

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CORTE DE METAL EN UN TORNO CNC, UTILIZANDO DOE y T² HOTELLING

ANALYSIS OF THE METAL CUTTING PROCESS IN CNC LATHE, USING DOE AND T² HOTELLING

Luis Eduardo Hernández Martínez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
eduardo-hernandez91@hotmail.com

Moisés Tapia Esquivias

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
moises.tapia@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Alicia Luna González

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alicia.luna@itcelaya.edu.mx

Recepción: 22/noviembre/2019

Aceptación: 22/mayo/2020

Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar los factores de un proceso de manufactura para analizar el impacto que tienen sobre algunas de las variables de respuesta del proceso. En este trabajo se analiza el proceso de corte de metal en un Torno CNC, mediante la implementación de diseño estadístico de experimentos (DOE) y el estadístico T² Hotelling. Como variables independientes se consideraron tres parámetros de maquinado: el avance, revoluciones por minuto y profundidad de corte. Como variables de respuesta se tomaron los diámetros y el tiempo de procesamiento. Entre los parámetros considerados para este estudio, se encontró que la variable avance, tiene la mayor influencia en la respuesta diámetro. Por otro lado, mediante la aplicación del estadístico T² Hotelling se llegó a la conclusión de que el proceso está bajo control estadístico.

Palabras Clave: CNC, DOE, T² Hotelling, variable independiente, variable de respuesta.

Abstract

The goal of this work is to study the factors of a manufacturing process to analyze the impact they have on some of the response variables of the process. This paper analyzes the process of cutting metal in a CNC lathe, through the implementation of statistical design of experiments (DOE) and the statistical T^2 Hotelling. As independent variables, three machining parameters were considered: feed rate, revolutions per minute and cutting depth. As response variables, diameters and processing time were taken. Among the parameters considered for this study, it was found that the variable feed rate has the greatest influence on the diameter response. On the other hand, through the application of the T^2 Hotelling statistic it was concluded that the process is under statistical control.

Keywords: CNC, DOE, independent variable, response variable, T^2 Hotelling.

1. Introducción

Los procesos de manufactura en la industria actual han experimentado un alto grado de competitividad a nivel mundial. Los procesos de manufactura requieren de confiables indicadores de desempeño, que garanticen la obtención de buenos resultados operativos [Pérez, 2015]. Uno de los indicadores de desempeño que juega un papel importante para la industria, es la aceptación de un producto terminado.

El diámetro es una de las variables de respuesta que tiene efecto sobre la aceptación o rechazo de un producto terminado. El diámetro, en los procesos de corte de metal (PDCM), es el resultado de la combinación de materiales de trabajo, herramientas y parámetros de corte. Un producto terminado que no cumpla con el diámetro requerido por el cliente es garantía de generación de costos en los PDCM. Manifestándose a través de grandes cantidades de desperdicio de material, retrabajo de piezas, tiempos extras, etc. Por lo que, el diámetro se ha tomado como una variable de respuesta a estudiar y optimizar, mediante la implementación de DOE.

El tiempo de procesamiento es el tiempo consumido por los recursos en efectuar la operación. Este tiempo es utilizado para calcular el costo de fabricación de los

artículos de producción. Por lo cual, teniendo un impacto en costos, se ha tomado como variable de respuesta el tiempo de procesamiento, únicamente para estudiar con el estadístico T^2 Hotelling, pero no como variable a optimizar mediante la implementación del DOE.

Esta investigación se llevó a cabo en el taller de “Maquinados Calderón”, ubicado en la localidad de Pozos, del municipio de Santa Cruz de Juventino Rosas, Gto. El taller adquirió un nuevo equipo de torno CNC, y deseaban obtener información estadística de la operación de este nuevo equipo. Además, el taller necesita obtener buenos indicadores de desempeño en los maquinados del diámetro de redondos de acero cold rolled 1045, procesados en la máquina de torneado CNC. Por lo que la finalidad de este artículo es estudiar los factores del proceso de torneado CNC, para analizar el impacto que tienen sobre variables de respuesta del proceso.

