

# **ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE CORRIENTE EN UN TORNO USANDO INTEGRACIÓN NUMÉRICA**

*NUMERICAL INTEGRATION OF THE ENERGY CONSUMPTION BY CURRENT MEASUREMENTS TO DETERMINE THE USEFUL LIFE OF THE LATHE TOOL*

**Rafael Marin Marin**

CIATEQ campus Toluca  
*rlmnmn@hotmail.com*

**Carlos Juárez Toledo**

Universidad Autónoma del Estado de México  
*cjuarez@uaemex.mx*

**Irma Martínez Carrillo**

Universidad Autónoma del Estado de México  
*imartinezca@uaemex.mx*

## **Resumen**

El estudio del ahorro de energía en los procesos industriales se ha vuelto una prioridad en cualquier empresa, debido a que si se consigue reducir el uso de los recursos energéticos se vuelven más rentables, competitivos y amigables con el medio ambiente. El objetivo de este trabajo es determinar el consumo energético del motor de una herramienta de corte en un torno multihusillo para maquinado de acero al carbón 1045. Para determinar el desgaste que sufre la herramienta se aplica la integral numérica de la corriente en cada proceso de maquinado. Se muestra gráficamente como a medida que la herramienta pierde su propiedad de corte el gasto energético aumenta, haciendo que en cada corte se necesite una mayor cantidad de energía eléctrica. También se presenta el análisis económico, la viabilidad y amortización de la aplicación. La contribución de este trabajo es implementar un método numérico confiable para determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno, investigaciones futuras serán encaminadas a realizar estudios de desgaste a diferentes velocidades de trabajo determinado la velocidad óptima de maquinado.

**Palabra(s) Clave:** Gasto energético, herramienta de corte, Integral numérica.

## **Abstract**

*Energy saving study in industrial processes has become a priority for any company, energy efficiency in the industry contributes to decoupling economic growth and environmental impact. The Project aimed at improving energy efficiency for a specific industrial process. The focus of this work is to determine the useful life of the cutting tool of a multi-spindle lathe using a numerical tool. The lathe machine works with 1045 carbon steel. The article shows that the impact of current increase when the tool loses its cutting ability, the economic analysis, viability and amortization of the application are presented. The numerical integration tool is necessary for proper interpretation of the results, this includes the understanding of the data collection with a PLC program. Thus, determining the useful life of cutting tools the process is more efficient and may reduce the specific cutting energy. Future work will be directed to determine the optimum speed of machining.*

**Keywords:** *Cutting tool, energy expenditure, numerical integral.*

## **1. Introducción**

Los métodos numéricos han ayudado a entender y cuantificar en las empresas parámetros, que contribuyen a hacer más eficientes los recursos tanto materiales como energéticos, ejemplo de ellos puede ser el proceso de combustión en un motor empleando mecánica de fluidos computacional (Mora & Mantilla, 2017).

Las técnicas de métodos finitos no están diseñadas para ser una herramienta de análisis energético, pero pueden contribuir de forma indirecta encontrando defectos prematuros en el proceso, por ejemplo, en la industria aeronáutica estas herramientas son utilizadas para determinar formas aerodinámicas por medio de la simulación computacional, de esta manera optimizan el uso de combustibles (Botello, 2006). La simulación aerodinámica de los autos eléctricos se utiliza para optimizar la eficiencia energética, donde los modelos son analizados mediante

sofisticados programas que hacen uso de métodos numéricos (Paraire & Peiro, 1992).

El maximizar el uso de las energías no renovables se ha convertido en una gran tendencia y necesidad en los últimos años (Qianqian, Renzhong, & Jingxiang, 2016) cada vez en el sector industrial se exige producir más con menos recurso y el uso de sensores de corriente son de gran importancia ya que ayudan a cuantificar el consumo de energía (Jamaica, Ortega, Guerreo, & Conde, Diciembre 2015).

Dentro de la industria metal mecánica, se han desarrollado diferentes investigaciones con la finalidad de maximizar el uso de los recursos, como el de monitorear la temperatura de los metales mientras se realiza el maquinado (Longbottom & Lanham, 2005), además de la temperatura hay otros factores que desempeñan roles muy importantes como son la velocidad del husillo, avances de corte, alteraciones metalúrgicas en la superficie maquinada (Ajay, Suresh, Shailendra, & Rajesh, 2014). El uso de sonidos que produce la herramienta de corte para determinar su estado (Kai-feng, Hui-qun, & Peng, 2015). La vida útil de una herramienta de corte también estará en función de la cantidad de material que esta remueve (Hernández, Pérez, & Dumitrescu, 2011).

