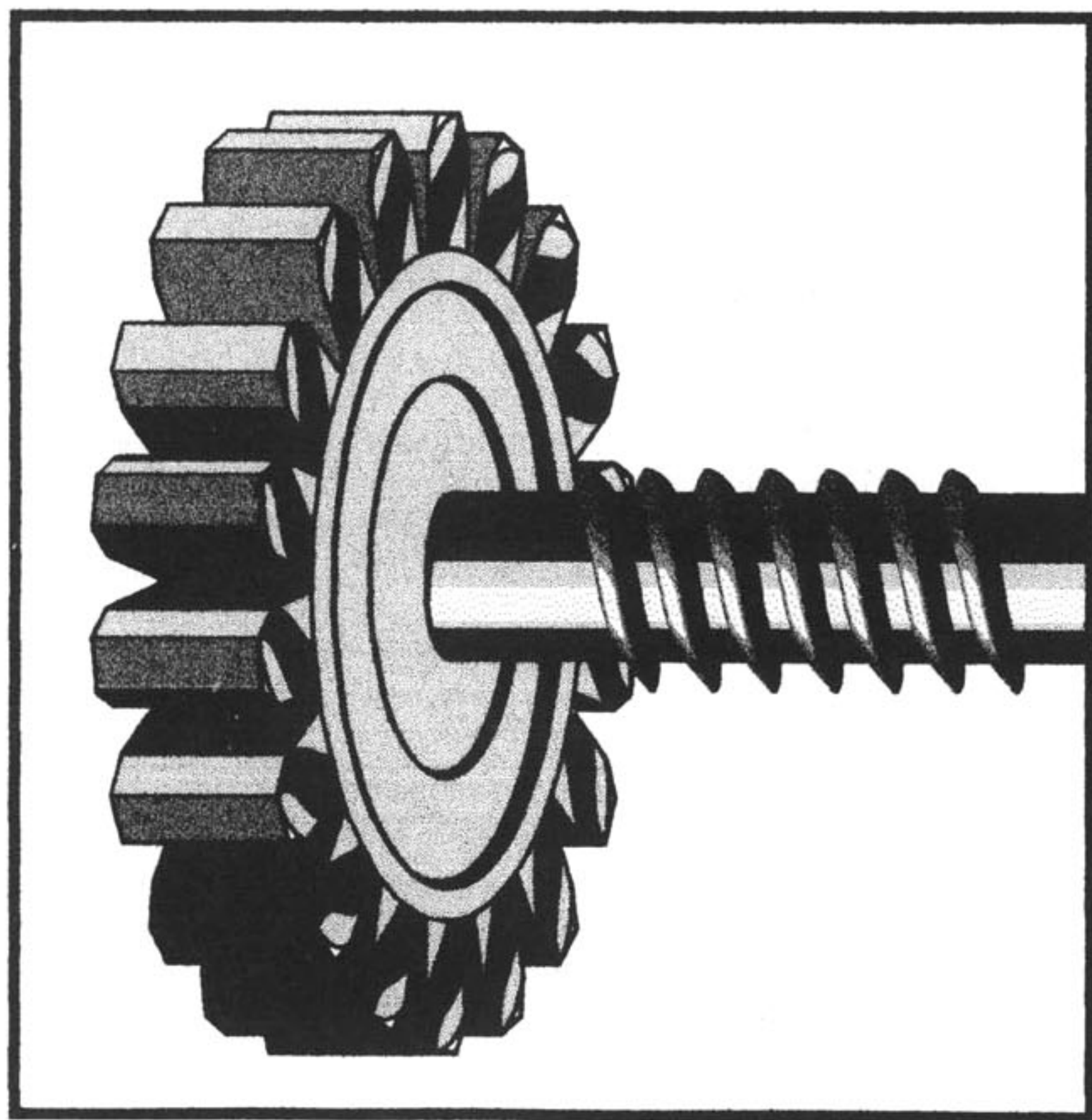


Análisis multivariado de la influencia del maquinado en la fuerza de corte



método estadístico de análisis multivariado de la varianza y se obtuvieron las combinaciones de los valores en los tres principales parámetros del régimen de maquinado (profundidad, velocidad y avance) en los que el nivel promedio de las componentes de la fuerza de corte es el menor posible.