Los académicos han usado diferentes herramientas de análisis para el modelado estadístico de las variables de respuesta en diversos PDCM. Una de las herramientas más utilizadas es el Diseño de experimentos. En la literatura existe el uso del Diseño de experimentos para la predicción de variables de respuesta, así como la aplicación del estadístico T^2 Hotelling para monitorear el control estadístico de calidad. Por ejemplo [Rico, 2010], utilizó un Diseño de experimentos para analizar el efecto de los parámetros de corte en la redondez de piezas cilíndricas para acero 1018 en la operación de torneado, demostrando que la velocidad de corte afecta significativamente la redondez. Por su parte [Sukumar, 2014], desarrolló un arreglo ortogonal de Taguchi (L16) y una red neuronal artificial, para identificar la combinación óptima de factores influyentes en el proceso de fresado de Aluminio 6061. [Sakthivelu, 2017] analizó las condiciones de corte óptimas para una rugosidad superficial mínima y una tasa máxima de eliminación de material en el torneado CNC de la aleación de aluminio 6063 por el método Taguchi.

Además, [Rao, 2017] estudió los parámetros de mecanizado en Torno CNC como velocidad de corte (m/min), velocidad de avance (mm/min), profundidad de corte (mm) que influyen en las respuestas Rugosidad de la superficie y Tasa de eliminación de material mediante el uso de DOE. [Mandal, 2017] llevó a cabo 20 experimentos siguiendo DOE, tomando como parámetros de entrada: La velocidad

del husillo, la velocidad de avance y la profundidad de corte y como respuestas: la tasa de eliminación de material, la rugosidad de la superficie y la potencia en el centro de torneado del CNC. [Srivastava, 2019] implementó una red neuronal artificial y un diseño factorial completo 3^3 con un total de 27 experimentos, estudiando la velocidad del husillo, la profundidad de corte y la velocidad de avance, sobre la rugosidad de la superficie de acero EN8 en torno CNC.

También, [Pawar, 2018] estudió la operación de torneado en acero para herramientas AISI D2 con insertos de carburo recubiertos, utilizando la Metodología de superficie de respuesta (RSM). [Singh, 2016] analizó el efecto de las condiciones de corte (velocidad, avance y profundidad de corte) y la geometría de la herramienta (radio de punta) sobre la rugosidad de la superficie en torneado CNC de aluminio (6061) mediante DOE. [Ramachandra, 2017] implementó DOE para analizar los parámetros de mecanizado en el proceso de fresado para la tasa de remoción de material y la rugosidad de la superficie considerando los parámetros: velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de corte axial, profundidad de corte radial y el radio de punta. Como se puede ver, una gran parte de los casos revisados, estudiaron la variable de respuesta rugosidad, sin embargo, desde mi punto de vista y como se señaló anteriormente, el diámetro es una de las variables de respuesta que tiene efecto sobre la aceptación o rechazo de un producto terminado, por lo que para este estudio se contempló como variable de respuesta esta importante variable. Además, para esta investigación se consideró otra variable de respuesta importante que es el tiempo de procesamiento, el cual influye directamente en los costos de fabricación.

Por otro lado, [Jaupi, 2013] utilizó el estadístico T^2 Hotelling para construir gráficos de control multivariados, aplicado a un centro de mecanizado CNC multipropósito flexible, que produce pequeños lotes de repuestos para automóviles clásicos. [Senthilkumar, 2016] determinó el coeficiente de relación y el índice de rendimiento de respuesta múltiple, midiendo 3 variables de respuesta: desgaste de la herramienta, la rugosidad en la superficie terminada y el material removido en un torno. [Joshi, 2020] estudió una técnica de monitoreo de procesos estadísticos multivariados (MSPM) basada en visión artificial, usando el gráfico de control

estadístico multivariado T^2 Hotelling, aplicado a máquinas de torno convencionales. De igual manera [Tong, 2005] desarrolló un procedimiento novedoso utilizando el gráfico multivariante Hotelling, basado en el número de defectos y el índice de agrupación de defectos, en el control del proceso de fabricación de circuitos integrados. [Abo-Hawa, 2018] utilizó gráficos de control multivariados como T^2 Hotelling, así como índices de capacidad de proceso, para medir el rendimiento de un proceso de fabricación. [Pillet, 2013] Implementó el gráfico de control estadístico multivariado T^2 Hotelling en el caso del mecanizado de piezas mecánicas utilizando una herramienta de corte.

El diseño estadístico de experimentos (DOE) es la forma más eficaz de hacer pruebas. El DOE consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera. Además, El DOE permite clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras. Para una explicación más detallada del diseño de experimentos, se recomienda consultar [Gutiérrez-Pulido, 2008]. Por otra parte, el procedimiento de supervisión y control de procesos multivariados más conocido es el T^2 Hotelling, que consiste en una tabla de control para monitorear el vector medio del proceso. Es un análogo directo del gráfico univariante Shewhart. Hay dos versiones del gráfico T^2 Hotelling: una para subgrupos, y otro para observaciones individuales. Para una explicación más detallada del estadístico T^2 Hotelling, se recomienda consultar [Montgomery, 2009].