Actualmente existen métodos para extender la vida útil de las piezas industriales sometidas a desgaste, ejemplos de ellos puede ser el propuesto por Hernández (Hernandez, Juárez, & Martínez, 2015). El cual consiste en una aplicación del tratamiento térmico criogénico el cual puede elevar la vida útil de la herramienta hasta en un 300%.

El presente trabajo tiene como finalidad determinar la relación entre una herramienta de corte que se desgasta en una jornada laboral habitual y el consumo de corriente del motor. El principal objetivo es identificar los cambios del consumo de energía y determinar el cambio óptimo de la herramienta es, decir cuando esta consuma una mayor corriente debida al desgaste de su filo.

La máquina donde se realiza el análisis consiste en una cortadora multihusillo en la cual por políticas de la empresa se realiza el cambio de herramienta en cada remplazo del turno de la jornada laboral.

Midiendo la intensidad de corriente en amperes por medio de un PLC de captura de datos, durante seis ciclos de 5 minutos cada uno y desfasados una hora se pretende tener una bitácora de la variación del gasto energético con respecto al proceso de desgaste de una herramienta nueva hasta que es cambiada.

Con este estudio se busca determinar la variación de los consumos de energía de la máquina verificando que tan oportunos son los cambios de la herramienta o, si es necesario realizarlos antes de los programados y, de esta manera evitar un consumo en energía eléctrica extra por una herramienta en malas condiciones. Debido a que el PLC utilizado realiza capturas en el tiempo del amperaje de la máquina se puede usar la integral numérica para cuantificar el gasto energético, determinando el área bajo la curva de diferentes muestras, para este caso son las lecturas de corriente del motor.

En este trabajo se presenta un modelo numérico basado en la integral especial de Simpson  $\frac{3}{4}$ , donde se analiza la corriente del motor de la herramienta de corte de un torno, para determinar el momento del cambio óptimo de la herramienta.

## **2. Métodos**

En la industria es muy recurrente el uso de métodos numéricos para resolver problemas que por su naturaleza es difícil de obtener algebraicamente, ejemplo de ello es la integral numérica la cual determina el área bajo la curva de un fenómeno físico con buena precisión (Chapra & Canale, 2007).

Existen investigaciones que han sido orientados a medir los desgastes en la herramienta (De Anda & Castillo, 2006), pero no miden las repercusiones de los aumentos de energía por usar herramientas gastadas. En este trabajo se incorpora un PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley sobre el carro donde se ubica la herramienta de corte de un torno.

La herramienta donde se ubica el estudio es la que ejerce mayor fuerza y desgaste durante el proceso de maquinado de las conexiones que se fabrican. Esta máquina utiliza barras hexagonales las cuales pueden girar hasta 1000 revoluciones por minuto y es en donde la herramienta de forma sufre un mayor desgaste ya que desbasta las aristas de la barra y retiran la mayor cantidad de

material excedente de una barra de acero, dejando la pieza cercana al producto final.

La ecuación de Simpson es una herramienta confiable que consiste en determinar el área bajo la curva de una señal discreta (Chapra & Canale, 2007). La herramienta puede ser intuitiva y consiste en determinar curvas o polinomios de grado dos, es decir, áreas bajo la curva descritas por la ecuación 1.

$$A_s = A_1 + A_2 + A_3 \quad (1)$$

Donde  $A_s$  representa el área total aproximada de la suma de las áreas de las parábolas individuales  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ , ver figura 1.

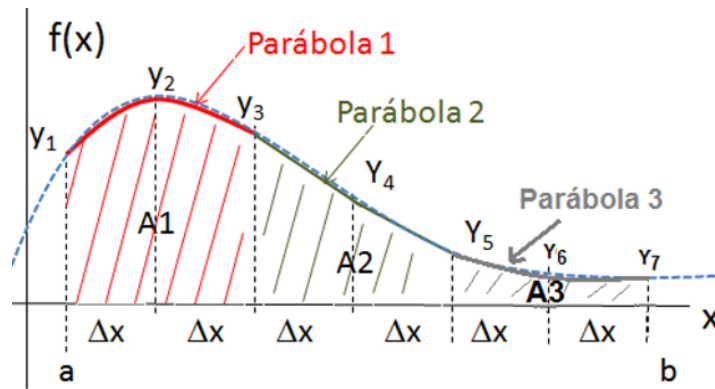


Figura 1 Integración de Simpson.