ABSTRACT

Through the application of experimental design techniques, the influence of the machining regime upon cutting forces components was investigated. An experiment with a factorial design, submitting 32 steel bars to different conditions of lathe machining, was carried out. The statistical evaluation of the measurements involved multivariate analysis of variance. Combinations of values in the three principal machining regime parameters (depth, speed and feed) corresponding to the lowest possible average level of cutting force components, were obtained.

□ José Rafael Tovar C.
Estadístico

□ Waldo Duque Santa, Ph.D.
Ingeniero Mecánico

□ Mercedes Andrade, MSc
Estadística

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar la influencia del régimen de maquinado sobre las componentes de las fuerzas de corte, aplicando técnicas de diseño experimental. Se realizó un experimento con estructura factorial, sometiendo 32 barras de acero a diferentes condiciones de maquinado en torno. Para analizar las mediciones se aplicó el

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de manufactura discretos, es decir, aquellos en los cuales se producen transformaciones de forma sin variar las propiedades de la materia prima, se clasifican en procesos primarios y procesos terminales (Duque, 1993). Los primarios generalmente son proveedores

* La Revista recibió este artículo en junio de 1998.

de piezas en bruto para los procesos terminales, en los cuales se obtienen las dimensiones finales del producto. El hecho de configurar la forma y dimensiones finales del producto exige de los procesos terminales un alto nivel de calidad. El maquinado de metales es la tecnología que garantiza en el componente final los requerimientos de calidad más exigentes, en términos de precisión dimensional y acabado superficial. Para lograr esta calidad en el producto y posicionar la industria metalmecánica en los mercados internacionales es necesario un conocimiento profundo de las variables del proceso y de las condiciones que permiten optimizarlo.

La fuerza de corte en operaciones de maquinado determina, entre otros parámetros, la potencia consumida y las deformaciones en las piezas de trabajo; por lo tanto, el conocimiento y control de la influencia ejercida por los parámetros del régimen de maquinado, en las componentes de la fuerza de corte, son determinantes para lograr la fabricación de partes de máquinas que cumplan los requerimientos de precisión dimensional y acabado superficial.

El problema a resolver, en esta investigación, está relacionado con el desarrollo de procesos de optimización de la operación de los parámetros de funcionamiento de un torno Romi 40E de manera que las componentes de las fuerzas físicas que se generan entre la máquina y la pieza (fuerzas de corte) presenten sus valores mínimos durante el desarrollo de la labor, lo cual, a su vez, repercute directamente sobre la calidad en el acabado del producto resultante del trabajo de mecanizado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló para un proceso de cilindrado, utilizando como unidad experimental barras de acero de producción nacional

tipo SAF 1040 de 1½ pulgadas de diámetro por 12 centímetros de longitud. Las unidades experimentales fueron cilindradas en un torno de fabricación brasilera modelo ROMI E-40. Se empleó como herramienta de corte placas de carburo de Tungsteno tipo TNMG 432LM en portapla-cas VALENITE MTBNR 64. La medición de las componentes principal Fz libre Fy y de reacción Fx se hizo con ayuda de un dinamómetro piezoeléctrico de tres componentes marca Klistar.

Se generaron ocho tratamientos cuyo efecto fue probado sobre las piezas de acero. Los tratamientos surgieron de la combinación de niveles de tres factores de interés, definidos por los parámetros que actúan en la máquina durante el proceso de torneado. Los factores fueron: la velocidad de corte, teóricamente medida en metros por segundo, pero en la práctica se expresa en términos de revoluciones por minuto, el avance, medido en milímetros por revolución y la profundidad, medida en milímetros.

ba asociados a varios tamaños de muestra probados. Se decidió tomar el valor de efecto de interacción 2.0, el cual con 4 réplicas permite tener una potencia de 0.87 .

