

Tema A2a Manufactura: Manufactura sustentable

“Estudio de factores críticos y consumo energético para acero 1045 en maquinado CNC”

Álvaro Ayala^a, Rocío Soladana, Thanya Ortega

^aFacultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México Av. Universidad 3000, Ciudad de México, 04510, México, maktub10@yahoo.com

RESUMEN

El sector manufacturero se ha convertido en un importante impulsor del crecimiento económico en el mundo; sin embargo, es en gran medida es de principales responsables del cambio de temperatura en el planeta y por tanto, la causa principal del aumento de las emisiones de carbono que deterioran el equilibrio entre el medio ambiente y el uso de recursos naturales. En procesos de manufactura, principalmente en mecanizado mecánico, más del 90% del impacto ambiental se debe a la demanda energética de las máquinas herramientas CNC.

El estudio de factores críticos y consumo energético busca ser parte de la solución, que requiere implementarse para aumentar el rendimiento y productividad, reduciendo los costos energéticos de los productos manufacturados. En este trabajo se evalúa una de las estrategias más usadas para la manufactura de cavidades en acero 1045, con la idea de evaluar la influencia de los parámetros de corte en el consumo de energía eléctrica y el acabado superficial.

Palabras Clave: Manufactura sustentable, CNC, CO₂, Impacto ambiental

ABSTRACT

The manufacturing sector has become an important driver of economic growth in many countries; however, this makes it an important energy consumer and, therefore, the main cause of the increase in carbon emissions that deteriorate the balance between the environment and the use of natural resources. In manufacturing processes, mainly in mechanical machining, more than 90% of the environmental impact is due to the energy demand of the machine tools.

The study of critical factors and energy consumption seeks to be part of the solution that needs to be implemented to increase performance and productivity, reducing the energy intensity of manufactured products and the costs involved. Using a Haas VF1 vertical milling machine, a cutting cavities strategy in 1045 steel is evaluated, defining three levels for the cut parameters studied and correlating the energy consumption and the surface finish.

Keywords: Sustainable Manufacturing, CNC, CO₂, Environmental impacts

1. Introducción

Las preocupaciones sobre el proceso de fabricación eficiente desde el punto de vista energético y ambientalmente amigable se han convertido en un problema emergente ante el incremento de la demanda de piezas maquinadas, debido a que las fuentes de energía ricas en carbono y los combustibles fósiles aún dominan la generación de energía eléctrica [1].

La electricidad es la principal fuente de energía para centros de maquinado en procesos de corte como el fresado, por lo que diversos autores han estudiado el consumo energético

de los mismos.

De acuerdo con Aramcharoen y Mativenga, el consumo de energía incluye las demandas del husillo, movimiento de los ejes, resistencia al corte (materiales de la pieza de trabajo, herramienta de corte y condiciones de corte) y otros como la bomba de fluido de corte, dispositivo de enfriamiento y el controlador de la computadora [2]. Kordonowy clasificó el consumo de energía en dos tipos: constante y variable. El primero depende de los diversos módulos de la máquina herramienta, los cuales tienen influencia durante el arranque y funcionamiento. La velocidad de remoción de material es considerada como influencia variable [3].

La estimación de la energía de corte en el proceso de

remoción de material puede lograrse a través de la energía específica de corte en la formación de viruta, que es la energía mínima requerida para eliminar un volumen de material. Esto depende de la maquinabilidad del material, que a su vez depende de las propiedades del material, el fluido de corte, la herramienta de corte y las condiciones de corte.

Al estudiar la influencia del espesor de las virutas y la velocidad de avance sobre la energía de corte específica, Balogun y Mativenga reportaron que el consumo específico de energía en procesos de desbaste puede ser reducido por manufacturar a un avance mayor [4]. Sin embargo, en la práctica, la energía consumida por el mecanizado es mucho mayor que la energía de corte específica debido a que el centro de maquinado está compuesto por una gran variedad de funciones tales como manipulación y movimiento de piezas, sistema de fluidos de corte, extracción de virutas, cambio de herramientas y medición de herramientas.