2. Método

Esta investigación se realizó mediante la implementación de DOE y el estadístico T^2 Hotelling. Para ello se utilizó como material un redondo de acero cold rolled 1045 con diámetro de 2" y 60 cm de largo, que se muestra en figura 1.

El proceso de corte se llevó a cabo en un torno CNC horizontal con un rango de velocidades de 1500 a 2000 revoluciones por minuto (RPM), que se muestra en figura 2.

Al redondo de acero cold rolled 1045, se le aplicó el proceso de torneado con la operación de cilindrado en el torno CNC horizontal, como se muestra a continuación en figura 3.



Figura 1 Redondo de acero cold rolled 1045.



Figura 2 Torno CNC horizontal.

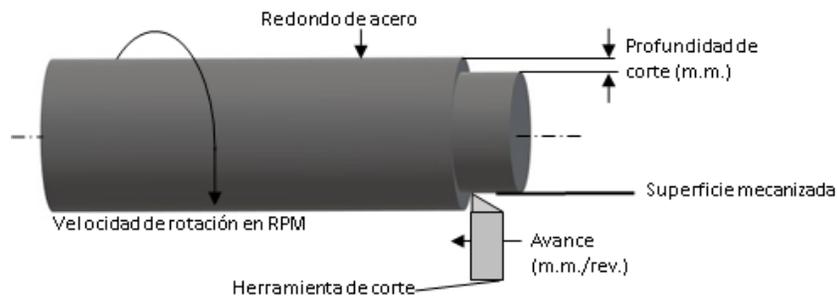


Figura 1 Proceso de torneado con operación cilindrado.

En figura 3 se puede observar el proceso de torneado con la operación cilindrado, donde se tiene por objeto lograr una superficie cilíndrica de menor diámetro que la original. Los diámetros y el tiempo de procesamiento de las piezas de trabajo son variables que dependen de los principales parámetros de corte estudiados como: Avance, Profundidad de corte y RPM. La herramienta de corte utilizada es de acero de alta velocidad de 1/2" de espesor con un afilado de 60 grados. En tabla 1 se visualizan los tres factores estudiados a través de los tres niveles codificados para el estudio de puntos centrales.

Tabla 1 Niveles codificados.

Niveles codificados	-1	0	1
RPM	1600	1800	2000
Profundidad de corte (mm)	0.5	1.5	2.5
Avance (mm/rev)	0.1	0.2	0.3

En la tabla 1 se puede observar los tres niveles codificados de los factores RPM, Profundidad de corte y Avance, para el estudio de los puntos centrales. Mediante la implementación de DOE, se diseñó un experimento Factorial 2^3 con dos puntos centrales y dos réplicas para cada una de las combinaciones. Con este arreglo experimental se generaron 18 corridas experimentales, mostradas en tabla 2, para medir las variables de respuesta: diámetros, con valor nominal de 46 mm, y tiempo de procesamiento, variable del tipo menor es mejor.

Tabla 2 Corridas experimentales.

OrdenEst	Orden Corrida	PtCentral	Bloques	RPM	Profundidad de corte (mm)	Avance (mm/rev)
12	1	1	1	2000	2.5	0.1
14	2	1	1	2000	0.5	0.3
3	3	1	1	1600	2.5	0.1
1	4	1	1	1600	0.5	0.1
10	5	1	1	2000	0.5	0.1
7	6	1	1	1600	2.5	0.3
15	7	1	1	1600	2.5	0.3
9	8	1	1	1600	0.5	0.1
4	9	1	1	2000	2.5	0.1
5	10	1	1	1600	0.5	0.3
17	11	0	1	1800	1.5	0.2
18	12	0	1	1800	1.5	0.2
16	13	1	1	2000	2.5	0.3
2	14	1	1	2000	0.5	0.1
8	15	1	1	2000	2.5	0.3
6	16	1	1	2000	0.5	0.3
13	17	1	1	1600	0.5	0.3
11	18	1	1	1600	2.5	0.1

En la tabla 2 se puede observar las 18 corridas experimentales indicando los niveles utilizados de los parámetros de maquinado estudiados, así como el orden aleatorio de las corridas. La variable de respuesta diámetro de cada pieza de trabajo, se obtiene a través de un micrómetro analógico Mitutoyo, mostrado en figura 4, donde se tiene como valor nominal 46 mm de diámetro en las piezas maquinadas.