3. MODELOS Y MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Dadas las características propias del estudio, en el que se tienen tres variables de interés (parámetros de la máquina) cada una con dos niveles (alto y bajo) que al ser combinados entre sí generan ocho tratamientos de trabajo, cuyo efecto sobre las unidades de análisis se quiere diferenciar y de acuerdo con Duque (1993) quien al referirse a los modelos factoriales dice que "...este tipo de diseño es muy eficiente cuando se necesita determinar el efecto de varios factores y de sus interacciones en la respuesta. El efecto de un factor se define como la variación en los niveles del factor, este efecto se denomina principal. Las interacciones son el resultado de variaciones simultáneas de varios facto-

Tabla 1. Factores y niveles asociados al experimento

FACTOR	NIVELES	VALORES TEÓRICOS	VALORES REALES
Velocidad de corte	Alto	100m/min = 842 RPM	850 RPM
	Bajo	71m/min = 673 RPM	600 RPM
Avance	Alto	0.25 mm/rev	0.263 mm/rev
	Bajo	0.15 mm/rev	0.161 mm/rev
Profundidad	Alto	2.5 mm	No cambia
	Bajo	1.5 mm	No cambia

El cálculo del número de réplicas se realizó tomando como base el hecho de establecer si el valor del efecto de la interacción entre los factores era estadísticamente cero. Se plantearon algunos valores de interés en lo que se pudiera encontrar interacción y con cada uno de estos se hizo un análisis de sensibilidad utilizando como varianza, el valor obtenido por Astudillo (1987), el cual fue 0.78125. Se obtuvieron los respectivos valores de potencia de la prue-

res..."1; se decidió hacer el análisis de los datos, utilizando un modelo de diseño experimental factorial cuya estructura es la siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + e_{ijkl}$$
$$i = 1, 2 \quad j = 1, 2 \quad k = 1, 2 \quad l = 1, 2, 3, 4$$

Los supuestos del modelo son:



- 1. $E(Y_{ijkl}) = \mu$ y $Var(Y_{ijkl}) = \Sigma$
- 2. $Y_{ijkl} \sim N_p(\mu)$
- 3. Las p variables respuesta (3) medidas sobre cada una de las unidades experimentales, se distribuyen independientemente.
- 4. Las filas de la matriz de errores (correspondientes a las unidades de análisis) son independientes entre sí, idénticamente distribuidas y no correlacionadas.

3.1 Hipótesis planteadas

3.1.1 Hipótesis a probar sobre los factores principales. Se plantearon tres hipótesis semejantes, para cada uno de los parámetros del proceso de corte que representa un factor experimental a estudiar. La hipótesis se plantearon buscando establecer el efecto que puede tener alguno de los niveles del factor sobre la variable respuesta.

Ho: El efecto promedio de los niveles del parámetro del proceso de corte que representan un factor experimental, sobre las componentes de la fuerza de corte, es el mismo y su diferencia es igual a cero.

- Ho: $\alpha_i = \alpha_i'$ Ha: $\alpha_i \neq \alpha_i'$
para la velocidad
- Ho: $\beta_j = \beta_j'$ Ha: $\beta_j \neq \beta_j'$
para el avance
- Ho: $\gamma_k = \gamma_k'$ Ha: $\gamma_k \neq \gamma_k'$
para la profundidad

Ha: Al menos uno de los niveles del parámetro presenta efecto sobre el conjunto de las fuerzas de corte

3.1.2 Hipótesis sobre la interacción de primer orden. Se plantearon tres hipótesis, con las cuales se buscó establecer si existe efecto debido a la interacción entre pares de niveles de los factores de tratamiento.

