

Propuesta de un modelo económico de operaciones de manufactura en torno por control numérico computacional

CERVANTES-MALDONADO, Alfonso†*

Universidad Nacional Autónoma de México

Recibido 2 de Agosto, 2017; Aceptado 28 de Septiembre, 2017

Resumen

El presente artículo presenta una propuesta para la elaboración de un modelo económico de operaciones de manufactura en torno por control numérico computacional que toma en cuenta factores humanos, técnicos y materiales. El modelo propuesto tiene la finalidad de contar con información adecuada para establecer parámetros efectivos para la toma de decisiones en el proceso de producción de una pieza en una máquina de torno por control numérico computacional. El proceso contempló la realización de un diseño experimental para identificar parámetros adecuados de operación que permitan reducir los tiempos de ciclo del maquinado y el desgaste de la herramienta, adicionalmente se analizaron los factores de diseño y programación de la pieza, tiempos de preparación, maquinado, materiales y medición de la calidad. Mediante el diseño experimental se identifican los parámetros de operación más adecuados para la estandarización en el maquinado de una pieza tipo empleada para el presente estudio, de la misma manera se identifican los diferentes factores a contemplar en el modelo económico de manufactura en torno por control numérico computacional.

Control computacional, Modelo económico, Manufactura

Abstract

This paper presents a proposal for the elaboration of an economic model of manufacturing operations around computer numerical control that takes into account human, technical and material factors. The proposed model has the purpose of having adequate information to establish effective parameters for decision making in the production process of a part in a lathe machine by numerical control. The process involved the realization of an experimental design to identify suitable operating parameters to reduce machining cycle times and tool wear, as well as the factors of design and part programming, preparation times, machining, materials and quality measurement. The experimental design identifies the most appropriate operating parameters for the standardization in the machining of a type piece used for the present study, in the same way that the different factors to be considered in the economic model of manufacturing around by computer numerical control.

Computational control, Economic model, Manufacturing

Citación: CERVANTES-MALDONADO, Alfonso. Propuesta de un modelo económico de operaciones de manufactura en torno por control numérico computacional. Revista de Ingeniería Industrial 2017. 1-1:41-47

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: acervantm@gmail.com

Introducción

La tecnología ha sufrido cambios muy importantes en los últimos años, el área de la manufactura no es la excepción, la incursión de tecnologías de información y comunicación en los diferentes ámbitos ha permitido la transformación de los procesos productivos para hacerlos más competitivos.

La competitividad que buscan las organizaciones en la actualidad, las obliga a mejorar sus procesos y hacerlos más eficientes, con puntos de comparación de empresas con los mejores niveles, de manera que sea necesario cuidar todos los aspectos de manera que no se dejen áreas de oportunidad sin cubrir que impacten en la competitividad de estas organizaciones.

Los procesos de maquinado en torno en la actualidad son mucho más productivos que en el pasado, en la actualidad es común encontrar tornos que cuentan con control numérico computacional y la interacción con sistemas CAD/CAM (de diseño asistido por computadora y manufactura asistida por computadora), que permiten la optimización de operaciones de maquinado en cuanto a tiempos de proceso y estandarización.

Uno de los aspectos que han sido poco abordados en el maquinado en torno es el de los costos, que regularmente se trabajan con estimaciones que en ocasiones no consideran de manera adecuada los diferentes factores, lo que impacta en los costos y en la competitividad de estas organizaciones.

Existen diferentes modelos económicos para operaciones de maquinado que consideran factores técnicos principalmente, sin tomar en cuenta elementos del recurso humano y que en algunas ocasiones se consideran tiempos de procesos.

Estrems (2007) menciona que las técnicas de corte de metales han sufrido una notable evolución hasta llegar a las máquinas herramienta de control numérico de nuestros días, que son capaces de llevar a cabo operaciones de corte complicadas mediante la ejecución de un programa. El desarrollo de estos procesos ha venido marcado por factores tales como la obtención de mecanismos capaces de articular el movimiento de corte, la implantación de técnicas de control numérico y la investigación acerca de nuevos materiales para herramientas.

De acuerdo con Escamilla (2004) El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la parte deseada.

Es posible realizar maquinados en diferentes materiales, los materiales más comunes en la actualidad son metales sólidos como acero, latón, aluminio y algunos materiales plásticos muy frecuentemente utilizados en la industria como el nylamid que es un material derivado de un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas.

El maquinado en torno consiste en una pieza cilíndrica de material que gira mientras una herramienta de corte va retirando el material sobrante de acuerdo a la geometría que se requiere, en este caso con una base cilíndrica para el caso del torno, y que en el caso de otros tipos de maquinado como el fresado se pueden obtener otros tipos de geometrías regulares. Las combinaciones de diferentes técnicas de maquinado pueden ayudar a producir diferentes geometrías de mayor complejidad.