En figura 4 se puede observar el micrómetro de exteriores analógico Mitutoyo. El funcionamiento del micrómetro se basa en un tornillo micrométrico movable, que

sirve para valorar el tamaño de un objeto con gran precisión, teniendo un rango de orden de hasta milésimas de milímetro (0.001mm). El micrómetro fue utilizado para realizar la medición de los diámetros, después de aplicar el proceso de torneado con operación cilindrado a las piezas.



Figura 2 Micrómetro Mitutoyo.

La variable de respuesta tiempo de procesamiento de las piezas, es tomada con el apoyo de un cronómetro. Siendo variable del tipo menor es mejor, tomando el tiempo a partir del inicio de operación del Torno CNC hasta su paro total, para cada una de las piezas maquinadas.

Para la implementación del estadístico T^2 Hotelling, se tomaron como variables de respuesta los diámetros y el tiempo de procesamiento de las piezas, y se construyó un gráfico de control multivariante T^2 Hotelling con observaciones individuales para verificar que el proceso está dentro de los límites de control.

De acuerdo a [Montgomery, 2009], el cálculo T^2 Hotelling para observaciones individuales esta dado por ecuación 1.

$$T^2 = (x - \bar{x})' S^{-1} (x - \bar{x}) \quad (1)$$

Donde:

- T^2 : Estadístico T^2 Hotelling.
- \bar{x} : Vector de medias.
- x : Observaciones.
- S^{-1} : Matriz de covarianzas.

De acuerdo con [Montgomery, 2009], en la Fase II, el límite de control superior para el estadístico T^2 Hotelling esta dado por la ecuación 2.

$$LCS = \frac{p(m+1)(m-1)}{m^2 - mp} F_{\alpha, p, m-p} \quad (2)$$

Donde:

LCS : Límite de control superior.

m : Número de muestras.

p : Número de características de calidad observadas en cada muestra.

F : Distribución de probabilidad F.

α : Nivel de significancia.

3. Resultados

De la implementación de DOE con las 18 corridas experimentales se obtuvieron las variables de respuesta: diámetros y tiempos de procesamiento, tabla 3.

Tabla 3 Variables de respuesta DOE.

OrdenEst	Orden Corrida	RPM	Profundidad de corte (mm)	Avance (mm/rev)	diámetros (mm)	Tiempo procesamiento (s)
12	1	2000	2.5	0.1	46	52
14	2	2000	0.5	0.3	46.02	55
3	3	1600	2.5	0.1	45.99	53
1	4	1600	0.5	0.1	46	98
10	5	2000	0.5	0.1	45.99	86
7	6	1600	2.5	0.3	46.01	42
15	7	1600	2.5	0.3	46.02	44
9	8	1600	0.5	0.1	45.99	95
4	9	2000	2.5	0.1	45.99	38
5	10	1600	0.5	0.3	45.99	65
17	11	1800	1.5	0.2	45.98	31
18	12	1800	1.5	0.2	45.97	35
16	13	2000	2.5	0.3	46.02	35
2	14	2000	0.5	0.1	45.98	92
8	15	2000	2.5	0.3	46.02	44
6	16	2000	0.5	0.3	46.01	62
13	17	1600	0.5	0.3	46.01	55.96
11	18	1600	2.5	0.1	46	55

En tabla 3 se puede observar la aleatorización de las 18 corridas del Diseño de Experimentos que se aplicó al Torno CNC, así como los 18 diámetros y tiempos de procesamiento obtenidos una vez que se realizó el corte del redondo de acero cold rolled 1045. Posteriormente, se obtuvo el análisis de varianza para la variable de respuesta diámetro que se muestra en tabla 4.

En tabla 4 se puede observar el Análisis de varianza del modelo estadístico, donde se visualizan los 3 factores estudiados, las interacciones y el efecto que tienen sobre la variable de respuesta diámetro. Con el apoyo del software Minitab se obtuvieron los efectos principales para la respuesta diámetro, figura 5.

Tabla 4 Anova.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	0.003544	0.000443	7.25	0.004
Lineal	3	0.00185	0.000617	10.09	0.003
RPM	1	0.000025	0.000025	0.41	0.538
Profundidad de corte	1	0.000225	0.000225	3.68	0.087
Avance	1	0.001600	0.001600	26.18	0.001
Interacciones de 2 términos	3	0.000250	0.000083	1.36	0.315
RPM*Profundidad de corte	1	0	0	0	1
RPM*Avance	1	0.000225	0.000225	3.68	0.087
Profundidad de corte*Avance	1	0.000025	0.000025	0.41	0.538
Interacciones de 3 términos	1	0.0001	0.000100	1.64	0.233
RPM*Profundidad de corte*Avance	1	0.000100	0.000100	1.64	0.233
Curvatura	1	0.001344	0.001344	22	0.001
Error	9	0.000550	0.000061		
Total	17	0.004094			