En la figura 1,  $f(x)$  corresponde al valor de las corrientes ( $y_1, y_2, \dots, y_7$ ) determinado por el PLC en Amperes, mientras  $\Delta x$  es el paso de iteración constante de la toma de muestra de 300 ms. Para determinar el área de cada parábola individual de los arcos de la figura 1, se puede utilizar la forma general de segundo orden expresada por la ecuación 2.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

Donde para la primera parábola los términos  $a$ ,  $b$  y  $c$  se deben reemplazar usando los términos de las corrientes conocidas  $y_1, y_2, y_3$ . Una manera más simple de determinar la primera parábola consiste en trasladar el origen a  $y_2$  ver figura 2.

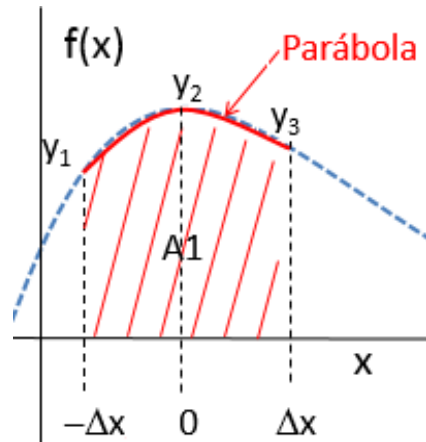


Figura 2 Integración de Simpson.

Evaluando en los extremos se obtiene ecuación 3.

$$\frac{a\Delta x^3}{3} + \frac{b\Delta x^3}{3} + c\Delta x - \left( -\frac{a\Delta x^3}{3} + \frac{b\Delta x^3}{3} - c\Delta x \right) \quad (3)$$

Donde es fácil mostrar que el gasto energético para el primer intervalo de tiempo es (Smith, 2002), está dado por ecuación 4.

$$Ap1 = \frac{\Delta x}{3} (2a\Delta x^2 + 6c) \quad (4)$$

Sustituyendo los puntos conocidos  $(-\Delta x, y_1)$ ,  $(0, y_2)$  y  $(\Delta x, y_3)$  en la ecuación 2 se obtiene el sistema de ecuaciones 5.

$$\begin{cases} y_1 + y_3 = 2a\Delta x^2 + 2c \\ y_2 = c \end{cases} \quad (5)$$

Por lo que el gasto energético para la primera área en términos de las corrientes conocidas del PLC, está determinada por la ecuación 6.

$$Ap1 = \frac{\Delta x}{3} (y_1 + 4y_2 + y_3) \quad (6)$$

De forma general la suma del gasto energético de todas las áreas se calculan con la ecuación 7.

$$\Delta A_s = \frac{\Delta x}{3} [y_1 + y_{n-1} + 4(y_2 + y_4 + y_6 + \dots + y_n) + 2[y_3 + y_5 + y_7 + \dots + y_{n-1}]] \quad (7)$$

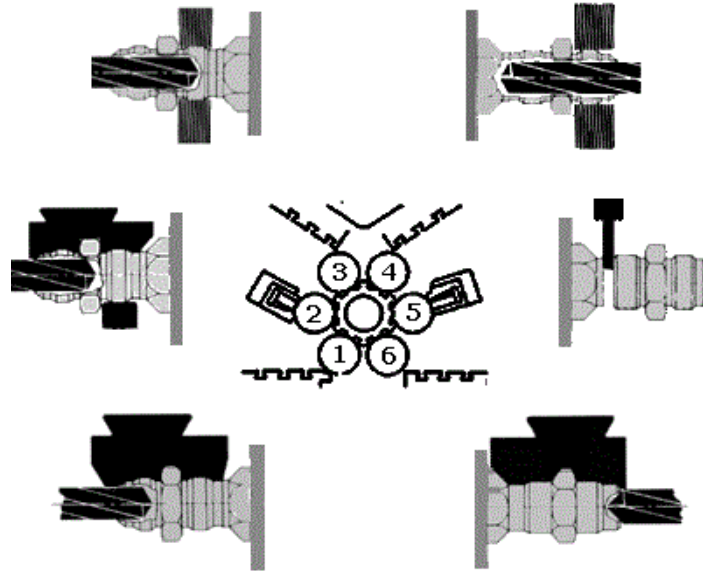
Haciendo uso de herramientas de computo se puede generar el código para determinar el área bajo la curva y de esta manera cuantificar la corriente que el motor consume en el ciclo de maquinado.