Li y Kara afirmaron que el consumo de energía en operaciones de maquinado puede ser reducido seleccionando centros de maquinado con requerimientos de energía básico y bajos; el modelo que propusieron sugiere que, a una mayor tasa de eliminación de material, menor energía será consumida mejorando la productividad [5]. Tiempo después Li colaboró con Yan para determinar la influencia de la velocidad del husillo, velocidad de avance, profundidad y ancho de corte en el proceso de fresado [6]. Campatelli, Lorenzini & Scippa también evaluaron la influencia de la velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de corte axial y radial en el fresado de acero al carbono [7]. Todos los trabajos realizados mostraron que, para lograr una huella ambiental más baja, la tasa de eliminación de material debe aumentarse.

Kong y otros evaluaron la influencia de la trayectoria en el impacto ambiental, el modelo de energía propuesto se compone de una parte constante, tiempo de ejecución y etapa de corte, denotando que la selección de trayectoria influye en el consumo de energía [8].

Aramcharoen y Mativenga analizaron el consumo de energía en la creación de cavidades en acero inoxidable con diferentes estrategias de corte; concluyeron que este depende del tiempo del ciclo debido a la selección de la trayectoria y el modo de corte. Las trayectorias más eficientes en términos de energía son contorno y espiral, seguidas de zigzag. A su vez, estas tres estrategias obtuvieron los mejores resultados en cuanto a tiempo y rugosidad superficial. Además, afirmaron que el desgaste de las herramientas juega un papel importante en el aumento de la demanda de energía. Por lo tanto, la optimización del proceso para minimizar el desgaste de las herramientas o el desarrollo avanzado de herramientas de corte puede ayudar a promover procesos de mecanizado más eficientes desde el punto de vista energético [1].

De acuerdo con Rajme y Buensuceso, la combinación de los parámetros y la estrategia de corte, define la demanda de potencia en el maquinado. Corroborar la relación directa entre la tasa de remoción de material y la potencia necesaria para el corte. A su vez, encontraron que el avance

por diente es un factor de poca influencia [9].

El presente trabajo explora los requerimientos energéticos de las máquinas CNC, basados en estrategias de manufactura y direcciones de corte estandarizadas.

2. Desarrollo

Para determinar la influencia y relación de los parámetros de corte involucrados en el maquinado de cavidades mediante una trayectoria en zig-zag en dirección X, se establecieron las dimensiones de las cavidades como 28 x 34 mm. El material seleccionado es acero 1045, ya que puede ser forjado con martillo, responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, sumamente útil para la fabricación de diversos componentes de maquinaria (Fig.8).

Por las características de este material, se utilizó un cortador CoroMill Plura 2P340-0800-PA 1630 de SANDVIK Coromant de ocho milímetros de diámetro; con base en las recomendaciones de SANDVICK en su catálogo de cortadores CoroMill Pura grados GC1620, GC1630 y H10F, se determinó que el límite máximo permitido de la velocidad de corte fuera igual a 130 [m/min]; 117 y 104 [m/min] como nivel medio y bajo respectivamente.

Para determinar los niveles alto, medio y bajo de la profundidad de corte, se estableció en profundidad de corte total de 6 [mm] para poder asignar niveles de la misma longitud y tener una buena distribución, además, se consideró permanecer dentro del rango de medición del rugosímetro empleado. El nivel bajo, correspondiente a tres pasadas es 2 [mm], el nivel medio, con dos pasadas es 3 [mm] y el nivel alto que se alcanza con sólo una pasada es igual a 6 [mm] (Tabla1).

Tabla 1. Valores de factores para cada tratamiento

Niveles	Velocidad de corte [m/min]	Profundidad de corte[mm]
alto	130	6
medio	117	3
bajo	104	2

Tanto el traslape como el avance por diente se establecieron como parámetros fijos: 17% del diámetro del cortador y 0.033 [mm/diente]; respectivamente ya que con base en los estudios realizados por Rajme y Buensuceso, la influencia del avance por diente es prácticamente nula.

Se definió un arreglo ortogonal L-9, correspondiente a un caso de dos factores con tres niveles cada uno, que consiste en realizar 9 experimentos.

A partir de los niveles y combinaciones correspondientes, se programaron códigos G y M para realizar los maquinados con ayuda de un generador de código de control numérico.