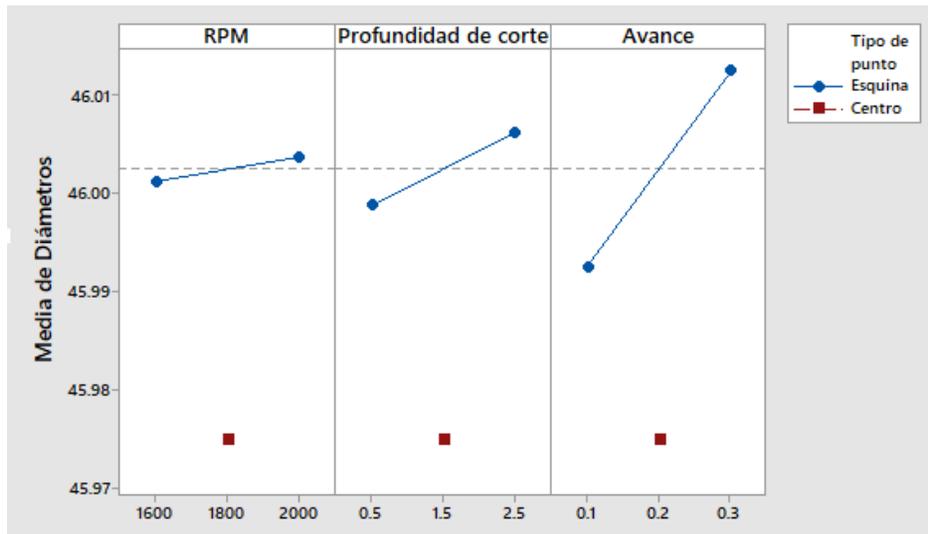


Figura 5 efectos principales para diámetros.

Con el apoyo del software Minitab se obtuvieron los residuos para diámetros, que se observa en figura 6. Se calcularon los residuos para la variable de respuesta tiempo de procesamiento, figura 7.

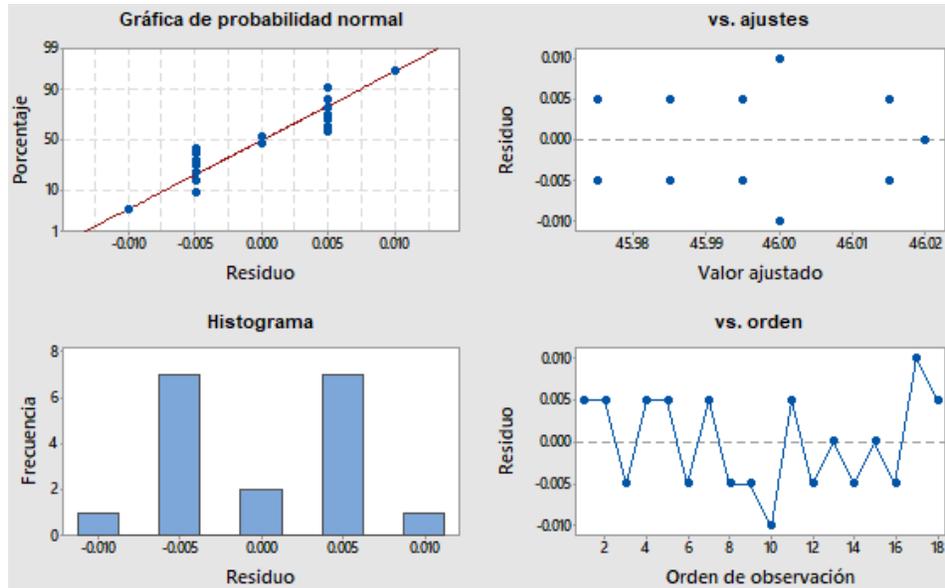


Figura 6 Residuos para diámetros.