Ho: El efecto promedio de los pares de niveles de dos de los parámetros

de corte sobre las componentes de la fuerza de corte es nulo.

- Ho: $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ Ha: $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$
interacción velocidad y avance
- Ho: $(\alpha\gamma)_{ik} = 0$ Ha: $(\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$
interacción velocidad y profundidad
- Ho: $(\beta\gamma)_{jk} = 0$ Ha: $(\beta\gamma)_{jk} \neq 0$
interacción avance y profundidad

Ha: Al menos uno de los pares de niveles de dos de los parámetros de corte de la máquina presenta efecto sobre el conjunto de las fuerzas de corte

3.1.3 Hipótesis sobre la interacción de segundo orden. Ho: El efecto promedio de las triplas formadas por niveles de los parámetros velocidad, avance y profundidad de corte, sobre las componentes de la fuerza de corte es nulo. No hay efecto de triple interacción.

- Ho: $(\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0$ Ha: $(\alpha\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$

Ha: Al menos uno de las triplas formadas por los niveles de la velocidad, avance y profundidad de corte de la máquina presenta efecto sobre el conjunto de las fuerzas de corte.

3.2 Matrices asociadas al modelo

3.2.1 Matriz Y de valores para la variable de respuesta. La matriz de valores de la variable respuesta es una matriz de 32X3, dispuesta de modo que cada celda corresponde al valor observado para la j-ésima componente (j = 1, 2, 3) de la fuerza de corte en la i-ésima unidad experimental (i = 1, 2,..., 32) es decir; en la matriz Y, las columnas corresponden a las variables dependientes observables (respuestas), mientras las filas representan a cada una de las réplicas de los tratamientos.

3.2.2 Matriz de diseño experimental. Es una matriz de 32 filas X 27 columnas, que puede descomponerse en siete submatrices así: $X = [X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7]_{32 \times 27}$

3.2.3 Matriz de parámetros B. Es una matriz de dimensión 27x3 conformada por los parámetros que representan los efectos de los factores y sus niveles en el modelo.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis univariado

Los resultados obtenidos al realizar por defecto el ANOVA sobre cada una de las tres variables respuesta son los que aparecen en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos en los análisis de la varianza univariados para cada una de las variables respuesta				
VARIABLE	Coficiente de Variación	ESTADÍSTICA F del Modelo	NIVEL p (modelo)	Factores Con efecto significativo y nivel p asociado
X	73.6093	2.21	0.0697	Velocidad-Profundidad (0.0267 - 0.0358)
Y	15.5537	12.03	0.0001	Avance-Profundidad (0.0001 - 0.0001)
Z	14.6660	24.18	0.0001	Avance - profundidad (0.0001) Velocidad x Profundidad (0.0001) Avance x Profundidad (0.0024) VelocidadxAvancexProfundidad (0.0043)

De acuerdo con la tabla 2, se logró controlar los factores externos no manipulables por el investigador que pueden alterar o aumentar la variabilidad en las componentes Y y Z de la fuerza de corte, lo que no se logró con la componente X, cuyo coeficiente de variación (73.6%) puede crear preocupación respecto al control local realizado durante la medición de esta fuerza sin embargo; se trató de explicar el fenómeno argumentando que al aumentar la profundidad de corte, el elemento de corte produce una presión mayor sobre la pieza y se genera, a su vez, mayor esfuerzo en la máquina para realizar el corte, esto hace que la fuerza X, que es la que va en dirección del eje de la pieza, se aumente. Se acordó que los datos podían ser analizados como resultados del experimento, dado que los valores de la componente Z siempre estuvieron por encima de los registrados para la componente X, y si hubiese sucedido lo contrario ($X > Z$) podría considerarse la presencia de problemas en la obtención de los datos.

