

Análisis del consumo energético de la herramienta de un torno CNC a diferentes velocidades de corte usando la densidad del espectro de potencia

Analysis of the energy consumption of the tool of a CNC lathe machine at different cutting speeds using the power spectral density

HERNÁNDEZ-EPIGMENIO, Miguel Angel†*, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma

Universidad Autónoma del Estado de México

ID 1^{er} Autor: *Miguel Angel, Hernández-Epigmenio* / ORC ID: 0000-0002-1683-4080, Researcher ID Thomson: F-9514-2018, CVU CONACYT ID: 786771

ID 2^{do} Coautor: *Carlos, Juárez-Toledo* / ORC ID: 0000-0002-7440-3246, Researcher ID Thomson: C-1368-2016, CVU CONACYT ID: 39912

ID 3^{er} Coautor: *Irma, Martínez-Carrillo* / ORC ID: 0000-0002-7952-4418, Researcher ID Thomson: B-9264-2016, CVU CONACYT ID: 39914

DOI: 10.35429/JSL.2019.19.6.1.8

Recibido 26 Marzo, 2019; Aceptado 30 Junio, 2019

Resumen

Para que una empresa sea rentable los ingresos deben exceder a los gastos, por lo que, las medidas que elija sobre su abastecimiento y consumo de energía repercuten directamente en el costo de producción. Este trabajo tiene la finalidad de examinar y cuantificar la energía que utiliza una máquina CNC durante su proceso de corte por medio de una herramienta numérica. Además, se analiza la relación que existe entre la velocidad de corte y los principales modos del espectro de potencia. Se muestra el impacto de la corriente eléctrica para diferentes velocidades de corte, los resultados de este estudio indican que la densidad del espectro de potencia puede ser suficiente para cuantificar el consumo de energía total durante el proceso de maquinado. La principal contribución de este documento es validar experimentalmente la atenuación del modo de frecuencia de orden superior de la corriente eléctrica durante el proceso de corte de metal. Estos resultados se pueden utilizar para el diseño y ajuste del control de velocidad de la herramienta de corte.

Corte, Espectro, Frecuencia, Corriente

Abstract

In a company, income must exceed expenses for the business to be profitable. The choices a company makes about its energy sourcing and consumption can profoundly influence its cost of production. The purpose of this paper is to examine the energy consumption of the cutting tool of a lathe using a numerical tool CNC. This study was designed to examine the relationship between speed of cutting and the spectral modes of the power spectral density. This work shows the impact of the current for different cutting speeds, the results of this study indicate that the power spectral density of the current of cutting, may be more than enough to determinate the energy consumption of the manufacturing process. The main contribution of this paper is the experimental validation of the attenuation of higher order modes of the electrical current at metal cutting process. These results can be used in the design and tuning of the speed control of the cutting tool.

Cut, Spectrum, Frequency, Current

Citación: HERNÁNDEZ-EPIGMENIO, Miguel Angel, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. Análisis del consumo energético de la herramienta de un torno CNC a diferentes velocidades de corte usando la densidad del espectro de potencia. Revista de Simulación y Laboratorio. 2019, 6-19: 1-8

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: mhernandez531@alumno.uaemex.mx)

†Investigador contribuyendo como primer Autor

Introducción

El interés del ahorro de energía en los procesos industriales es un tema de gran relevancia en cualquier empresa, el cual consiste en implementar métodos y estrategias para reducir recursos energéticos, propiciando que las compañías sean más rentables lo cual exige producir más con menos recursos energéticos, como lo argumenta Qianqian Zhong (2016).

Marin (2018) y Castillo (2006) hacen mención que existen pocas técnicas para interpretar y cuantificar el desgaste de una herramienta, por medio de la corriente que consume durante una rutina del trabajo. Mientras que Vega (2019) reconoce la importancia de la velocidad de trabajo de las máquinas de mecanizado a través de conceptos teóricos, experiencia y experimentos de laboratorio. En la industria manufacturera se han tratado de desarrollar diferentes investigaciones con la finalidad de maximizar el uso de los recursos, como el de monitorear el funcionamiento de las máquinas mientras realizan un proceso maquinado, como son la velocidad del husillo, avances de corte, cambio de herramienta de corte, etc. Longbottom (2005), Hernández y González (2011) dice que la vida útil de una herramienta de corte también estará en función de la cantidad de material que esta renueve.