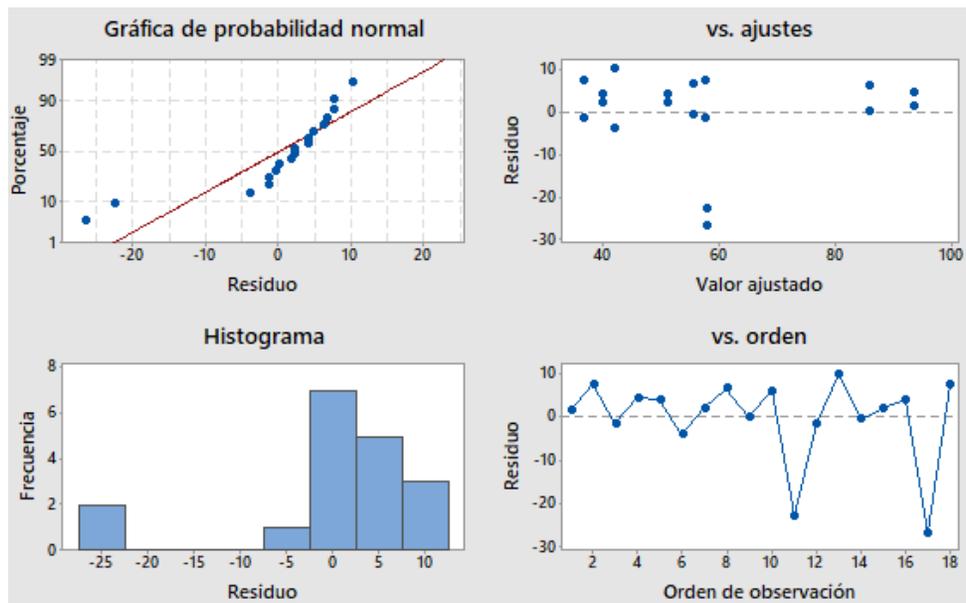


Figura 7 Residuos para tiempo de procesamiento.

Se generó el diagrama de Pareto para la variable de respuesta tiempo de procesamiento, figura 8.

Con el apoyo del software Minitab se obtuvo la gráfica de cubos para variable de respuesta diámetros, que se muestra en figura 9. Se puede observar la gráfica de cubos con medias ajustadas, para la variable de respuesta diámetros.

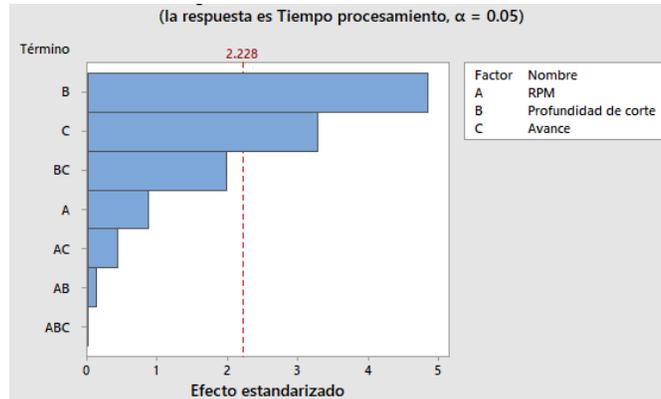


Figura 8 Diagrama de Pareto para tiempo de procesamiento.

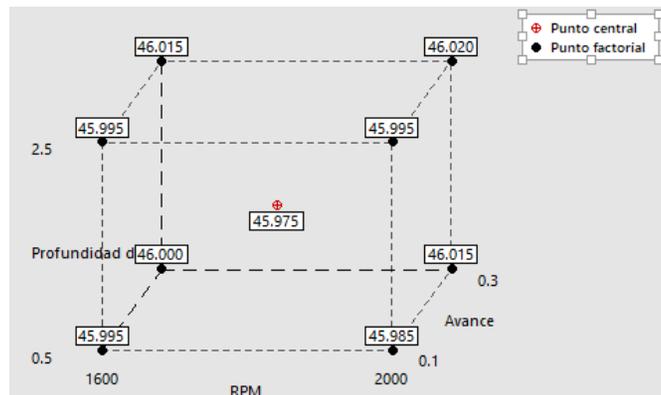


Figura 9 Gráfica de cubos.

Por otro lado, mediante las ecuaciones 1, 2, tabla 5 y tabla 6, se calculó el T^2 Hotelling y LCS para las observaciones individuales: x_1 diámetros y x_2 tiempos de procesamiento, mostrados en tabla 7.

Tabla 5 Matriz de covarianzas S.

0.00024	0
-0.06728	464.12558

Tabla 6 matriz S^{-1} .

4166.6667	0.0000
0.6040	0.0022

La tabla 5 muestra la matriz de covarianzas (S) utilizada para el cálculo de T^2 Hotelling. La inversa de la matriz de covarianzas (S^{-1}), utilizada para el cálculo de

T² Hotelling, se puede observar en tabla 6. Mediante cálculos de tabla 7, se obtuvo el gráfico T² Hotelling para observaciones individuales: x1 diámetros y x2 tiempos de procesamiento, figura 10.

