

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA COMO AYUDA EN LA DOCENCIA DE LA ASIGNATURA PROCESOS INDUSTRIALES

DEVELOPMENT OF A COMPUTER APPLICATION AS AN AIDED IN THE LEARNING OF THE SUBJECT INDUSTRIAL PROCESSES

Milton Fabian Coba Salcedo¹

Félix Joaquín Lozano-Cárdenas²

Erika Alejandra Maldonado Estévez³

5 8 5

RESUMEN

CTEM es una aplicación orientada al uso estudiantil y requiere de conocimientos en procesos de manufactura. Se describe el desarrollo de la aplicación CTEM (Condiciones Técnicas y Económicas durante el Mecanizado), que permite hallar de manera didáctica las velocidades de corte eficientes para 4 operaciones de manufactura: cilindrado y refrentado en el torno y fresado frontal y cilíndrico en la fresadora. La aplicación permite, por medio de una interfaz gráfica, que un usuario digite los parámetros básicos para los procesos

¹ miltoncoba@mail.uniatlantico.edu.co, Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-2436-5536>

² felixlozano@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-0832-6374>

³ erikamaldonado@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-1323-8563>

de manufactura mencionados con anterioridad y obtener los siguientes resultados: una gráfica de los criterios de costo y tiempo en función de la velocidad de corte; las velocidades de corte, tiempo de vida útil de la herramienta y RPM para los criterios de máxima producción, mínimo costo y máximo beneficio, definidos por estudios dedicados a la economía en los procesos de corte.

ABSTRACT

CTEM is an application oriented to student use and requires knowledge of manufacturing processes. The development of the CTEM (Technical and Economic Conditions during Machining) application is described, which allows to find in a didactic way the efficient cutting speeds for 4 manufacturing operations: turning and facing on the lathe and face and cylindrical

milling on the milling machine. The application allows, through a graphical interface, a user to enter the basic parameters for the above mentioned manufacturing processes and obtain the following results: a graph of the cost and time criteria as a function of cutting speed; the cutting speeds, tool life time and RPM for the criteria of maximum production, minimum cost and maximum profit, defined by studies dedicated to the economics of cutting processes.

1. INTRODUCCION

En todo proceso se requiere la optimización de recurso y tiempo, por esta razones se recurre a softwares y aplicaciones que facilitan el cálculo de factores importantes y que tengan como finalidad ofrecer al usuario valores “eficientes”.

La estimación de costes en el mecanizado, es un tema complejo, por cuanto implica la consideración de factores que no tiene un relación claramente lineal, además que está influenciado por el enfoque de estimación que se utilice, por ejemplo, se han encontrados enfoques que incluyen mejorar simultáneamente el coste de mecanizado, la calidad y el impacto medioambiental [1], características geométricas y las actividades o procesos de fabricación involucrados [2] o enfoque donde se plantea el uso de una aplicación web [3]. La estimación temprana del coste de las piezas mecanizadas es difícil, ya que requiere información detallada del proceso que no suele estar disponible durante la etapa de diseño, las técnicas de inteligencia artificial como modelos de redes de Petri [4], redes neuronales (CNN) [5], criterios múltiples de decisión (MCDM) [6], Python [7], entre otros [8-9-10], están siendo ampliamente utilizadas puesto que permiten la manipulación y predicción de resultados con gran número de variables y múltiples escenarios de respuesta.

Este artículo describe el desarrollo de la aplicación CTEM (Condiciones Técnicas y Económicas durante el Mecanizado), que

permite hallar, comparar y comprobar de manera didáctica las velocidades de corte eficientes para 4 operaciones de manufactura: cilindrado y refrentado en el torno y fresado frontal y cilíndrico en la fresadora, bajo distintas condiciones y criterios. Se han desarrollado, por ejemplo programas como Mecacost 1.0, para el cálculo de costes de operaciones de mecanizado convencional, es decir fresado y torneado [11].

Con un enfoque en innovar en las metodologías de enseñanza en ingeniería de desarrollo de productos y procesos donde se requiere el desarrollo de competencias hacia la toma de decisiones basadas en criterios de diseño racional y razonado, se plantea como alternativa en la enseñanza de los cursos convencionales de procesos de fabricación la utilización de herramientas en donde el estudiante relacione todos los aspectos teóricos y prácticos y las relaciones claves en la ingeniería de fabricación, que integre en el cálculo de los costos las competencias técnicas y profesionales más importantes en la formación del ingeniero

Los programas disponibles actualmente para este tipo de cálculos no han sido creados con el propósito de ser utilizados con fines didácticos o en entornos educativos, además de presentar una elevada complejidad, poco uso de gráficos y costos elevados.