La máquina donde se realiza el estudio de gasto energético tiene como finalidad fabricar conexiones de acero de diferentes formas y características, usadas para la conducción de fluidos y gases en diversos sectores de la industria. Concretamente consiste en un torno de seis husillos (ACME 1 ¼ RB6) con control numérico basado en un CPU de procesador Intel, cuenta con un total de 5 carros de corte frontal, dos de corte lateral de un eje y 2 de corte lateral de dos ejes. Además, tiene un motor principal con una potencia de 50 hp controlado mediante un variador de velocidad de la marca SIEMENS, mientras que para los carros frontales y laterales de un eje se controlan mediante drives COMPUMOTOR de la SERIE ZX que son controlados mediante un puerto serial desde una tarjeta STARGATE desde el CPU Intel y para los carros laterales de dos ejes se controlan mediante un amplificador SINUMERIC de la marca Siemens.

Las herramientas que usualmente se instalan en los carros laterales de un eje, son cuchillas de corte para tronzar la pieza finalizada y herramientas de forma para corte, para los carros laterales de dos ejes se utilizan normalmente para la fabricación de cuerdas y los carros frontales se instalan de forma regular brocas, machuelos.

La figura 3 muestra un diagrama general de la distribución de las herramientas. La máquina en la cual se realizó el estudio cuenta con seis husillos donde en las posiciones 1 y 6 generalmente se instalan las herramientas de forma que maquinan la forma general de la pieza. En las posiciones 3 y 4 se realiza el maquinado de cuerdas y en las posiciones 2 y 5 se instalan las brocas.

La herramienta que se analiza en el artículo está sujeta a diferentes tipos de desgaste (figura 4).



Fuente: <http://multispindle.com/>

Figura 3 Diagrama esquemático.



Figura 4 Herramienta con forma preestablecida.

La máquina para realizar el estudio de gasto energético se seleccionó debido a las siguientes ventajas:

- La fácil instalación del PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley, de módulos análogos y el sensor de corriente sobre el motor que controla el avance de la herramienta de corte.
- Por el amplio tiempo de operación el cual para cada pieza es de aproximadamente 25 segundos con 8 horas efectivas de trabajo divididas en dos turnos de lunes a viernes con un cambio de herramientas por turno. La cantidad promedio de piezas por día es de 2000.



Las condiciones de ajuste de la máquina y durante todo el proceso son: velocidad en los husillos de 800 rpm, la velocidad de corte parametrizado a 1.2 milésimas de pulgada por revolución. La herramienta de forma desbasta de un diámetro de 0.75 de pulgada a 0.68 de pulgada en una longitud de 1.2 pulgadas, cabe mencionar que la máquina cuenta con dos herramientas de forma:

- La primera sirve para aproximar sin proporcionar el acabado final
- La segunda que es la que determina el acabado final.

El estudio se realiza con la primera herramienta debido a que se encuentra sometida a un mayor desgaste. La herramienta de forma se fabrica con un acero M2 y se corta para dar la forma mediante una máquina de corte por hilo, la herramienta después de ser sometida al proceso de corte entra a un proceso de temple para obtener un grado de dureza de entre 62 y 64 HRC. El acero M2 es una acero rápido aleado al tungsteno y molibdeno el cual es usado para herramientas de corte en las cuales se requiere mantener el filo y una gran tenacidad con buena resistencia al desgaste (Aceros SISA, 2012).

### 3. Resultados

En figuras de la 5 a la 10, muestran las corrientes de las primeras 5 horas de trabajo donde se puede apreciar el comportamiento de del consumo de la corriente.