Tabla 5 Cálculo T² Hotelling y LCS.

Pieza no.	x1 diámetro	x2 tiempo	Observación-media	Hotelling	LCS
1	46	52	0.0006	-5.6644	0.0685
2	46.02	55	0.0206	-2.6644	1.7428
3	45.99	53	-0.0094	-4.6644	0.4451
4	46	98	0.0006	40.3356	3.5202
5	45.99	86	-0.0094	28.3356	1.9399
6	46.01	42	0.0106	-15.6644	0.8931
7	46.02	44	0.0206	-13.6644	1.9932
8	45.99	95	-0.0094	37.3356	3.1621
9	45.99	38	-0.0094	-19.6644	1.3170
10	45.99	65	-0.0094	7.3356	0.4458
11	45.98	31	-0.0194	-26.6644	3.4204
12	45.97	35	-0.0294	-22.6644	5.1222
13	46.02	35	0.0206	-22.6644	2.5859
14	45.98	92	-0.0194	34.3356	3.7122
15	46.02	44	0.0206	-13.6644	1.9932
16	46.01	62	0.0106	4.3356	0.5324
17	46.01	55.96	0.0106	-1.7044	0.4596
18	46	55	0.0006	-2.6644	0.0157
Media x1=	45.9994	Media x2 =	57.6644		

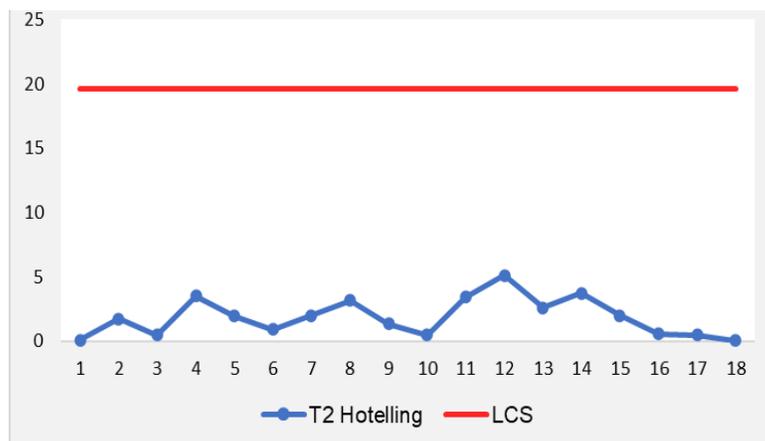


Figura 10 T² Hotelling.

4. Discusión

Del análisis de varianza de tabla 4 Anova, se puede observar que al obtener F_0 del factor avance = 26.18 > F de tablas = 5.12, por lo tanto, con un 95% de confianza se afirma que el factor avance es significativo estadísticamente sobre la respuesta

diámetro. Además, el valor P obtenido del factor avance = $0.001 < 0.05$, por lo tanto, se puede confirmar que el factor avance es significativo estadísticamente.

De igual manera en figura 5 efectos principales para diámetros, se puede visualizar que el factor avance tiene la mayor pendiente, por lo que se reafirma que este factor es significativo para la respuesta diámetro. Además, se puede apreciar que para la variable de respuesta nominal cuyo valor establecido es un diámetro de 46 mm, los puntos centrales en el efecto de curvatura no son la mejor respuesta.

De figura 6 residuos para diámetros, se puede verificar los supuestos de probabilidad normal, varianzas constantes, histograma y aleatorización del orden de las observaciones, por lo que se puede afirmar que se realizó la experimentación de una manera adecuada y que los datos estadísticos obtenidos son confiables.

De figura 7 residuos para tiempo de procesamiento, se puede observar que, en gráfica de probabilidad normal, los datos se ajustan a la recta. De gráfica de varianzas constantes no se presenta conicidad, por lo que se cumple el supuesto de valores ajustados. Del histograma, hay un grado de variabilidad de los datos. Y del gráfico de orden de observación, se aprecia un ligero patrón al inicio de la gráfica, por lo que no se cumple contundentemente el supuesto de independencia de los datos.

De figura 8 diagrama de Pareto para tiempos de procesamiento, se puede visualizar que los factores profundidad de corte y avance son significativos estadísticamente sobre la respuesta tiempos de procesamiento. Sin embargo, teniendo en cuenta la figura 7 residuos para tiempo de procesamiento, no se acepta contundentemente el diagrama de Pareto.