2. ECUACIÓN DE TAYLOR GENERALIZADA

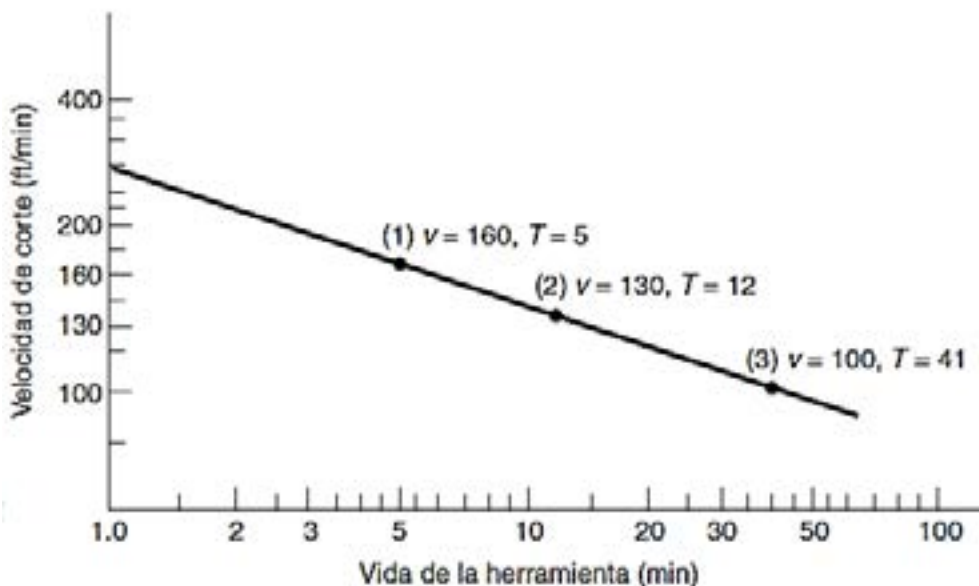
Frederick Winslow Taylor fue un ingeniero industrial y economista nacido el 20 de marzo de 1856 en Filadelfia, promotor de la organización científica del trabajo y padre de la administración científica [12]. A finales del siglo XIX, surgió en Estados Unidos el movimiento de la administración científica, en respuesta a la necesidad de planear y controlar las actividades de un número en aumento de trabajadores. Los líderes del movimiento incluían a Frederick W. Taylor, Frank Gilbreth (1868-1924) y su

esposa Lilian (1878-1972) quienes crearon la administración científica basada en: el estudio de movimientos para ejecutar tareas, el estudio de tiempos de producción, el uso amplio de estándares en la industria, el sistema de pago a destajo y otros planes similares de incentivos del trabajo y el uso de conjuntos de datos.

El taylorismo, en organización del trabajo, hace referencia a la división de las distintas tareas del proceso de producción. Fue un método de organización industrial, cuyo

fin era aumentar la productividad y evitar el control que el obrero podía tener en los tiempos de producción. Está relacionado con la producción en cadena” [13]. De este modo fue fácil para Taylor aplicar sus conocimientos en el proceso de mecanizado y definir que, si los valores de vida de las herramientas para las tres curvas de desgaste se grafican de modo logarítmico, la relación resultante es una línea recta, como se muestra en la Figura 1 [14].

Figura 1. Gráfica logarítmica de la velocidad de corte contra vida de la herramienta.



Fundamentos de manufactura moderna, 3 ed. [15]

La teoría de Taylor parte de una relación entre la velocidad de corte, la vida útil de la herramienta y las condiciones de trabajo, descubierta hacia el año 1900 y que fue expresada por medio de una ecuación [14]. Esta última surgió del cálculo de la velocidad de corte para una duración de la herramienta entre dos afilados. Para ello Taylor realizó una serie sistemática de pruebas en la cual manipulo factores que inciden sobre las condiciones económicas de corte [14],

Los resultados obtenidos proporcionaron una gráfica de pares de valores V_c - T (Figura 1) de la cual se dedujo que, “siempre que permanecieran fijos 10 parámetros, cuales fuera su valor, se obtenía una recta” y al realizar un análisis cuantitativo, Taylor determinó una ecuación denominada “Ecuación de Vida de la Herramienta de corte o Ecuación de Taylor”.

$$V_c * T^n = K \quad (1)$$

Donde V_c es la Velocidad de corte, T la duración del fijo de la herramienta en tiempo, n es un coeficiente característico para el tipo

de herramienta de corte y K una constante que engloba los otros parámetros involucrados en el proceso de corte.