4.2 Análisis multivariado

Al aplicar el MANOVA, lo primero que se obtiene es un análisis de correlaciones entre las tres variables y se obtuvo que entre las fuerzas X y Y el coeficiente de correlación alcanza un valor del 0.3343, para las fuerzas X y Z es de 0.4484 y para Y y Z la correlación es de 0.8112. Estos resultados sugieren que el valor obtenido para el último par de componentes es de prestarle atención, ya que es una correlación que se puede considerar alta y estadísticamente significativa. Este primer resultado modificó el análisis planteado, se sacó una de las dos componentes y el modelo de tres variables de respuesta pasó a tener dos respuestas, únicamente. Lo anterior dio pie a plantear tres modelos, uno para X y Z, otro para Y y Z y el que considera las tres respuestas X, Y y Z; los análisis se realizaron para cada uno de los mismos, pero el interés se centró en los

que contienen las variables correlacionadas, ya que, de éstos sale el que finalmente se aceptará en el trabajo. El modelo completo (X Y Z) se utilizó para fijar criterios de selección del modelo final. Los criterios tenidos en cuenta para la aceptación del modelo final fueron los siguientes:

- El criterio tecnológico propio el proceso de fabricación.
- El valor tomado por el coeficiente de variación, mientras menor sea el mismo, es porque mayor fue el control sobre factores de confusión no manipulables (control local).
- La semejanza entre los efectos de tratamientos observados para el modelo con tres componentes, es decir, mientras mas similitudes se tengan entre el MANOVA con tres variables y el bivariado, mucho mejor porque se puede inferir que el último está representando con menos variables de respuesta lo mismo que el completo.

El modelo seleccionado idealmente debía cumplir con todos los criterios, pero de no ser así, se consideró suficiente con que cumpliera dos de los mismos, siendo el mas importante la opinión dada por el especialista en ingeniería mecánica.

Modelo incluyendo las tres variables (X Y Z). El MANOVA obtenido para este modelo aparece en la tabla 3. No se podría hacer un análisis de efectos individuales de cada

parámetro del torno sobre el conjunto de componentes de la fuerza de corte, ya que se evidencia, fácilmente, la presencia de interacción de segundo orden entre los tres parámetros de la máquina (ver niveles p asociados a cada una de las pruebas en la tabla 3) lo que permite rechazar las hipótesis dos, tres, cinco y siete, mientras que los datos muestrales no dan suficiente evidencia para rechazar H_0 en las hipótesis uno, cuatro y seis, planteadas.

Al presentarse efecto interacción de segundo orden, hace que el modelo sea analizado dando prioridad a este aspecto. El valor de este resultado radica en que ya no puede verse el efecto de ninguno de los niveles de los parámetros solo, sino que el efecto de cada nivel de un parámetro de corte va a estar traslapado entre los niveles de otro par de parámetros que simultáneamente están ejerciendo efecto sobre la misma.

4.3 Modelo seleccionado con las variables X y Z

Después de seleccionar la variable Z para el modelo final, se aplicó la técnica del MANOVA para éste. Los resultados obtenidos para el MANOVA en el modelo con las dos componentes, indican presencia de alta significancia en el efecto de las interacciones entre velocidad y profundidad ($F = 9.2791$; $p = 0.0011$) y entre los tres factores en conjunto ($F = 5.6941$; $p = 0.0098$).

Tabla 3. Análisis Multivariado de la Varianza para el modelo XYZ			
Factor tratamiento	Lambda de Wilks	Estadística F*	Nivel p
Velocidad	0.73870	2.5930	0.0784
Avance	0.30825	16.4566	0.0001
Profundidad	0.17439	34.7173	0.0001
Velocidad X Avance	0.78748	1.9790	0.1466
Velocidad X Profundidad	0.52134	6.7329	0.0022
Avance X Profundidad	0.86451	1.1492	0.3514
Velocidad X Avance X Profundidad	0.64156	4.0968	0.0188
* Valor obtenido después de aplicar la transformación a la traza de Pillai y al Lambda de Wilks (Ambos estadísticos tienen el mismo valor).			

