

## 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

### Numerical integration of the energy consumption by current measurements to determine the useful life of the lathe tool

MARIN-MARIN, Rafael†\*, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma

CIATEQ A.C.

Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex)

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Rafael, Marin-Marin* / ORC ID: 0000-0002-6495-1716, Researcher ID Thomson: E-1385-2018, CVU CONACYT ID: 670535

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Carlos, Juárez-Toledo* / ORC ID: 0000-0002-7440-3246, Researcher ID Thomson: C-1368-2016, CVU CONACYT ID: 39912

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Irma, Martínez-Carrillo* / ORC ID: 0000-0002-7952-4418, Researcher ID Thomson: B-9264-2016, CVU CONACYT ID: 39914

Recibido Mayo 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

#### Resumen

El estudio del ahorro de energía en los procesos industriales se ha vuelto una prioridad en cualquier empresa, lograr reducir el uso de los recursos energéticos en las empresas las hacen más rentables, competitivas y amigables con el medio ambiente. El objetivo de esta tesis es determinar la vida útil de la herramienta de corte de un torno multihusillo para maquinado de acero al carbón 1045. Para determinar el desgaste que sufre la herramienta se aplica en cada proceso de maquinado la integral numérica a la corriente. Se muestra gráficamente como a medida que la herramienta pierde su propiedad de corte el gasto energético aumenta, incrementando el costo de manufacturación. La contribución de esta tesis es tener un método numérico confiable que pueda determinar la vida útil de las herramientas de corte, investigaciones futuras serán encaminadas a realizar estudios de desgaste a diferentes velocidades de corte y poder determinar la velocidad óptima del maquinado.

**Integral numérica, Gasto Energético, Herramienta de corte**

#### 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, and this increase the cost of each piece that the machine produce. 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.

**Numerical integral, Energy expenditure, Cutting tool**

**Citación:** MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. 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. 2018. 2-5: 10-17.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (rlmnmn@hotmail.com)

## 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 Rionda, 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 (Paire & 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 Zhong, 2016), cada vez el sector industrial exige producir más con menos recursos. Para poder cuantificar el consumo de la energía que los equipos industriales se usan sensores de corriente los cuales se han tomado relevancia ya que ayudan a determinar el punto de partida del consumo actual y muestra si las medidas tomadas realmente ayudan a mejorar el uso del recurso energético (Jamaica González, 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 (J.M. Longbottom, 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 Goyal, 2014), el uso de sonidos que produce la herramienta de corte para determinar su estado (Kai-feng Zhang, 2015) La vida útil de una herramienta de corte también estará en función de la cantidad de material que esta renueve (Luis W. Hernández González, 2011).

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

La presente tesis 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 objetivo es identificar los cambios del consumo de energía y determinar el cambio óptimo de la herramienta y esto ocurrirá cuando el motor consuma una mayor corriente debido al desgaste del filo de la herramienta de corte.

La máquina donde se realiza el análisis consiste en un torno 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 esta tesis se presenta un modelo numérico basado en la integral especial de Simpson  $\frac{3}{4}$  de la corriente de la herramienta de corte de un torno, para determinar el momento del cambio óptimo.

## Métodos de integración numérica aplicados al cálculo del gasto energético de un torno

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).

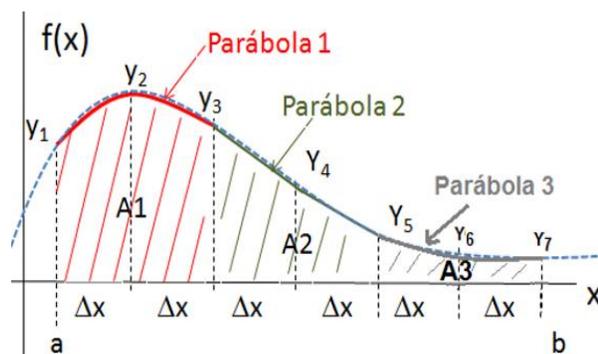
Existen investigaciones que han sido orientados a medir los desgastes en la herramienta (Castillo-Castaneda, 2006), pero no miden las repercusiones de los aumentos de energía por usar herramientas gastadas. En esta tesis se incorpora un PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley sobre el carro donde 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 pueden girar hasta 1000 revoluciones por minuto y es en donde la herramienta sufre un mayor desgaste ya que desbastan 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 siguiente ecuación.

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

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.