La generación de un modelo económico que considere los principales factores del proceso de maquinado puede ser de utilidad para las organizaciones dedicadas al maquinado de piezas, aportando elementos básicos a considerar para la realización de un nuevo proyecto de maquinado de piezas.

Metodología

En la literatura actual sobre modelos económicos para los procesos de maquinado los autores consideran diferentes factores. En el presente trabajo se presenta una propuesta de un modelo que considera los factores desde un enfoque de procesos.

La metodología utilizada fue la siguiente:

1. Identificación de factores de operación (RPM's, avance y dureza del material).
2. Diseño experimental factorial multinivel 3^3 (tres factores y tres niveles) de respuesta múltiple (con dos respuestas), con 27 tratamientos de acuerdo al experimento de Cervantes y Romero (2017).
3. Identificación de valores críticos (RPM's, avance, dureza, tiempo de maquinado, desgaste de herramientas de corte).
4. Identificación de costos (materia prima, mano de obra, operación de maquinaria, desgaste de herramientas, posicionamiento de herramientas, programación, pruebas, mantenimiento).
5. Medición de parámetros de tiempos y costos.
6. Propuesta de modelo económico.

Desarrollo

Los factores de operación iniciales que se consideraron son los RPM's, el avance del corte y la dureza del material, el diseño experimental factorial multinivel 3^3 se definió de la siguiente manera:

Factor/Nivel	-1	0	1
RPM	2500	3500	4500
Avance	0.1	0.2	0.3
Dureza	213	218	224

Tabla 1 Factores del diseño experimental
Fuente: elaboración propia

La tabla 1 presenta los factores tomados en cuenta en el diseño experimental, el factor RPM muestra la velocidad de giro en revoluciones por minuto considerando tres niveles, 2500 rpm, 3500 rpm y 4500 rpm; el factor avance considera el desplazamiento de la herramienta de corte en tres niveles, 0.1 mm, 0.2 mm y 0.3 mm; y el factor dureza que considera la dureza HBW asociada al tipo de material en donde se consideraron tres factores, 213, 218 y 224, de los tipos de acero 440, 4090 y 4040 respectivamente.

La tabla 2 muestra el diseño experimental propuesto, en donde se identifica un diseño factorial 3^3 (con tres factores y tres niveles) y la variable de respuesta del tiempo de proceso, donde es posible identificar que es un experimento sin réplicas con 27 tratamientos en un solo bloque.

Tratamiento	RPM	Avance	Dureza	Tiempo
1	-1	-1	-1	2.34
2	0	-1	-1	2.34
3	1	-1	-1	2.33
4	-1	0	-1	1.85
5	0	0	-1	1.82
6	1	0	-1	1.82
7	-1	1	-1	1.65
8	0	1	-1	1.63
9	1	1	-1	1.61
10	-1	-1	0	2.41
11	0	-1	0	2.4
12	1	-1	0	2.38
13	-1	0	0	1.96
14	0	0	0	1.87
15	1	0	0	1.87
16	-1	1	0	1.73
17	0	1	0	1.7
18	1	1	0	1.69
19	-1	-1	1	2.47
20	0	-1	1	2.43
21	1	-1	1	2.41
22	-1	0	1	2.12
23	0	0	1	2.1
24	1	0	1	2.1
25	-1	1	1	1.84
26	0	1	1	1.81
27	1	1	1	1.74

Tabla 2 Diseño experimental propuesto

Fuente: *Elaboración propia*

El análisis de la información se realizó mediante la aplicación de diseño experimental del software Statgraphics Centurion VXI. Se contrastaron modelos de regresión de primer orden y de segundo orden, considerando las interacciones de los diferentes factores.

La tabla 3 presenta los coeficientes de determinación y correlación de los modelos de primero y segundo orden.

Modelo	Coeficiente de Determinación (R ²)	Coeficiente de Correlación (R)
Primer orden	.957843	.978694
Segundo orden	.985611	.993232

Tabla 3 Coeficientes de determinación y correlación del modelo

Fuente: *elaboración propia utilizando el software Statgraphics Centurión XVI*

De acuerdo con los resultados de la tabla 3, se propone el modelo de segundo orden, de acuerdo a los coeficientes de determinación y de correlación.

El valor del coeficiente de determinación (R²) es del 98.6511 %, lo que indica que este modelo explica el 98.6511% de la variabilidad en la variable de respuesta Tiempo. De esta manera la ecuación de regresión para el tiempo es la siguiente: $Tiempo = 1.92667 - 0.0233333 * RPM - 0.339444 * Avance + 0.0905556 * Dureza + 0.00666667 * RPM^2 - 0.00666667 * RPM * Avance - 0.00833333 * RPM * Dureza + 0.105 * Avance^2 + 0.0166667 * Avance * Dureza + 0.0216667 * Dureza^2$.