Reyna y Lara (2019) exponen la reducción de márgenes de rentabilidad para establecer la problemática de una empresa la cual obedece a la falta de planeación, verificación y control de objetivos que logren generar beneficios económicos, para así realizar los mejores procesos de mecanizado de corte fabricación de reductores. Aguilera (2007) analiza que con base a los resultados obtenidos en su trabajo encontró una adecuada relación entre la modificación de las condiciones de maquinado con la emisión acústica, en la cual un incremento de los espesores promedio de viruta se traducen en un mayor consumo energético durante el corte. Martínez (2007) justifica que la demanda de componentes mecánicos de alta calidad y gran exactitud para sistemas de elevada precisión está aumentando considerablemente en los últimos años a nivel mundial por lo que considerablemente el aumento de las velocidades de corte es una de las formas de incrementar la eficiencia de los procesos productivos a través de la reducción de los tiempos de fabricación.

Sánchez (2016) argumenta que el fresado y maquinado de acabado de aceros endurecidos con altas velocidades ha sido limitado por el desgaste prematuro de la herramienta y la inestabilidad dinámica. Durante el maquinado el acabado de superficies inclinadas aparecen fenómenos dinámicos diferentes a aquellos que se presentan durante el maquinado de superficies planas por lo que flujo de corriente en la herramienta tiende a aumentar o disminuir.

Cárdenas (2019) y Aguilar (2019) argumentan que la incidencia de la velocidad de avance, profundidad de corte y velocidad de husillo en la rugosidad superficial en un proceso de torneado mediante los aceros AISI4140 y AISI4340 se le puede establecer la mejor rugosidad media (Ra) y tipo de acero para puntas de eje de vehículos.

Seguidamente tenemos a Hernández y González (2011) los cuales realizaron un estudio experimental del efecto del volumen de metal cortado y de la velocidad de corte en el desgaste del flanco de dos insertos de carburos recubiertos y un cermet, durante el torneado de acabado en seco del acero AISI 1045 a diferentes velocidades de corte se comprobó el aumento o disminución del gasto energético.

Munua y Zatarain (2006) dan a conocer los primeros análisis de predicción analítica del proceso de fresado o maquinado de una herramienta sobre un material se basaban en el dominio de Fourier ya que las fuerzas de corte periódicas dependen de la variación de dichas fuerzas y del número de términos de Fourier empleados para realizar la aproximación.

Espada y Sanjurjo (2003) realizan un estudio de la corrosión que produce el ruido electroquímico de un metal en el momento de un corte, ya que la interpretación de estos datos pueden ser reflejados por medio de la transformada de wavelet y el espectro de Fourier donde se suelen utilizar el análisis estadístico y el análisis de Fourier para establecer parámetros que puedan caracterizar a los registros de ruido electroquímico de potencial e intensidad a través del tiempo.

En los procesos industriales las máquinas tienen variables que influyen directamente al gasto energético que consumen y esto afecta la economía de la empresa, si bien existen casos en los cuales se han estudiado el por qué tan elevados se han vuelto los gastos, siendo un claro ejemplo del consumo de energía que genera una herramienta en un centro de maquinado, en la cual se estudian sus variables como lo es velocidad, forma de corte, desgaste de la herramienta o corriente que consume al realizar una rutina de trabajo Munua y Zatarain (2006) y Villalobos (2015). Flores y Asiaín (2011) justifican que en la industria mecánica actual, concurren toda una serie de factores que posibilitan la introducción de modernas tecnologías que contribuyen a mejorar la efectividad y eficiencia de estos procesos. Entre los más importantes se pueden mencionar:

- Reducción de gastos energéticos para la compañía.
- Exigencias del mercado de mayor calidad, complejidad y precisión de los productos.
- Reducción de los plazos de entrega para lo cual se requiere la reducción de los tiempos de las operaciones tecnológicas.
- Mejoramiento de la calidad de los materiales.
- Mejores acabados superficiales.
- Menores costos de los productos.

El objetivo de este trabajo es obtener un método para cuantificar y analizar el consumo de energía de una herramienta de corte en un CNC a través de la densidad de espectro de potencia FFT. La finalidad es mostrar el consumo energético que realiza dicha herramienta depende de la atenuación de la frecuencia de la corriente consumida a cierta velocidad y en función del tiempo. En la figura 1 se muestra el proceso para el análisis del consumo energético de la herramienta.