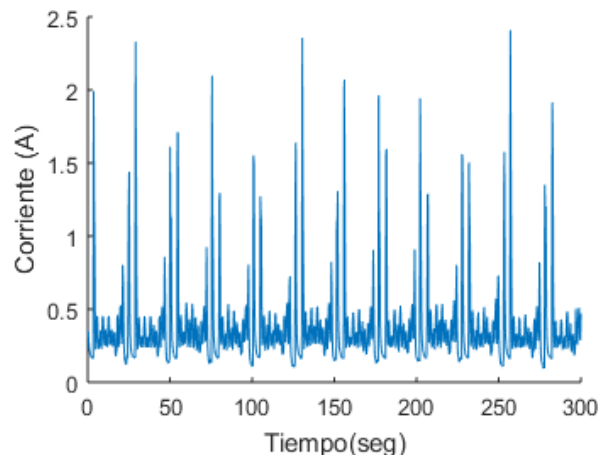


Figura 5 Muestra 1, inicio de jornada laboral.

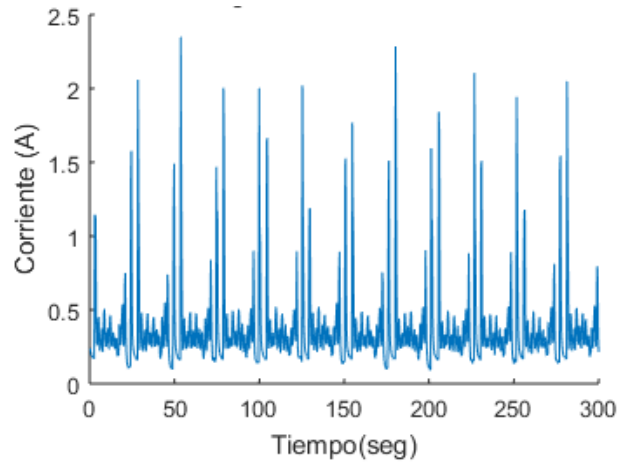


Figura 6 Muestra 2, herramienta con una hora de trabajo en condiciones normales.

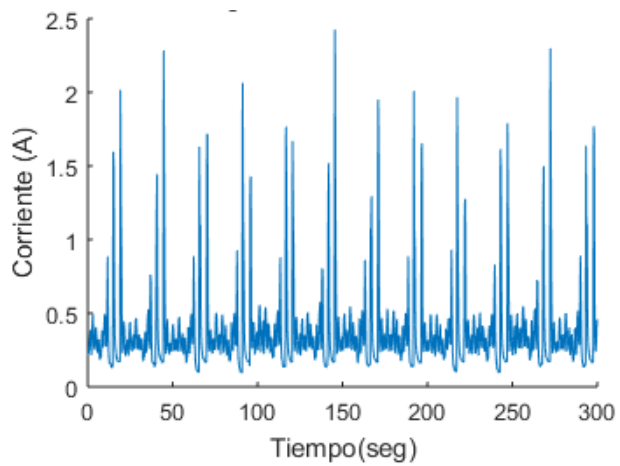


Figura 7 Muestra 3, herramienta con dos horas de trabajo en condiciones normales.

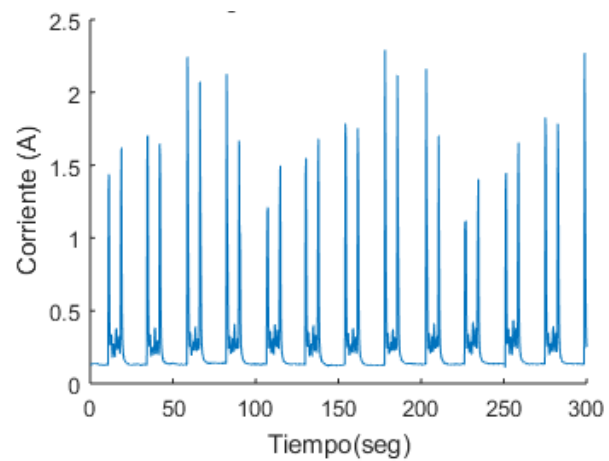


Figura 8 Muestra 4, herramienta con tres horas de trabajo en condiciones normales.