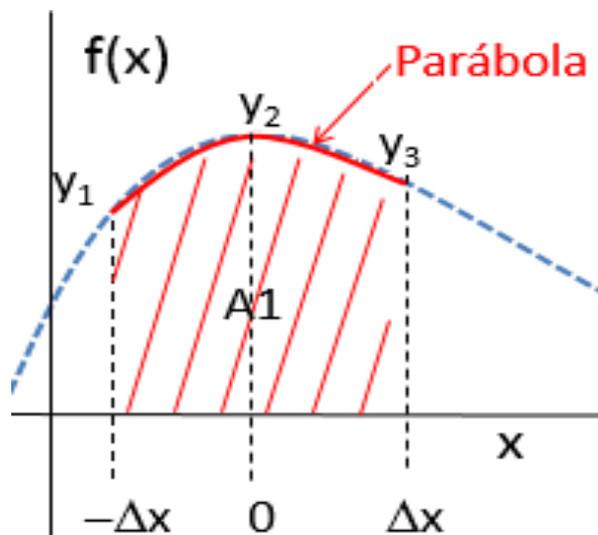
**Figura 1** Integración de Simpson

Fuente: Elaboración Propia

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 s. 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 siguiente ecuación.

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

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

Fuente: Elaboración Propia

Evaluando en los extremos tenemos se obtiene

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

Donde es fácil mostrar que el gasto energético para el primer intervalo de tiempo es (Smith, 2002).

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

Sustituyendo los puntos conocidos  $(-\Delta x, y1)$ ,  $(0, y2)$  y  $(\Delta x, y3)$  en la ec. 2 se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} y1 + y3 = 2a\Delta x^2 + 2c \\ y2 = c \end{cases} \quad (5)$$

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

$$Ap1 = \frac{\Delta x}{3} (y1 + 4y2 + y3) \quad (6)$$

De forma general la suma del gasto energético de todas las áreas es:

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

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.

## Experimentación

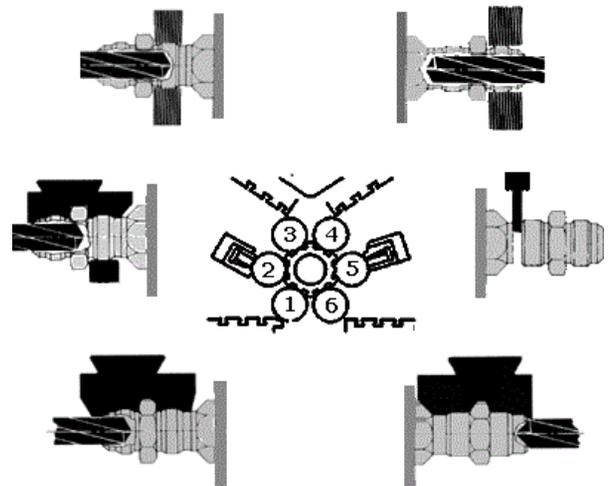
### Descripción del proceso de maquinado

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 es de 50 HP controlado mediante un variador de velocidad de la marca SIEMENS.

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 instalada en el CPU 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. En la figura 3 se muestra una distribución de los componentes de la máquina.



**Figura 3** Diagrama esquemático

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

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 las posiciones 1 y 6 generalmente se instalan las herramientas de forma. 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 es una herramienta de forma, la cual lleva este nombre porque la herramienta tiene maquinada la forma de la pieza que se desea obtener del maquinado, esta herramienta se puede apreciar en la figura 4.



**Figura 4** Herramientas de forma

Fuente: <https://tools.leistritz.com/en/products/tools-overview/flat-form-tools.html>

Las ventajas de la máquina para realizar el estudio son las siguientes:

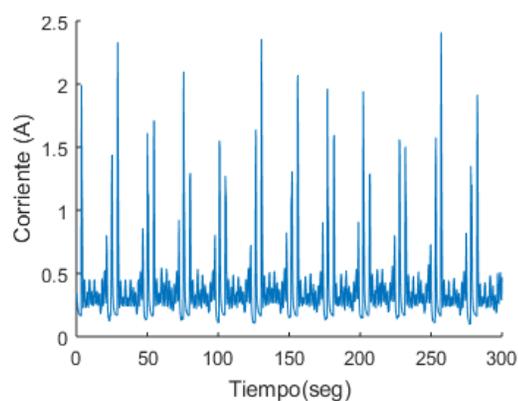
- La fácil instalación del PLC Micrologix 1500 de la marca Allen Bradley con un módulo analógico de 16 bits y un sensor de corriente de la marca LEM instalado en el motor que controla el avance de la herramienta de corte,
- Por el amplio tiempo de operación el cual para cada pieza es de aproximadamente 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.