Analizando la gráfica de cubos de figura 9, se recomienda utilizar el factor A (rpm) a nivel bajo (1600 rpm), el factor B (Profundidad de corte) a nivel bajo (0.5 mm) y el factor C (Avance) a nivel alto (0.3 mm/rev), ya que con esta configuración de factores se obtiene el valor nominal de 46 m.m. de diámetro.

Por otro lado, de figura 10 T^2 Hotelling, se puede apreciar que las variables de respuesta x_1 : diámetros y x_2 : tiempo de procesamiento de las piezas, se encuentran bajo control estadístico en el proceso de corte de metal en el torno CNC, ya que los puntos graficados no superan el límite de control superior.

Se recomienda para futuras investigaciones: estudiar la temperatura del refrigerante, así como las herramientas de corte en cuanto al material de fabricación y formas, las cuales influyen en la vida útil de las mismas y el acabado de la pieza de trabajo. Además, se sugiere utilizar diferentes tipos de aceros para la pieza de trabajo y otros rangos de trabajo para los niveles codificados. También, se recomienda que la interacción RPM - Avance, así como el factor profundidad de corte pudieran examinarse más a fondo, para la respuesta diámetros. Por último, se aconseja estudiar a fondo la variable de respuesta tiempo de procesamiento, ya que tiene influencia directa en el costo de fabricación.

5. Bibliografía y referencias

- [1] Abo-Hawa, M. H.-D. (2018). Multivariate process Capability Assessment and Improvement: a case study. In Proceedings of the 18th Int. AMME Conference, (Vol. 3, p. 5).
- [2] Gutiérrez-Pulido. (2008). Análisis y diseño de experimentos. Ciudad de México, México: Editorial: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] Jaupi, L. H. (2013). Short-Run Multivariate Control Charts for Process Mean and Variability. In Proceeding of the World Congress on Engineering. London.
- [4] Joshi, K. N. (2020). Principal Components Based Multivariate Statistical Process Monitoring of Machining Process Using Machine Vision Approach. In New Paradigm of Industry 4.0, Springer, Cham., (pp. 145-160).
- [5] Mandal, N. K. (2017). Modelling and optimisation of a sustainable manufacturing process with cnc turning centre. International Journal of Applied Environmental Sciences, vol. 12 (6), p. 1101-1116.
- [6] Montgomery, D. C. (2009). Introduction to Statistical Quality Control, Sixth Edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Pawar, P. B. (2018). Investigation of Cutting Force of the AISI D2 Steel in the CNC Turning Process. International Journal of Engineering Technology Science and Research , ISSN 2394 – 3386 Volume 5, Issue 3.
- [8] Pillet, M. B. (2013). Multivariate SPC for total inertial tolerancing. International Journal of Metrology and Quality Engineering, vol. 4, no 3, p. 169-175.

- [9] Pérez, L. R. (2015). Predicción de la Rugosidad Superficial del Acero cold rolled 1018 a través de la Metodología de Superficie de Respuesta y Redes Neuronales. *Cultura Científica y Tecnológica*. (10).
- [10] Ramachandra, R. (2017). Scenario of surface roughness and material removal rate of h 13 mould steel in CNC end milling process. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, vol. 6, no 6, p. 322-327.
- [11] Rao, H. P. (2017). Optimization of CNC End Milling Process Parameters for Aluminium 6061 Alloy using Carbide Tool Material by Design of Experiments. *International Journal*, vol. 3, p.84-90.
- [12] Rico, L. N. (2010). Effect of cutting parameters on the roundness of cylindrical bars turned of 1018 steel. *Measurements.*, 132-135.
- [13] Sakthivelu, S. &. (2017). Investigating the Effect of Machining Parameters in CNC Turning Using DOE Technique. *Work*, 2(02), p.13-18.
- [14] Senthilkumar, N. S. (2016). Optimization and performance analysis of uncoated and coated carbide inserts during hard turning AISI D2 steel using hybrid GRA-PCA technique. In *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications., (Vol. 852, pp. 151-159).
- [15] Singh, D. C. (2016). Effect of nose radius on surface roughness during CNC turning using response surface methodology. . *International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5(2), p. 31-45.
- [16] Srivastava, A. S. (2019). Prediction of Surface Roughness for CNC Turning of EN8 Steel Bar Using Artificial Neural Network Model. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 52(2), p. 185-188.
- [17] Sukumar, M. S. (2014). Optimization and prediction of parameters in face milling of Al-6061 using Taguchi and ANN approach. *Procedia Engineering*, vol. 97, p. 365-371.
- [18] Tong, L. I. (2005). Monitoring defects in IC fabrication using a Hotelling T/sup 2/control chart. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, 18(1), 140-147.