4.3.1 Análisis para las componentes (X,Z) del modelo seleccionado.

En la tabla 4 se puede observar como los mayores promedios se presentan en las combinaciones formadas por el nivel alto de velocidad de corte y el Avance alto también; aunque se puede pensar, después de mirar la tabla, que para la componente X de la Fuerza de Corte, algunos de estos promedios pueden llegar a estar afectados por valores extremos de la variable (los coeficientes de variación no llegan al 20% o menos siquiera en ninguno de los casos), caso que no es evidente en la componente Z cuyos CV son bastante bajos en todas las combinaciones. Es interesante observar que los promedios obtenidos al combinar el nivel bajo de velocidad y los niveles altos de los otros dos factores (prom.= 170) y la combinación formada por los niveles bajos de la velocidad y el avance con el nivel alto de la profundidad (prom.= 110.75) los cuales son considerados estables en cuanto a la variabilidad de los datos. Se puede afirmar que el máximo valor para la componente Z de la fuerza de corte, se obtuvo al colocar la velocidad de corte en su nivel bajo (600 RPM) el avance en nivel alto (0.263 mm) y la profundidad de corte en nivel alto (2.5 mm). La segunda mejor combinación obtenida para esta componente fue la de velocidad en nivel bajo (600 RPM), avance en nivel bajo (0.161 mm) y profundidad Alta (2.5 mm).

De otro lado, el caso opuesto al analizado, es decir, las combinaciones con las que se obtienen los menores valores promedio para la componente Z de la fuerza de corte, se logran al colocar la máquina en velocidad alta (850 RPM) avance bajo (0.161 mm) y profundidad baja (1.5 mm) que da como resultado un promedio de 62.50 kilopondios con una desviación de 2.886, como también ponerla en velocidad baja (600 RPM) avance bajo (0.161 mm) y profundidad de corte en nivel bajo (1.5 mm) la cual produce un promedio de 67.00 kilopondios con desviación de 4.760. En ambos casos se puede argumentar que la variabilidad es baja, lo que da confianza en lo representativo de los promedios.

La variable X tuvo algunos valores extremos de variabilidad lo que se vio en el coeficiente de variación del modelo hallado para la misma y de nuevo se refleja en las coeficientes de variación que acompañan a los valores promedio de las combinaciones. Para esta componente de la fuerza de corte, el mayor promedio se obtuvo con la combinación de niveles altos de los tres parámetros (prom.= 52.50 kilopondios), sin embargo la variabilidad en los datos de esta combinación se puede considerar alta (C.V.= 51.8) aunque no es la mayor de las obtenidas. El segundo valor mayor se obtuvo al colocar el torno con velocidad alta, al avance en nivel bajo y la profundidad en nivel alto (prom.= 32.50; C.V.= 101.7) aunque es claro que el coeficiente

de variación es el más alto de todos los obtenidos, así que para esta fuerza la mejor combinación es la primera de las mencionadas. En cuanto a las combinaciones con las que se obtienen los valores promedio opuestos (bajos) para la componente, se encontró que la combinación velocidad en nivel bajo (600 RPM), avance en nivel alto (0.263 mm) y profundidad en nivel bajo (1.5 mm) fue la que menor promedio dio para la componente X (11.25 kilopondios; CV= 22.50) como también fue la de menor coeficiente de variación. Es interesante el caso de las combinaciones, velocidad alta avance y profundidad bajos y todos los factores en su nivel bajo (V2A2P2) que presentaron los mismos promedios y coeficientes de variación en esta componente de la fuerza de corte, parece ser que el variar los niveles del factor velocidad no afecta en absoluto a la variable X (tabla 4).