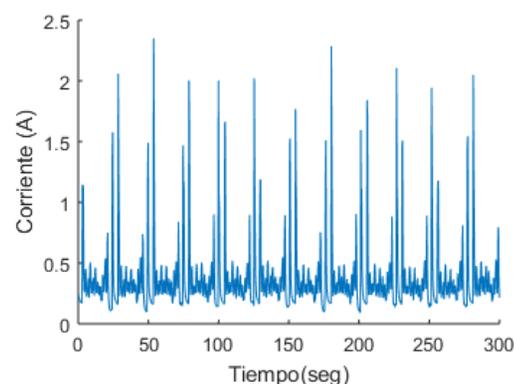
El estudio se realiza con la primera herramienta ya que es la que se encuentra sometida a un mayor desgaste.

La herramienta de forma se fabrica con un acero M2 y se usa 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 aleado al tungsteno y molibdeno es usado en herramientas de corte, debido a que mantiene el filo y tiene resistencia al desgaste (Aceros SISA, 2012). A continuación, se muestra el comportamiento del consumo de corriente de las primeras cinco horas de maquinado (ver figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10).



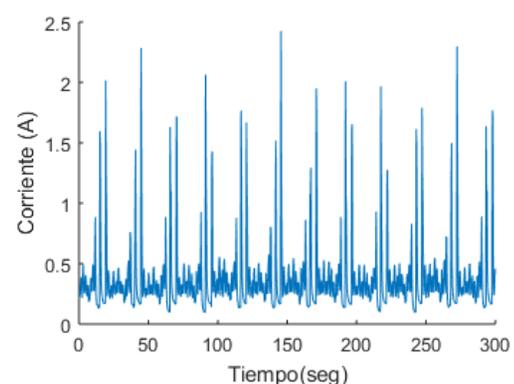
**Figura 5** Muestra 1, inicio de jornada laboral

Fuente: *Elaboración Propia*



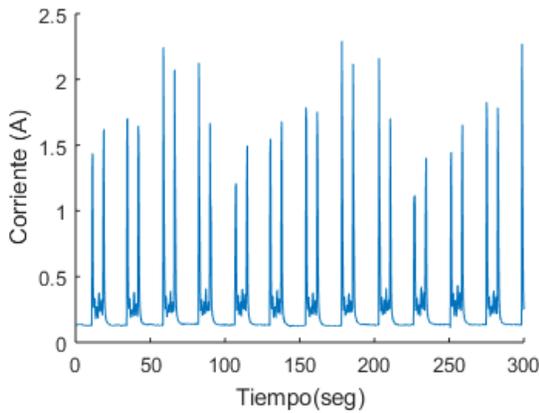
**Figura 6** Muestra 2, herramienta con una hora de trabajo en condiciones normales