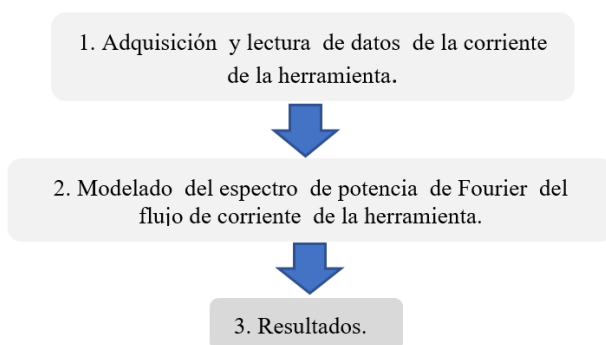


Figura 1 Diagrama de flujo de las etapas de estudio

Fuente: Elaboración Propia

Una vez llevado a cabo el procedimiento anterior se analiza el flujo de la corriente con respecto al desgaste de la herramienta.

Densidad del Espectro de potencia de Fourier

Tomasi (2003) expresa el espectro de frecuencia en el dominio de FFT como una función $f(x)$, llamándole así a las amplitudes resultantes de A_n frente a las frecuencias los cuales múltiplos naturales de frecuencia $f\omega = \pi p$, como se muestra en la siguiente figura 2.

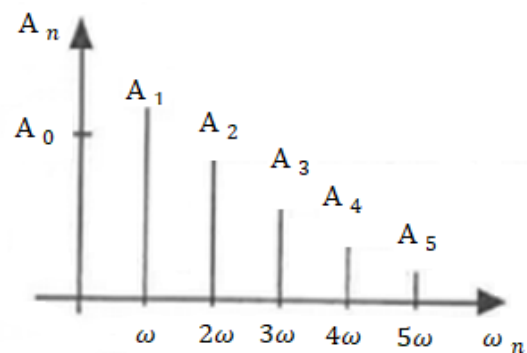


Figura 2 Representación espectral de las amplitudes de frecuencias

Fuente: Tomasi (2003)

Es habitual definir el espectro de frecuencias mediante los coeficientes complejos de la serie de Fourier. En este caso el espectro es la representación de $|C_n|$ frente a ω_n siendo n entero. La relación entre $|C_n|$ y A_n se muestra en la figura 3.

$$|C_n| = \left| \frac{a_n - ib_n}{2} \right| = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{1}{2} A_n \quad (1)$$

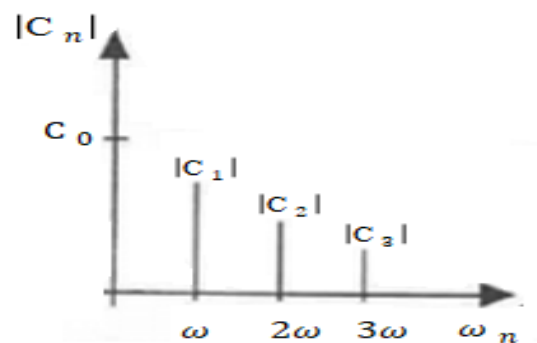


Figura 3 Representación espectral de amplitudes de frecuencias mediante coeficientes complejos

Fuente: modificado de Tomasi (2003)

Fernández (2000) argumenta que el análisis en el dominio de la frecuencia de la señal de las corrientes de una máquina refleja claramente los efectos de la excentricidad, por el hecho de que este análisis permite detectar variaciones en la señal de muy pequeña amplitud. Para dicho análisis en el dominio de la frecuencia se emplea la FFT que es un algoritmo para el cálculo aproximado de la transformada discreta de Fourier.

Fernández (2000) y Thomson (2001) hacen mención que la técnica espectral se ha empleado desde hace varios años en el diagnóstico de motores para detectar fallas en el rotor mediante el análisis de las corrientes en el dominio de la frecuencia y los armónicos más analizados son los situados al lado de la frecuencia fundamental. A estas frecuencias se les llama armónico lateral inferior f_i y superior f_s , y sus magnitudes están en función del grado de asimetría que presenta el rotor, Flores y Asiaín (2011).