La tabla 4 presenta el análisis de varianza de los factores definidos en el experimento (RPM, Avance y Dureza).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:RPM	0.0098	1	0.0098	5.29	0.0345
B:Avance	2.07401	1	2.07401	1118.52	0.0000
C:Dureza	0.147606	1	0.147606	79.60	0.0000
AA	0.000266667	1	0.000266667	0.14	0.7092
AB	0.000533333	1	0.000533333	0.29	0.5987
AC	0.000833333	1	0.000833333	0.45	0.5116
BB	0.06615	1	0.06615	35.67	0.0000
BC	0.00333333	1	0.00333333	1.80	0.1976
CC	0.00281667	1	0.00281667	1.52	0.2345
Error total	0.0315222	17	0.00185425		
Total (corr.)	2.33687	26			

Tabla 4 Análisis de Varianza para Tiempo

Fuente: *elaboración propia utilizando el software Statgraphics Centurión XVI*

En la tabla anterior (tabla 4) es posible visualizar que los tres factores definidos (RPM, Avance y Dureza) son significativos a un nivel alfa de 0.05, en este caso los dos factores con mayor nivel de significancia para la variable de respuesta tiempo son el avance y la dureza. El factor de revoluciones por minuto (RPM's) es significativo con valor p de 0.0345 por lo que se identifica como un factor importante en el modelo después del avance y la dureza, en el caso de las interacciones no se identifica significancia con excepción de la interacción BB que corresponde al cuadrado del avance de la herramienta de corte de acuerdo al modelo de segundo orden identificado.

La tabla 5 muestra los valores óptimos codificados que permiten contar con el valor mínimo del tiempo de maquinado.

Factor	Establecimiento
RPM	-0.0532833
Avance	0.565463
Dureza	-0.999999

Tabla 5 Factores establecidos y Óptimo

Fuente: elaboración propia utilizando el software Statgraphics Centurión XVI

En lo referente a los resultados del diseño experimental, decodificando los valores se obtiene la tabla 6 que presenta los parámetros óptimos que minimizan el tiempo de maquinado

Factor	Establecimiento
RPM	3447 rpm
Avance	0.253 mm
Dureza	213 HBW

Tabla 6 Parámetros óptimos de maquinado

Fuente: Elaboración propia utilizando el software Statgraphics Centurión XVI

En la tabla 6 es posible identificar que el valor óptimo para el factor RPM corresponde a 3447 revoluciones por minuto.

Así como el valor del avance es de $f=0.253$ mm y el valor de la dureza es de 213 HBW que corresponde a un acero 4140. Estos parámetros son los que se indican como óptimos para el proceso ya que minimizan el tiempo del proceso de maquinado. Sustituyendo los parámetros en la ecuación de regresión del modelo de segundo orden propuesto se tiene un tiempo de proceso de 1.69 minutos por pieza.

Para la identificación de los costos del proceso de maquinado se realizó la reproducción del proceso y se obtuvo el tiempo estándar de cada actividad, posteriormente se realizó un análisis de todas las actividades necesarias para contemplarlas dentro de la propuesta del modelo económico, quedando de la siguiente manera:

$$CT = \frac{cmp+cmo+cop+cpp+cac}{n} \quad (1)$$

Donde:

CT = costo total

cmp = costo de materia prima

cmo = costo de mano de obra

cop = costo de operación

cpp = costo de preparación y posicionamiento

cac = costo de aseguramiento de calidad

n = número de piezas totales del lote

$$cmp = l_{pieza} * a_{pieza} * n * 1.4 * plap \quad (2)$$

Donde:

cmp = costo de materia prima

l_{pieza} = longitud de pieza

a_{pieza} = ancho máximo de pieza

n = número de piezas

plap = precio de longitud x ancho de pieza

1.4 = factor determinado

experimentalmente para la pieza tipo

$$cmo = (tmp + tnm + tch) * n * cmo \quad (3)$$

Donde:

cmo = costo de mano de obra
 tmp = tiempo de maquinado de pieza
 tnm = tiempo de no maquinado
 tch = tiempo de cambio de herramientas
 n = número de piezas
 cmoh = costo de mano de obra por hora

$$cop = \text{costos de operación del equipo por hora} \quad (4)$$

cop = para el caso de la pieza tipo se realizó la experimentación y se obtuvo un costo de operación de USD\$11.9 x hora, el costo contempla el mantenimiento preventivo del equipo y los costos asociados por consumos energéticos.