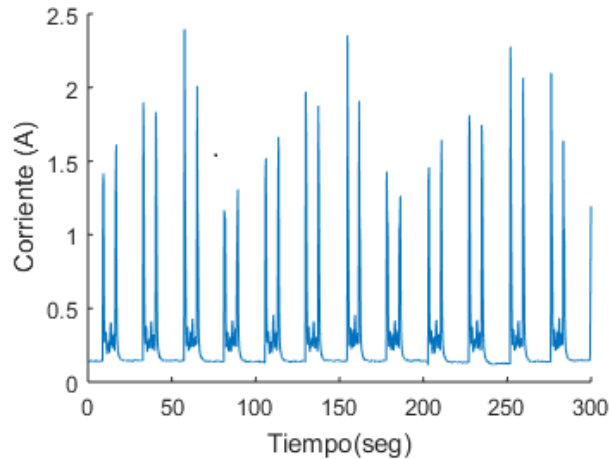


Figura 9 Muestra 5, herramienta con cuatro horas de trabajo en condiciones normales.

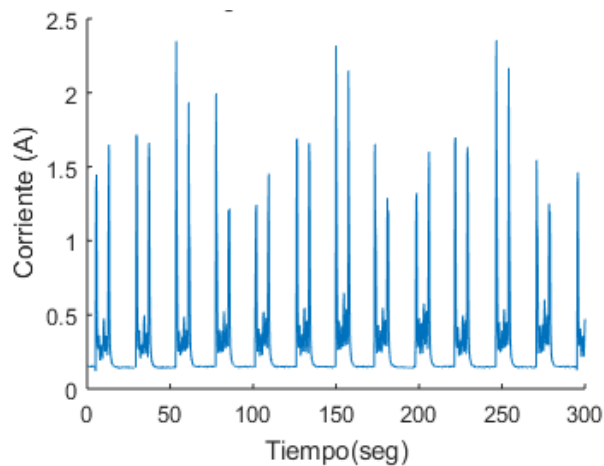


Figura 10 Muestra 6, herramienta con cinco horas de trabajo en condiciones normales y antes del cambio de turno y herramienta.

Los ciclos de maquinado quedan definidos por medio de dos picos de corriente, para cada 300 segundos aproximadamente se realizan 12 maquinados. Como puede notarse en la evolución de las figuras 5 a la 10 a medida que la herramienta se desgasta la cantidad de ruido tiende a disminuir debido a que existe menos contacto con la pieza.

Haciendo uso de la ecuación 7 se determina el gasto energético, el cual se muestra en la tabla 1 durante las primeras 5 horas de trabajo con una herramienta nueva. En la tabla 1 se aprecia que el consumo de energía tiende a disminuir hasta la tercera hora de trabajo (marcado en gris) y comienza a incrementarse a partir de la cuarta hora.

Tabla 1 Resumen de mediciones.

Muestra	Tiempo efectivo de trabajo (hora)	Gasto energético (A*s)
1	0	111.4004
2	1	72.9302
3	2	75.1728
4	3	52.6908
5	4	53.7695
6	5	58.2813

La corriente tiene un descenso marcado en la primera hora lo cual hace suponer que el avance de corte de la herramienta no es el adecuado, provocando que se ejerza una presión adicional sobre el material al cortar (Kumar & Khandwawala, 2016). Debido a que es un proceso repetitivo la cantidad de material que devasta la herramienta de corte es constante en todos los ciclos, por lo que el cambio de la pieza a maquinar repercutiría directamente en la presión ejercida y, por lo tanto, se reflejaría en la cantidad de torque que requiere el motor impactando directamente en el consumo energético.

En la tabla 2 se muestran los picos de corriente para cada una de las seis muestras, este máximo de corriente es ocasionado por el arranque y retroceso del motor, es decir al inicio y final de cada ciclo de corte.

Tabla 2 Picos de corriente por muestra.

Muestra	Tiempo efectivo de trabajo (minutos)	Pico de corriente
1	34	2.4092
2	90	2.3493
3	150	2.4262
4	330	2.2920
5	390	2.3969
6	450	2.3554

Es importante recordar que durante las cinco horas de trabajo se realiza la misma extracción de material en todas las muestras.

La tabla 3 muestra uno de los posibles escenarios que se obtendrían al disminuir la demanda de corriente para en las primeras horas de trabajo, tomado la corriente

de la muestra 4 de la tabla 2 como un estándar para las 5 horas de trabajo se tendría un consumo total de 312 amperes contra los 424.245 amperes que se consumen actualmente, lo que implica que tiene una área de oportunidad de ahorro del 26% y que no se habría reflejado para nuestro proceso.

Tabla 3 Corriente demandada en muestreos.