La Técnica espectral armónica FFT antes mencionada se muestra gráficamente en la figura 4.

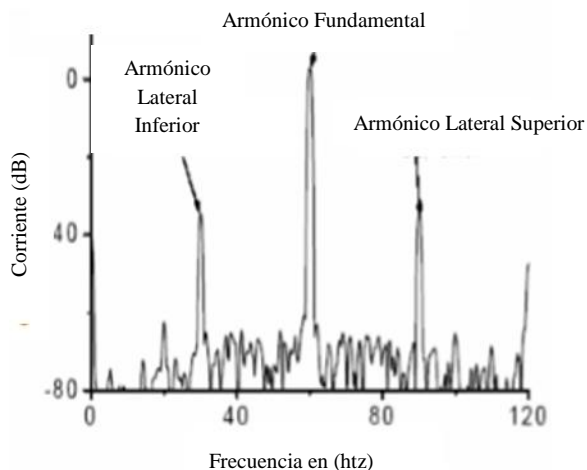


Figura 4 Representación espectral armónico lateral inferior f_i y superior f_s de la corriente de un motor de corriente directa

Fuente: Flores y Asiaín (2011)

Desarrollo

Espada y Sanjurjo (2003) justifican que el espectro de Fourier proporciona una función de la frecuencia que es la transformada de Fourier. Esta función es compleja: su módulo es la amplitud espectral y el cuadrado de la amplitud es la densidad de potencia espectral, DPE. Esta densidad espectral es, la transformada de Fourier del auto correlación.

El término espectro se utiliza indistintamente para la amplitud y para la densidad de potencia representadas frente a la frecuencia. La DPE puede determinarse por varios métodos. Los más empleados son el método de la máxima entropía y el cuadrado de la transformada de Fourier.

La DPE de los registros de intensidad y potencial parece ser un factor que suministra una información útil sobre el proceso y representación de datos en el tiempo.

Para comprobar consumo energético y el desgaste de la herramienta CNC en este trabajo es necesario contar con técnicas de medición que además permite detectar en forma gráfica el desgaste de la herramienta y tener una aproximación a través del tiempo. El análisis espectral representa el consumo de corriente medida de la herramienta en el momento de la rutina de maquinado y al mismo tiempo se realiza el análisis a través de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Miyara y Lahoz (2003) argumentan que el espectro de frecuencias está compuesto por un espectro de amplitud y uno de fase. En su artículo mencionan que a pesar de que éstas definen por complejo a la función considerada, sucede frecuentemente que lo más importante no es la amplitud, sino su valor cuadrático medio, por estar directamente vinculado con la potencia. Si $g(t)$ es una función periódica potencial se puede calcular con la siguiente expresión matemática (4):

$$g(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega + \varphi) \quad (2)$$

$$g(t) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2G_n} \cos(n\omega + \varphi) \quad (3)$$

$$g(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Gn^2 \quad (4)$$

Donde:

Gn^2 es el valor cuadrático medio del armónico de orden n . Se le denomina espectro de potencia de $g(t)$ a la representación gráfica de los Gn^2 en función de n o bien en función de la frecuencia n/T o de la frecuencia angular $\omega = 2\pi n/T$.

Resultados

Adquisición y lectura de datos de la corriente de la herramienta

Para la obtención y adquisición de consumo de corriente se adapta un sensor efecto hall a un circuito integrado que al mismo tiempo va conectado al paso de corriente de la herramienta de corte CNC, una vez que está conectado, se da inicio a la rutina de maquinado a una velocidad constante, el cual apertura al sensor de corriente como se muestra en la figura 6.

Se consideran dos diferentes lecturas de datos las cuales se realizaron durante la rutina de maquinado que corresponde a 150 segundos. En esta sección se muestran los resultados de las pruebas que se obtuvieron analizando el consumo energético a través del tiempo.