El experimento de corte se realizó en un centro de maquinado vertical VF1, Haas; el consumo de energía se adquirió con el analizador de redes marca FLUKE 435 series II y la rugosidad con un rugosímetro marca Mitutoyo SJ210. En la figura se muestra la metodología seguida para evaluar

el consumo de energía eléctrica y su efecto en el medio ambiente.

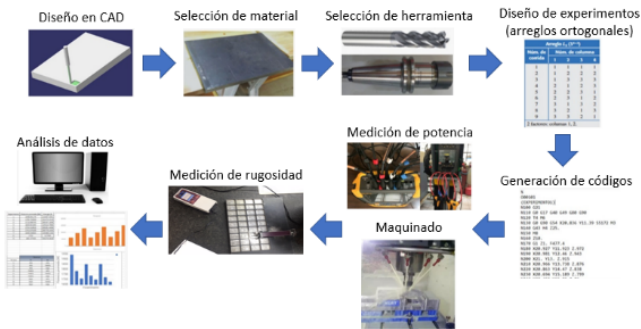


Figura 1. Método a seguir, según el diseño del experimento.

3. Resultados

3.1. Caso consumo energético-potencia

Los parámetros de corte utilizados se pueden ver en la tabla 1. Para este caso de estudio se evaluó la potencia (Tabla 2 y Fig. 2) considerando un ciclo de manufactura, el cual inicia en el punto de referencia, realiza el maquinado y regresa al punto de referencia.

Tabla 2. Potencia promedio obtenida.

Experimento	Potencia promedio [W]
1	1946.941176
2	1785.730858
3	1712.086743
4	1853.921933
5	1741.316916
6	1701.674208
7	1855.530822
8	1725
9	1681.07438

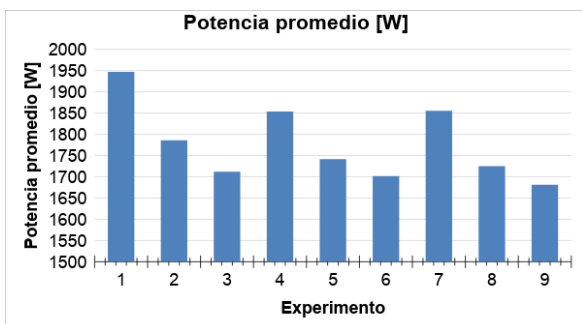


Figura 2. Gráfico experimento-potencia promedio.

Con base en el análisis multifactorial ANOVA se obtiene la influencia de los dos factores considerados, la cual se muestra en la figura 3.

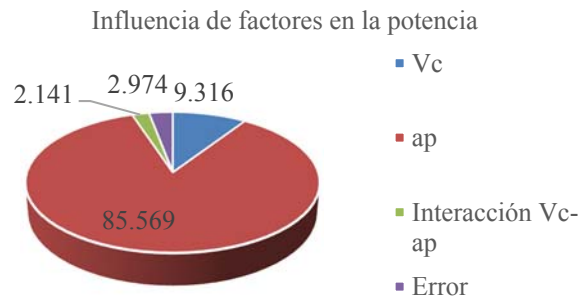


Figura 3. Influencia de factores en el estudio de potencia.

En la tabla 3 y la figura 4 se observa que, como era de esperarse, el tiempo de manufactura afecta los ciclos de maquinado en el consumo energético final.

Tabla 3. Energía promedio obtenida.

Experimento	Potencia promedio [W]	Tiempo [s]	Energía [J]
1	1946.941176	63	122657.294
2	1785.730858	107	191073.202
3	1712.086743	152	260237.185
4	1853.921933	67	124212.77
5	1741.316916	115	200251.445
6	1701.674208	165	280776.244
7	1855.530822	72	133598.219
8	1725	126	217350
9	1681.07438	181	304274.463

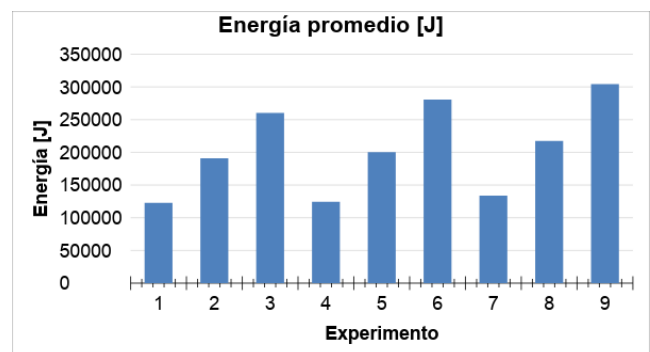


Figura 4. Gráfica experimento-energía.