$$cpp = tpr + tpo \quad (5)$$

Donde:

tpr = tiempos de preparación entre cada pieza (contempla la obtención del “cero” de pieza en el eje Z)

tpo = tiempos de posicionamiento (contempla el tiempo de cambio de herramientas y obtención del “cero” de las herramientas en los ejes X y Z)

$$cac = tmdp + trdp + tasc \quad (6)$$

Donde:

tmdp = tiempo de medición de dimensiones de pieza (por muestreo MIL STD 105E)

trdp = tiempo de registro de dimensiones de pieza

tasc = tiempo de análisis del sistema de calidad

Conclusiones

Los procesos de maquinado en la actualidad son cada vez más complejos y de la misma manera brindan la posibilidad de realizar trabajos con niveles de especificaciones cada vez más estrictos.

Son muchos los factores que intervienen, desde la mano de obra especializada en diferentes áreas como diseño, programación, tecnología de materiales, operación de torno por control numérico computacional, estudio del trabajo y control de la calidad, donde en ocasiones un equipo de una a tres personas realiza todas las actividades mencionadas.

Los costos de maquinado en México están relacionados principalmente con el tipo de cambio del dólar de los Estados Unidos de América, por lo que tanto insumos, insertos, herramientas, solubles y los diferentes materiales a maquinar están tasados en esa moneda por lo que existe una dependencia directa con el tipo de cambio mencionado anteriormente.

El diseño experimental propuesto forma parte de una serie de acciones para la generación de un modelo económico de manufactura en torno por control numérico computacional para una pieza modelo, en donde a partir de las diferentes especificaciones que se puedan tener en futuras piezas será posible determinar los ajustes en los parámetros para obtener las piezas en tiempos mínimos y de acuerdo a las nuevas especificaciones por ejemplo en el material a utilizar.

El presente modelo es un primer paso para la intervención en las organizaciones de maquinado de piezas en la región.

Que permitirá la difusión de los factores más significativos y la sensibilización y conocimiento de mejores prácticas de manufactura para apoyar principalmente a las PYMES de este sector y posteriormente poder realizar comparaciones con las grandes empresas que utilizan estas tecnologías.

Como futuras actividades para la generación del modelo, se realizará un análisis de desperdicios, de tiempos de recarga de material y de los diferentes métodos de medición de las piezas y de la recarga para lotes de piezas, así como los costos asociados a los diferentes métodos.

Agradecimientos

El presente proyecto fue realizado con apoyo de la Secretaría de Innovación Ciencia y Educación Superior mediante el programa Investigadores Jóvenes 2016, convenio: 112/2016 ENES-UNAM.

Referencias

Castaño, E., Domínguez, J. (2008). *Diseño de Experimentos para el desarrollo tecnológico y mejora industrial*. (2a ed.). México: Just In Time Press.

Cervantes, A. y Romero, M. (2017). Propuesta de diseño experimental para un modelo económico de manufactura en torno por control numérico computacional. *Memorias del 4º coloquio en desarrollo económico, sustentabilidad, innovación y tecnología*. México.

Chen, M. C. & Su, C. T. (1998). Optimization of Machining Conditions for Turning Cylindrical Stocks into Continuous Finished Profiles. *International Journal of Production Research*, 36:8, 2115-2130.

Coronado, J. J. (2004). Economía en el maquinado para la industria metalmecánica. *Journal of Management and Economics for Iberoamerica*. Elsevier.España.

Díaz del Castillo, F. (2010). *Máquinas CNC, Robots y la Manufactura Flexible*. México: FES Cuatitlán, Departamento de Ingeniería

Duffuaa, S. O. & Shuaib, A. N. (1995). Rejoinder to Sarper's Note on the Machining Economics Optimization. *Computers Pos. Res.*, 22, 249-250.

Escalante, E. (2006). *Seis-sigma Metodología y Técnicas*. México: Limusa.

Escamilla, I. G. (2004). Optimización de las variables envueltas en el maquinado en un torno de control numérico computarizado. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Estrems, M. (2007). Principios de mecanizado y planificación de procesos. Departamento de ingeniería de materiales y fabricación, Universidad de Cartagena, Colombia.

Gutiérrez, H., De la Vara, R. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: McGraw Hill.

Lakovou, E., Ip, C. M., & Koulamas, C. (1996).

Optimal Machining Speed and Tool Inventory Policies in machining Economic Systems. IIE Transactions, 28, 601-608.

Montgomery, D. (2012). *Diseño y Análisis de Experimentos*. México: Limusa-Wiley.

Torres, C., Caudillo, M., Cervantes, J., Arroyo, B. (2008). Análisis y proyección económica del proceso de torneado CNC. *Memorias del 14 congreso internacional anual de la SOMIM*, 651-659.