4.4 Selección de la combinación de parámetros

Como el objetivo central del presente trabajo radica en identificar la combinación que actúa de manera significativa y hace que los promedios de las dos componentes de la fuerza de corte sean al mismo tiempo bajos, como también las desviaciones que los acompañan, se decidió que las combinaciones con que se logran estos objetivos son: la formada por el nivel alto de la velocidad de corte (850 RPM) el nivel bajo del avance (0.161mm) y el nivel bajo de la profundidad (1.5 mm) y la formada por el nivel bajo del parámetro velocidad de corte (600 RPM) y los niveles bajos de los otros dos parámetros de corte (0.161 y 1.5 mm para el avance y la profundidad respectivamente), para ambos casos se obtienen los menores valores promedio para las componentes de la fuerza de corte (viéndolos en conjunto) y los coeficientes de variación de los mismos tienden a ser bastante bajas lo que hace pensar en que son valores presumiblemente estables.

Tabla 4. Promedios y desviaciones de cada una de las componentes de la fuerza de corte bajo el efecto de interacción de segundo orden (Kilopondios).				
INTERACCIÓN*	FUERZA Z		FUERZA X	
	PROMEDIO	Coef. de Variación	PROMEDIO	Coef. de Variación
V1A1P1	141.25	19.7	52.50	51.8
V1A1P2	113.75	27.2	28.75	96.7
V1A2P1	103.75	4.6	32.50	101.7
V1A2P2	62.50	4.6	15.00	38.5
V2A1P1	170.00	4.8	24.50	42.4
V2A1P2	71.25	3.5	11.25	22.2
V2A2P1	110.75	5.9	17.50	54.7
V2A2P2	67.00	7.1	15.00	38.5

* El valor uno (1) identifica al nivel alto del factor y el dos (2) identifica al nivel bajo del mismo.

5. CONCLUSIONES

Cuando se quieran mejorar los procesos de fabricación de piezas industriales, en los que interviene el torno, tomando como base de partida para este mejoramiento, el comportamiento de las componentes de la fuerza de corte; no es estrictamente necesario medir y controlar la máquina en las tres componentes, pues, con medir dos de las mismas (componentes X y Z) se obtiene suficiente información acerca del conjunto.

La técnica de Análisis Multivariado de Varianza, en el análisis de datos obtenidos a partir de experimentos con múltiples respuestas es una decisión bastante acertada, pues, permite establecer los efectos significativos de tratamientos sobre el conjunto de variables dependientes, mientras que si se hacen análisis separados de varianza para cada una de las mismas, los resultados pierden fuerza dado que, los tratamientos pueden actuar de manera diferente sobre la variable individual y sobre el conjunto.

Para las condiciones consideradas en el presente trabajo, las combinaciones con las que se logra tener un nivel promedio bajo en la fuerza de corte son: poner la velocidad en 850 RPM, el avance en 0.161 mm y la profundidad de corte en 1.5 mm.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1.] ASTUDILLO. P. A, Estudio y Análisis de los efectos de los factores: Velocidad en revoluciones por minuto, Avance en milímetros por revolución y Profundidad de Corte considerados en los niveles sobre el consumo de potencia en el maquinado de acero estirado en frío SAE-1020. Tesis para optar al título de Estadístico en la Universidad del Valle, Cali, 1987.

[2.] CAICEDO. C. E, Optimización de un proceso de torneado apli-

cando la metodología Taguchi. Tesis para optar al título de Estadístico en la Universidad del Valle, Santiago de Cali, 1992.

[3.] CANO F. A, Conceptos Básicos del Diseño Experimental en Ciencias de la Conducta. Universidad del Valle, Cali, 1993

[4.] CARDONA. J. N, Comparación de diferentes velocidades de filtración en cinco alternativas de pretratamiento para abastecimiento de agua. Universidad del Valle - CINARA. Tesis para optar al título de Estadístico, 1994.

[5.] CUADRAS. C.M, Métodos de Análisis Multivariante. Editorial EUNIBAR, España 1981.

[6.] DUQUE S, W, Fundamentos teóricos del mecanizado de metales. Departamento de Mecánica de Sólidos y Materiales, Sección de Diseño y Tecnología Mecánica. Universidad del Valle, Cali, 1983.