Con un nivel de significancia de $\alpha=0.01$, se puede afirmar que la media de los datos de potencia promedio son estadísticamente similares.

3.2. Caso consumo energético-acabado superficial

Para relacionar el consumo energético con la rugosidad obtenida en cada uno de los experimentos y sus réplicas, se

tomaron tres mediciones de rugosidad Ra de cada una de las cavidades (Tabla 4, Fig5.).

Tabla 4. Rugosidad superficial promedio de cada tratamiento.

Experimento	Ra promedio [μm]
1	1.504
2	1.226
3	0.994
4	1.413
5	1.268
6	1.093
7	1.300
8	1.267
9	1.101

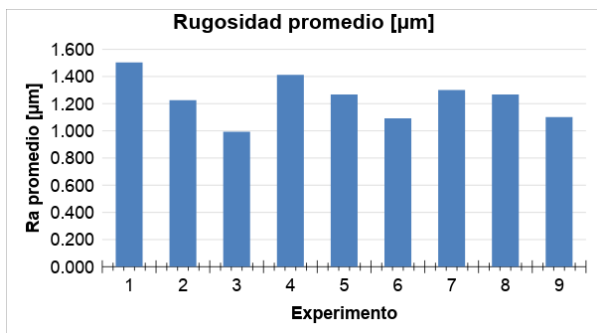


Figura 4. Experimento-rugosidad superficial.

Al realizar el análisis de varianzas con la rugosidad superficial, la influencia de los parámetros obtenida se muestra en la figura 5.

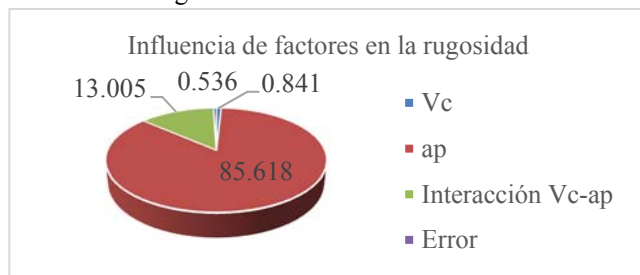


Figura 5. Influencia de factores en el estudio de rugosidad.

Con un nivel de significancia de $\alpha=0.01$, se puede afirmar que, al replicar el experimento, la media de los datos de rugosidad promedio obtenida se encuentra entre 0.97 y 1.51 [μm].

4. Discusión de resultados

Para el primer caso de estudio fue importante identificar las etapas del ciclo de maquinado, pues permite determinar la aportación de la energía variable y constante. En la figura 4.1 se puede observar esta diferencia; el pico mayor es

debido a que los motores del centro de maquinado tratan de vencer la inercia de la masa de la bancada y se activa el motor del husillo.

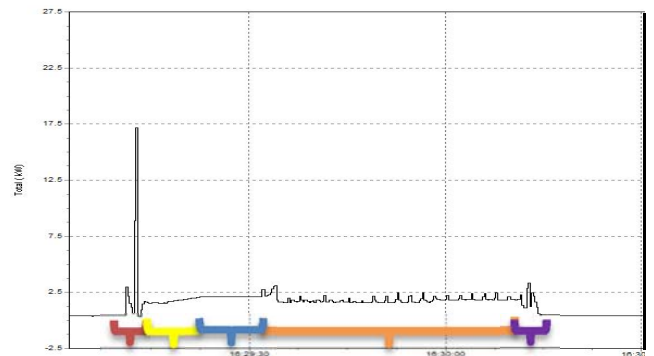


Figura 5. Tiempo-potencia durante el maquinado de una cavidad con zig-zag.