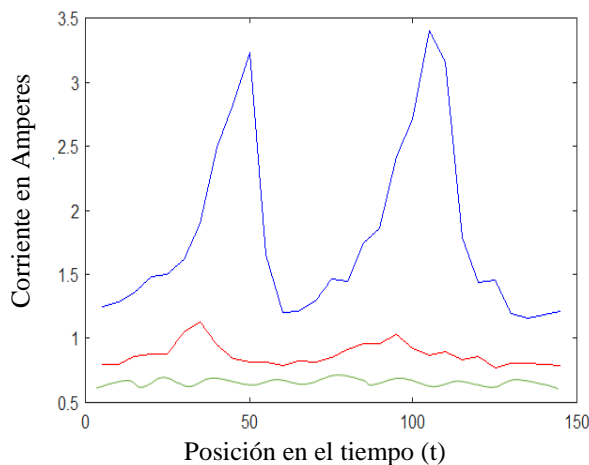


Gráfico 1 Posición espectral de potencia del consumo energético de la herramienta de corte nueva y usada CNC
Fuente: *Elaboración Propia*

Como se muestra en el gráfico 1 la posición de la corriente marcada con color azul es mayor en dos puntos ya que los picos representan el maquinado de corte en diferentes áreas, esto se debe a que el consumo de la corriente directa en momento del maquinado es mayor con una herramienta de corte que ha sufrido desgaste, el color rojo corresponde a la posición de la corriente para una herramienta nueva y finalmente el verde es la rutina sin realizar el corte, es decir el motor realiza la rutina de maquinado en vacío.

Cabe mencionar que el sensor con el que obtuvieron las lecturas de corriente tiene un rango de medición de -5 a 5 volts y -5 a 5 amperes como se muestra en la siguiente figura 5.

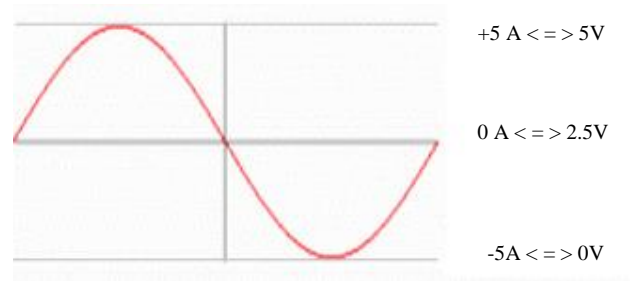


Figura 5 Representación gráfica de la medición de corriente que proporciona el sensor

Fuente: *Elaboración Propia*

El levantamiento de las lecturas en el laboratorio y la conexión del sensor con el CNC se realizaron físicamente como se muestra en la siguiente figura 6.

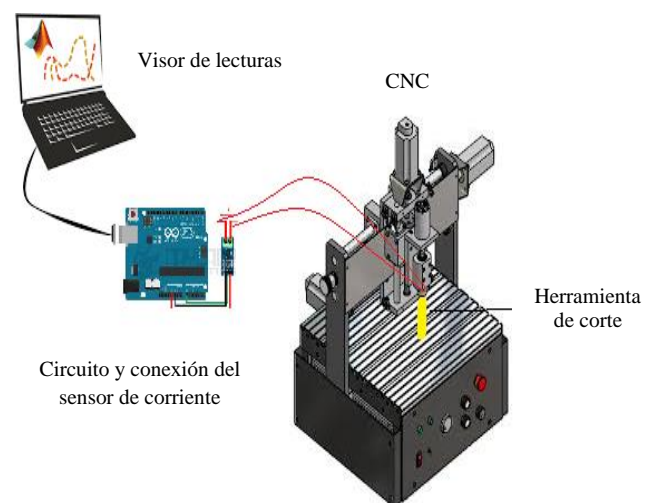


Figura 6 Conexión física del sensor con el CNC

Fuente: *Elaboración Propia*

La parte de color amarilla mostrada en la figura 4 es la herramienta de corte, para este trabajo se hace las respectivas rutinas en el CNC para así poder maquinado sobre aluminio y obtener las lecturas de la corriente en pantalla.

Modelado del espectro de potencia de Fourier del flujo de corriente de la herramienta

Para el cálculo del espectro de potencia del consumo energético de las rutinas de maquinado, se utiliza la información obtenida en los 150 segundos de tiempo, aplicadas en las ecuaciones 6 y 7 para obtener el área bajo la curva.

En el siguiente gráfico 2 se muestra la interpretación de la corriente, para el espectro de color rojo se refiere al consumo energético de corriente para una herramienta de corte nueva y para el color azul para el consumo energético de una herramienta con desgaste.