Tipo de corriente	Horas de trabajo	Corriente total
Actual	5	424.245
Propuesta	5	312

#### **4. Discusión**

La administración energética de los procesos industriales es una medida que toman las empresas para reducir costos de producción y ser competitivos en el mercado global. En este trabajo se presenta un estudio de energía de una máquina que opera 8 horas efectivas en una jornada diaria, se monitorea la corriente en la herramienta de mayor desgaste por medio de un PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley.

El objetivo del estudio es cuantificar por medio de la integral numérica el gasto energético de un proceso repetitivo, determinado la relación de desgaste de la herramienta contra el aumento de la corriente eléctrica. Para evaluar el método planteado se utilizó un proceso de lote de producción de entre 1000 a 1500 piezas por turno, el diagrama esquemático de la máquina utilizada se muestra en la figura 3. Es importante mencionar que durante todo el estudio los parámetros de la máquina se mantienen constantes (avances de corte, aceites de corte, espesor de maquinado y velocidades de los husillos).

El estudio demuestra que se tiene un problema al inicio de la vida útil de la herramienta ya que el avance de corte no es el adecuado y la máquina requiere mayor energía para realizar la operación como se aprecia en la tabla 1 donde el área bajo la curva es de 111 amperes comparado con los 75 amperes después de haber trabajado 3 horas. En los datos obtenidos se puede observar que la corriente tiende a incrementarse después de haber alcanzado un mínimo que es

de 52.6 amperes como se aprecia en la tabla 1 y terminando el estudio con una lectura de 58.2 amperes, este incremento de corriente podría indicar el desgaste de la herramienta.

Para tener una mejor visión del fenómeno es conveniente realizar un análisis de caracterización de la herramienta en cada hora de su proceso, lo cual resulta inviable económicamente para la empresa.

Investigaciones futuras estarán encaminadas a optimizar los avances de corte de los diferentes aditamentos y, con base en la información se podrá determinar su viabilidad económica. Este trabajo fundamenta las bases para realizar una inversión de un sistema de monitoreo de la corriente, para optimizar la sustitución de los herramientas.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Aceros SISA (2012). Acero SISA M2. México, DF.
- [2] Ajay, G., Suresh, D., Shailendra, K., & Rajesh, S. (2014). A Study of Experimental Temperature Measuring Techniques. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 82 - 93.
- [3] Botello, S. (2006). Ejemplos de Aplicación de los Métodos Numéricos. Centro de Investigación en Matemáticas.
- [4] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). Métodos numéricos para ingenieros. México: Mc Graw-Hill/Interamericana Editores, SA de CV.
- [5] De Anda, G., & Castillo, E. (2006). Un Método de Monitoreo del Desgaste de una Herramienta de Corte. *Ingeniare • Revista Chilena de Ingeniería*, 124-129.
- [6] Hernández, I., Juárez, C., & Martínez, I. (2015). Interpolación polinomial para determinar el tiempo óptimo de tratamiento criogénico para acero AISI D2 en medio básico. *Pistas Educativas*.
- [7] Hernández, L., Pérez, R., & Dumitrescu, L. (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*, 61-83.

- [8] Jamaica, A., Ortega, G., Guerreo, S., & Conde, D. (Diciembre 2015). Sensores de corriente aplicados al ahorro de energía en iluminación. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 224-229.
- [9] Kai-feng, Z., Hui-qun, Y., & Peng, N. (2015). A method for tool condition monitoring based on sensor fusion. Springer Science+Business Media New York, 1011-1026.
- [10] Kumar, P., & Khandwawala, A. (2016). Measurement and analysis of cutting forces. *International Journal of Structural*, 359-369.
- [11] Longbottom, J., & Lanham, J. (2005). Cutting temperature measurement while machining. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 122–130.
- [12] Mora, D., & Mantilla, J. (2017). Estudio del proceso de combustión en un motor de alto swirl empleando mecánica de fluidos computacional. 33(3-4).
- [13] Paraire, J., & Peiro, J. (1992). Aplicaciones de la supercomputadora en la aerodinámica. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y diseño en Ingeniería*, 215-233.
- [14] Qianqian, Z., Renzhong, T., & Jingxiang, L. (2016). Evaluation on models of calculating energy consumption in metal. *Int J Adv Manuf Technol*, 2087–2099.