Las etapas del maquinado se clasifican de la siguiente manera:

- Constante
- Rojo: G28 a plano de seguridad.
- Amarillo: descenso en línea recta al borde superior del material.
- Morado: fin de corte a G28
- Variable
- Azul: hélice descendente.
- Naranja: corte con trayectoria zig-zag.

En cuanto a la búsqueda de los parámetros de corte que generan una menor demanda de potencia, la profundidad de corte (a_p) es el parámetro crítico con un porcentaje de influencia de 85.5%, mientras que la velocidad de corte mostró un 9.3% y la interacción de ambos un 2.1%, con lo cual se asegura la influencia de estos parámetros.

La razón por la que la profundidad de corte tiene mayor influencia se debe a la variación del tiempo del maquinado, mientras que, la interacción existente tiene poca influencia ya que, aun con las variaciones entre velocidad y profundidad de corte, la remoción de material es la misma. El experimento con mejor resultado fue el noveno, donde ambos parámetros tienen un nivel bajo, es decir, $V_c=104$ [m/min] y tres pasadas. Con una menor velocidad de corte se tiene a su vez menos revoluciones por minuto del cortador y una velocidad de avance menor, por lo que el requerimiento de potencia disminuye.

Los experimentos con menor consumo energético fueron aquellos con menor tiempo de maquinado debido a que el corte se realizó en sólo una pasada de 6 milímetros de profundidad, de esta forma se corrobora la baja influencia de la velocidad de corte, puesto que los experimentos 1, 4 y 7 corresponden a los niveles alto, medio y bajo de esta.

Para el caso de acabado superficial, al calcular la influencia de los parámetros de corte, se obtuvo que la mayor contribución se debe a la profundidad de corte con un 85.618%, mientras que la velocidad de corte obtuvo un

0.841% y la interacción Vc-ap un 13.005%, esto se relaciona con el volumen removido.

El experimento con mejor acabado superficial, es decir, con menor rugosidad promedio obtenida, fue el tercero; definido con nivel alto en velocidad de corte y bajo en profundidad de corte.

5. Conclusión

La metodología empleada permitió establecer la relación entre la profundidad y velocidad de corte y su influencia en el consumo energético en el maquinado de cavidades en dirección X. En ambos casos de estudio la profundidad de corte tuvo mayor influencia que la velocidad de corte.

El menor consumo de energía se obtiene a altas velocidades de corte con altas profundidades de corte, generando una mayor productividad, dada la reducción del tiempo del ciclo de maquinado.

Para la operación zig-zag en dirección X, esta combinación puede ser usada como una operación de desbaste. Por otro lado, para operaciones de acabado, la profundidad de corte debe mantenerse en valores bajos y la velocidad de corte en valores altos.

Agradecimientos

La investigación reportada en este artículo fue realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos UNAM-DGAPA_PAPIIT IT102617.

REFERENCIAS

-
- [1] Ampara Aramcharoem, P. M. (9 de mayo de 2014). Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy. *Journal of Cleaner Production*, pág. 1.
 - [2] Aramcharoen, A., & Mativenga, P. (2014). Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy. *Journal of Cleaner Production*.
 - [3] Kordonowy. (2002). *A Power Assessment of Machining Tools*. Massachusetts Institute of Technology.
 - [4] Balogun, & Mativenga. (2013). Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. *Journal of Cleaner Production*.
 - [5] Li, W., & Kara, S. (2011). An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes. *Engineering Manufacturing*.
 - [6] Yan, J., & Li, L. (2013). Multi-objective optimization of milling parameters. *Journal of Cleaner Production*.
 - [7] Campatelli, G., Lorenzini, L., & Scippa, A. (2014). Optimization of process parameters using a response surface method for minimizing power consumption.
 - [8] Kong, D., Choi, S., Yasui, Y., Pavanaskar, S., Dornfeld, D., & Wright, P. (2011). Software-based tool path evaluation for environmental sustainability. *Journal of Manufacturing Systems*.
 - [9] Ayala A, Borja V, Rajme E, Muñoz M. (2017) Comparación del consumo de potencia de dos estrategias

de fresado CNC, memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la Somim.

- [10] Plata F, Muñoz L, Ayala A. (2018), Estudio de CO2 equivalente en operaciones de fresado en equipos CNC, memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la Somim 2018.