Debido a que la ecuación de Taylor solamente se puede usar cuando permanecen fijos los parámetros de ensayo englobados en K , se construye la ecuación de Taylor generalizada por investigadores posteriores a Taylor como O. Kienzle, H. Victor, entre otros [16]; la cual evalúa la influencia del desgaste de la cara de incidencia (VB), el espesor de viruta (h) y el ancho de viruta (b) sobre la constante K .

La ecuación de Taylor se modificó en 3 aspectos:

$$Vc = \frac{K}{a^x \cdot p^y \cdot T^{n_{VB}}} \quad (2)$$

Analiza coeficientes y , x y $K4$ que dependen del material de la pieza y de la herramienta. Estos valores se encuentran tabulados de acuerdo al material a mecanizar, posición y tipo de la herramienta.

Analiza la influencia del espesor y del ancho de viruta en el proceso, por medio de las variables principales que son el avance (a) y la profundidad (p), estos valores también se encuentran tabulados.

Representa o engloba los valores VB , $\text{sen}(x)$ y $K4$ en una constante " K ", que se define como una velocidad de corte para $a = p = 1 \text{ mm}$, $T = 1 \text{ minuto}$ y valores fijos de VB y posición de la herramienta [16].

3. CRITERIOS ECONÓMICOS DE LAS CONDICIONES DE CORTE

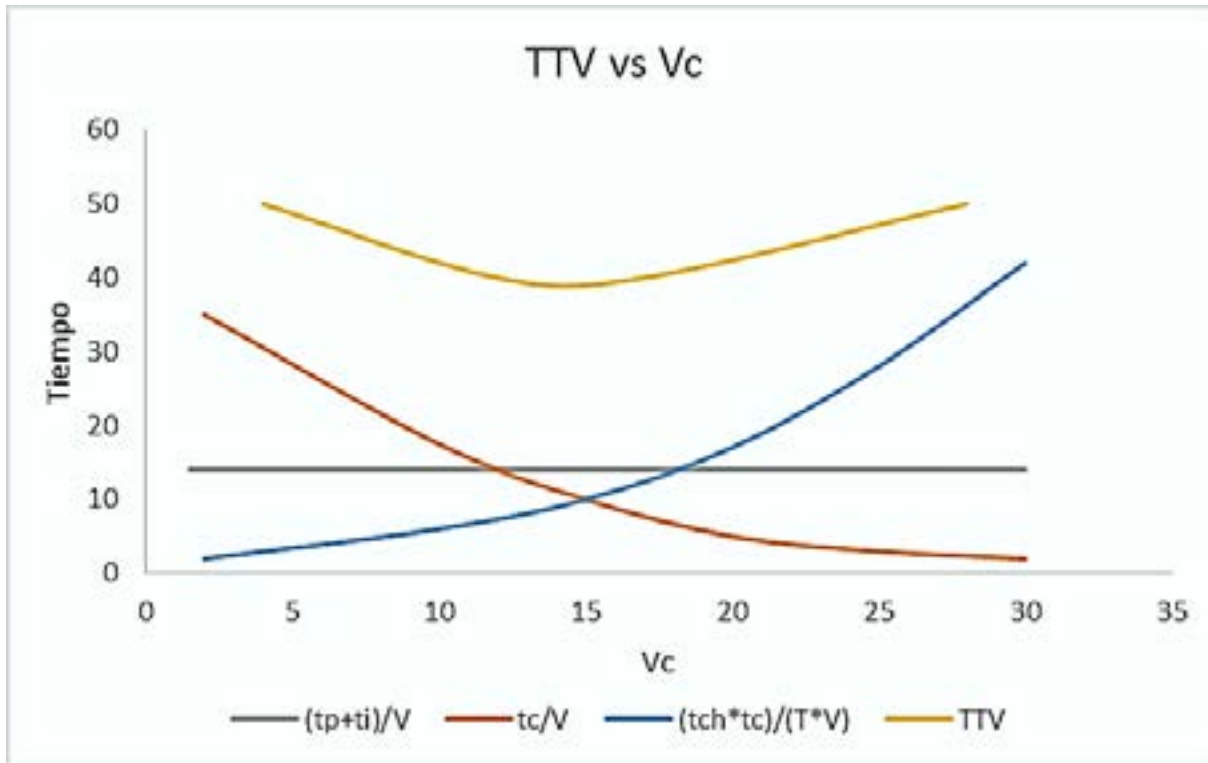
Los criterios y ecuaciones económicas del mecanizado se acreditan a W. Gilbert, las cuales dependen del volumen de la viruta arrancada de acuerdo a la operación de corte usado y permiten calcular las velocidades óptimas de corte [16].