Fuente: *Elaboración propia*

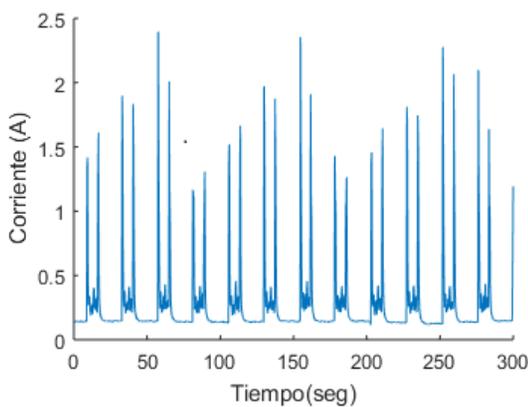


**Figura 7** Muestra 3, herramienta con dos horas de trabajo en condiciones normales

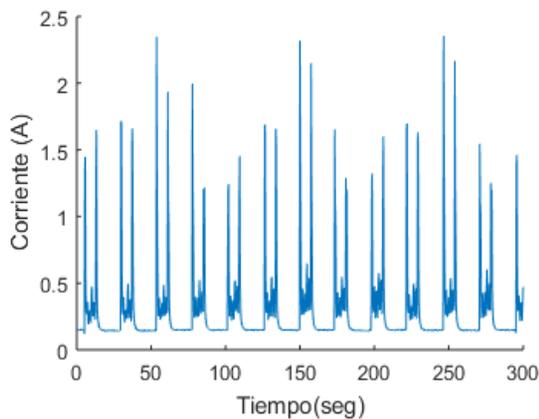
Fuente: *Elaboración propia*



**Figura 8** Muestra 4, herramienta con tres horas de trabajo en condiciones normales  
Fuente: *Elaboración Propia*



**Figura 9** Muestra 5, herramienta con cuatro horas de trabajo en condiciones normales. Fuente: *Elaboración Propia*



**Figura 10** Muestra 6, herramienta con cinco horas de trabajo en condiciones normales y antes del cambio de turno y herramienta  
Fuente: *Elaboración Propia*

En las figuras 5 a la 10 se muestran los casos de estudio que corresponden a las 6 muestras de corrientes tomadas desde inicio de operación hasta el cambio de turno. Como puede notarse en las figuras de corriente (figuras 5-10) lo 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 ya que existe menos contacto con la pieza.

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

**Tabla 1** Resumen de mediciones  
Fuente: *Elaboración Propia*

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

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 (Pradeep Kumar Patil, 2016). Debido a que es un proceso repetitivo la cantidad de material que devasta la herramienta de corte es constante en todos los ciclos,

En la tabla 2 se presentan los picos de corriente de cada una de las seis muestras, dichos picos son producidos en cada inicio y final de maquinado, es decir por el arranque y paro del motor.

Muestra	Pico de corriente (A)
1	2.4092
2	2.3493
3	2.4262
4	2.2920
5	2.3969
6	2.3554

**Tabla 2** Picos de corriente por muestra  
Fuente: *Elaboración Propia*

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

	Trabajo (Horas)	Gasto energético (A*s)
Corriente actual	5	424.245
Corriente Propuesta	5	312

**Tabla 3** Comparativa consumo actual contra corriente de menor consumo de la tabla 2

Fuente: *Elaboración Propia*

La tabla 3 muestra un posible escenario 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 aproximadamente contra lo los 424.245 amperes actuales, implicando un área de oportunidad de ahorro del 26%.

## Conclusiones

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 esta tesis se presenta un estudio de energía de una máquina que opera 8 horas de las cuales se toman los datos de las primeras 5 horas de trabajo 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 con un módulo análogo de 16 bits y un sensor de corriente de la marca LEM.

El objetivo de la tesis 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 la cantidad de piezas elaboradas y 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 de mucho 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.

Si la cantidad de corriente usada es mayor con una herramienta nueva comparada contra la corriente después de haber trabajado por tres horas, se considera necesario realizar un estudio para optimizar la velocidad de corte de la herramienta sobre la cual se está realizando el estudio al inicio del turno.

De los datos obtenidos se puede observar también 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 lo que 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 la viabilidad económica.

En esta tesis se fundamentan las bases para realizar una inversión de un sistema de monitoreo de la corriente, para optimizar la sustitución de los herramientas.

## Referencias

- Ajay Goyal, S. D. (2014). A Study of Experimental Temperature Measuring Techniques. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 82 - 93.
- Botello Rionda, S. (2006). Ejemplos de Aplicación de los Métodos Numéricos. *Centro de Investigación en Matemáticas*.
- Castillo-Castaneda, G. d.-R. (2006). UN METODO DE MONITOREO DEL DESGASTE DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE. *Ingeniare • Revista Chilena de Ingeniería*, 124-129.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. Mexico : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- J.M. Longbottom, J. L. (2005). Cutting temperature measurement while machining. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 122–130.
- MARIN-MARIN, Rafael, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. 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*. 2018.

Jamaica González, A. O.-Z.-O.-S. (Diciembre 2015). Sensores de corriente aplicados al ahorro de energía en iluminación. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 224-229.

Kai-feng Zhang, H.-q. Y. (2015). A method for tool condition monitoring based on sensor fusion. *Springer Science+Business Media New York*, 1011-1026.

Luis W. Hernández González, R. P. (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.

Pradeep Kumar Patil, A. I. (2016). Measurement and analysis of cutting forces. *International Journal of Structural*, 359-369.

Qianqian Zhong, R. T. (2016). Evaluation on models of calculating energy consumption in metal. *Int J Adv Manuf Technol*, 2087-2099.

Smith Allen (2002). Analisis numeric. PHH Prencice Hall, 3017-323