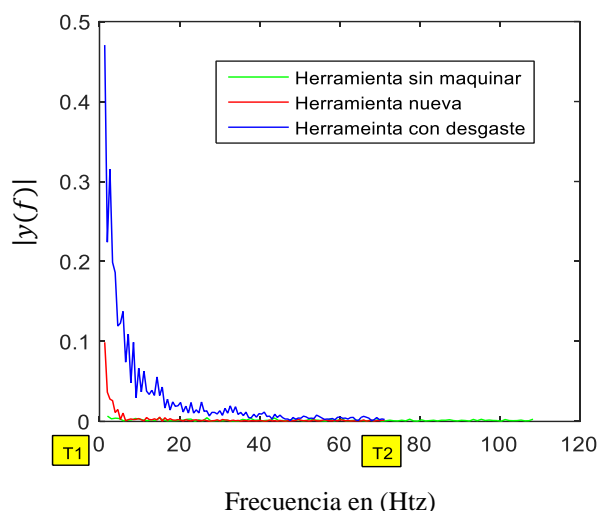


Gráfico 2 Espectros de potencia del consumo energético de la herramienta de corte nueva, usada y sin maquinar.

Fuente: Elaboración Propia

Para el color verde le corresponde al espectro de potencia de la corriente cuando la maquina CNC no se encuentra en rutina de maquinando y solo se hace medición de la corriente.

Rivera y López (2011) argumentan que el contenido de energía $f(t)$ esta dado por $\frac{1}{2\pi}$ multiplicado por el área abajo la curva $|F(\omega)|^2 P$ donde $|F(\omega)|^2$ es el espectro de energía o densidad de energía espectral de $f(t)$. El espectro o densidad de energía $f(t)$ es infinito en un intervalo de frecuencia definiéndose de la siguiente manera:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

Para las funciones anteriores, la potencia promedio en el intervalo T se aproxima a infinito de la siguiente manera:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt = 0 \quad (6)$$

Con respecto la ecuación (6) se considera el caso de estudio para las tres señales antes mencionadas en el grafico 2 quedando de la siguiente forma la expresión matemática.

$$\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} |f(t)|^2 dt \quad (7)$$

Sustituyendo las 3 señales del consumo energético señaladas, nos calcula el área bajo la curva.

Cabe señalar que intervalos de integración de la ecuación (7) para las tres señales se enmarcan en de color amarillo T1:0 Hz y T2:70 Hz y los respectivos resultados de dichas integrales se muestran en la tabla 1.

Herramienta con desgaste (HCD)	Herramienta nueva (HN)	Sin maquinar (SN)
3.960	0.045	0.025

Tabla 1 Datos de la integración de la energía espectral de las señales

Fuente: Elaboración Propia

Para obtener el área bajo la curva se utiliza el toolbox de análisis numérico de Matlab para las tres señales del gasto energético del gráfico 1. Para calcular la potencia promedio (P_p) en porcentaje del consumo energético se analizan dos casos los cuales se toman los datos de la tabla 1 obteniéndose los siguientes resultados:

Caso1:

$$P_p = \frac{HCD}{HN} \times 100 = 8.800\%$$

Caso2:

$$P_p = \frac{HCD}{SN} \times 100 = 15.840\%$$

Conclusiones

El espectro frecuencia de Fourier para el análisis de corrientes, es una herramienta fundamental para el avance de ingeniería e investigación, así como para diversas aplicaciones en otros campos relacionadas con los consumos energéticos industriales. En este artículo se expone una técnica de espectro frecuencia medido Hertz que permite cuantificar de forma precisa el consumo que hace una herramienta en el momento del maquinado, dicho espectro se obtiene usando el toolbox de procesamiento de señales de MATLAB.

Al analizar cada espectro del gráfico 1 el comportamiento de corriente en cada señal se puede cuantificar y al mismo tiempo señalar con que herramienta y cuanto es el consumo energético de una herramientas de corte. Para una empresa que tiene integrado a sus procesos manufactureros máquinas de control numérico CNC pueden analizar su consumo de energía por medio de este método y técnica propuesta en este trabajo.

La implementación del método propuesto aplicando espectro de potencia al consumo energético de una herramienta CNC, permite cuantificar el consumo de energía utilizado en las máquinas de corte y elegir la velocidad óptima, así como su herramienta durante un proceso de maquinado.