[7.] DUQUE S, W, El Diseño Experimental en los Procesos de Maquinado. Una Aproximación al Método Taguchi de Ingeniería de la Calidad. Seminario Taller Internacional "Las herramientas de corte en el mecanizado eficaz". Centro Colombo Alemán del Plástico. C.C.A.P. ASTIN. Cali, noviembre de 1993.

[8.] DOYLE L.E, KEISER C. A, LEACH J.L, et al, Materiales y procesos de manufactura para ingenieros. Tercera Edición. Prentice-Hall México, 1985.

[9.] GERLING. H, Alrededor de las Máquinas-Herramientas. Tercera Edición, Editorial Reverté S.A. Barcelona, 1984

[10.] HERNÁNDEZ. S. R, Metodología de la Investigación. Editorial Mc Graw Hill, México, 1991.

[11.] IEMMA A. F, Análisis de Varianza con datos desbalancea-

dos. Universidad de Sao Paulo, Brasil. 1993

[12.] MARTÍNEZ. R, Diseños aplicados en frutales y en Biotecnología. Departamento de Matemáticas y Estadística Universidad Nacional de Colombia. Bogotá 1995.

[13.] MENDENHALL. W, et al, Estadística Matemática con Aplicaciones. Editorial Iberoamérica, México 1986.

[14.] MÉNDEZ. I, Modelos Estadísticos Lineales en la Investigación Comparativa. Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, UNAM. Serie Monografías Volumen 1, No 4. México, 1993

[15.] MONTGOMERY. C. D, Diseño y Análisis de Experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1991.

[16.] MORRISON D, 1967; Multivariate Statistical Methods. Mc Graw Hill. New York. P 1-338.

[17.] NETER. J, WASSERMAN. W, KUTNER. M. H, Applied Linear Statistical Models. Regression, Analysis of Variance, and Experimental Designs. Editorial IRWIN. USA, 1990.

[18.] SAS/STAT User's Guide. Volumen 1, GLM, versión 6.06, SAS Institute Inc. 1993

[19.] TEHERAN. S. H, VIÁFARA W, "Aplicación del método de análisis multivariante de medidas repetidas en el estudio de la interacción medio ambiente x factores de tratamiento en el cultivo de café, *Coffea arabica*". Trabajo de Grado para optar al título de Estadístico Universidad del Valle, realizado para CENICAFÉ y UNIVALLE, Cali, Colombia. 1993.

[20.] WALPOLE. E, Ronald & MYERS H. Raymond. Probabilidad y Estadística. Cuarta Edición (Tercera en español). Editorial Mc Graw Hill. México, 1993

AUTORES

José Rafael Tovar Cuevas

Estadístico de la Universidad del Valle, Docente hora cátedra del Departamento de Producción e Investigación de Operaciones en la Facultad de Ingeniería de la misma Universidad. Asistente de investigación y coordinador de un proyecto de investigación de la Corporación Centro Internacional de Entrenamiento e Investigaciones Médicas CIDEIM, de Cali, Colombia.



Mercedes Andrade Bejarano

Estadística, Magíster en Ingeniería de Sistemas de la Universidad del Valle. Profesora Asistente del Departamento de Producción e Investigación de Operaciones de la misma Universidad.



Waldo Duque Santa

Ingeniero Mecánico, Especialista en Comportamiento Dinámico de

Máquina-Herramienta, Magíster en Ingeniería Mecánica, Ph.D. en Ingeniería de Manufactura de la Universidad Estatal de Campinas, Brasil. Coordinador Programas de Doctorado del Convenio Universidad del Valle - Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor Titular de la Universidad del Valle y profesor de la Universidad Autónoma de Occidente.



CE: walduque@verne.cuao.edu.co

Una falsa idea engendra, tarde o temprano, una conducta equivocada.

A. Huxley