Referencias

- Aguilera, A. (2007). Monitoreo del proceso de maquinado de aramo australiano (acacia melanoxydon) con emisión acústica y su relación con la calidad superficial resultante, ISSN 0717-3644. *Revista Ciencia y tecnología* vol. 3).pp. 323-332.
- Castillo, GR. (2006). Un método de monitoreo del desgaste de una herramienta de corte. *Ingeniería .Revista Chilena de Ingeniería*, pp. 124-129.
- Checa Aguilar, N. A. (2019). Construcción, ensamblaje y pruebas de motor neumático.
- Espada, M. Sanjurjo, S, Urréjola, E Bouzada, Rey y A, Sánchez. (2003). Ventajas del análisis Wavelet sobre el análisis de Fourier para la interpretación del ruido electroquímico. Departamento de Ingeniería Química. E.T.S.E.I. e M. Universidad de Vig Metal. Madrid Vol. 3, pp. 72-79.
- Fernández, C. M., García, M. M., Alonso, O G., Cano, R. J.M., Solares, S. J (2000) .Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas, ABB Service S.A.-Marcombo Boixareu Editores, España.
- Falcon Cárdenas, E. B. (2019). Incidencia de la velocidad de avance, profundidad de corte y velocidad de husillo en la rugosidad superficial para puntas de ejes de vehículos.
- Flores, R y Asíaín, T. (2011). Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales, Departamento de Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-IPN, México D.F., México. *Revista Información Tecnológica* Vol. 22, N° 4, pp.73-83.
- Hernández, M. (2011). Efecto del volumen de metal cortado y de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta durante el torneado de alta velocidad del acero AISI 1045. *Ingeniería & Desarrollo.Universidad del Norte*, No 9, pp.61-83.
- J.M. Longbottom. L. (2005). Cutting temperature measurement while machining. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, pp. 122–130.
- Miyara, F A, Lahoz, (2003). Introducción al análisis frecuencial y al ruido eléctrico. Tercera edición. <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/ruido-t.pdf>
- Munoa, J., Zatarain, M., Bediaga, I., Peigné G. (2006) .Stability study of the milling process using an exponential force model in frequency domain. *Proceedings of CIRP 2nd International Conference on High Performance Cutting*, Vancouver, Canadá, No 3, pp. 41-47.
- Marin, R, Juárez, C y Martínez, Irma (2018). Análisis del consumo energético a través de la medición de corriente para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno usando integración numérica .*Revista de Ingeniería Eléctrica* Vol.2 No.5, pp. 10-17.
- Martínez, Aneiro, F.; Sánchez Battaille, T, (2007). Conceptos del maquinado con altas velocidades de corte aplicado en moldes y matrices, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría Ciudad de La Habana, Cubaque *Ingeniería Mecánica*, vol. 10, núm. 1, pp. 63-69.
- Qianqian Zhong, R. T. (2016). Evaluation on models of calculating energy consumption in metal. *Int J Adv Manufacturing Techno*, pp. 2087–2099.
- Rivera, H; López, E; Varona, R. (2011). Geometría fractal y Transformada de Fourier. *Scientia et technica. Universidad Tecnológica de Pereira*. ISSN 0122-1701, vol. 7, Núm. 48, pp. 269-274.
- Reina, F., Johanny, M., Lara Cortes, P. A., & Pulido Sánchez, Y. T. (2019). Diseño de un modelo de proyección financiera que mejore la sostenibilidad de la empresa industrias Ramfe SAS del sector industrial en fabricación de reductores.

Sánchez, Y; Hechavarría, A. (2016). Vida y productividad de la herramienta de corte en el fresado de acabado del acero endurecido AISI D6, Revista chilena de ingeniería, vol. 25 N° 2, 2017, pp. 205-216.

Thomson, W.T., Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine, pp. 26-34.

Tello Vega, M. F. (2019). Centro Mecanizado CNC, y el Proceso de Formación Profesional de los estudiantes de Mecánica de Producción en la Facultad de Tecnología de la Universidad Nacional de Educación.

Tomasi, W. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas, cuarta edición, México, Pearson educación, ISBN: 970-26-0316-1.

Villalobos, F; Álvarez, O. (2015). Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial Vol.12, pp. 292–303.