3.1. Máxima producción por unidad de volumen (MP)

El tiempo de producción de una pieza, está conformado por la suma de los tiempos asociados a la operación por arranque de viruta y los tiempos no asociados o externos a la operación. La minimización del tiempo de corte por unidad es equivalente a la maximización de la velocidad de producción, convirtiéndose en prioridad que las órdenes de producción se terminen tan rápido como sea posible. Existen cuatro tiempos que contribuyen a la duración del ciclo de producción total para una pieza [17-18]. Figura 2.

- *Tiempo de manejo o preparación de la pieza (t_p):* es el tiempo que utiliza el operador para cargar la pieza en la máquina herramienta al principio del ciclo de producción y descargar la pieza después de completar el maquinado.
- *Tiempo de improductividad (t_i).*
- *Tiempo de corte (t_c):* es el tiempo real en que la herramienta desempeña el mecanizado durante un ciclo productivo. El tiempo de corte se calcula de acuerdo al proceso de corte que se esté realizando.
- *Tiempo de cambio de la herramienta (t_{ch}):* es el tiempo tomado para el cambio de la herramienta cuando la vida de la herramienta finaliza. Este tiempo debe dividirse entre el número de piezas que se produjeron durante la vida de la herramienta.

Figura 2. Representaciones gráficas de las curvas formadas por el tiempo de producción por unidad de volumen del material arrancado con respecto a T y la velocidad de corte.



5 8 9

Fuente: Autores.

3.2. Mínimo costo por unidad de volumen (CM)

El costo de producción de una pieza, al igual que el tiempo de producción, está conformado por la suma de los costos asociados y los no asociados a la operación. Para los costos asociados a la operación, se establece la velocidad que minimiza el costo de producción por unidad de producto para la operación. Se inicia con los cuatro componentes de costo que, determinan el costo total por unidad durante una operación de mecanizado por arranque de viruta [17, 18]. Figura 3.

➤ *Costo del tiempo de manejo o preparación de la pieza (C_p):* es el costo del tiempo que utiliza el operador cargando y descargando la pieza.

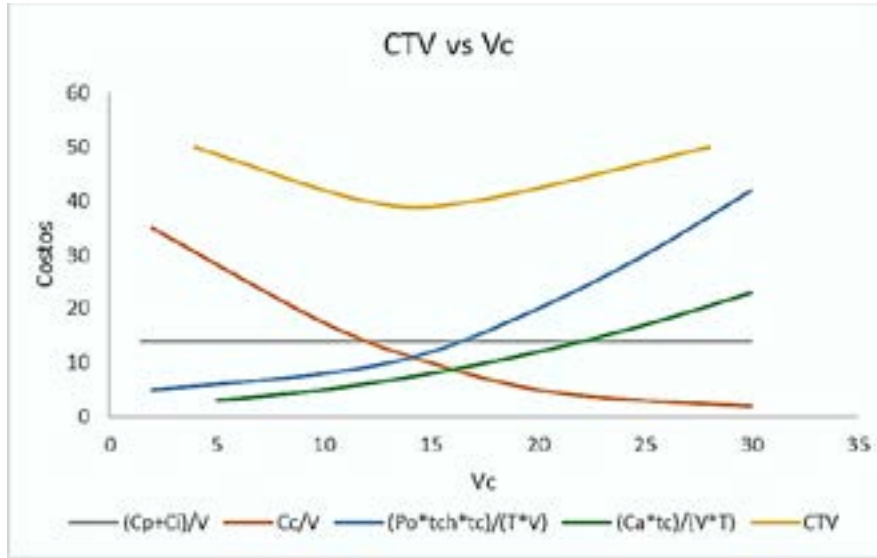
➤ *Costo del tiempo de mecanizado o*

corte (C_c): es el costo del tiempo que toma la herramienta para hacer el mecanizado o corte

➤ *Costo del tiempo improductivo (C_i):* es el costo del tiempo de inactividad operativa por eventos como falta de materia prima.

➤ *Costo de la herramienta (C_h):* este costo es relativo al filo de corte. Depende del número de piezas y del tiempo de cambio de la herramienta.

Figura 3. Representaciones gráficas de las curvas formadas por los costos de producción por unidad de volumen del material arrancado con respecto a T y la velocidad de corte.



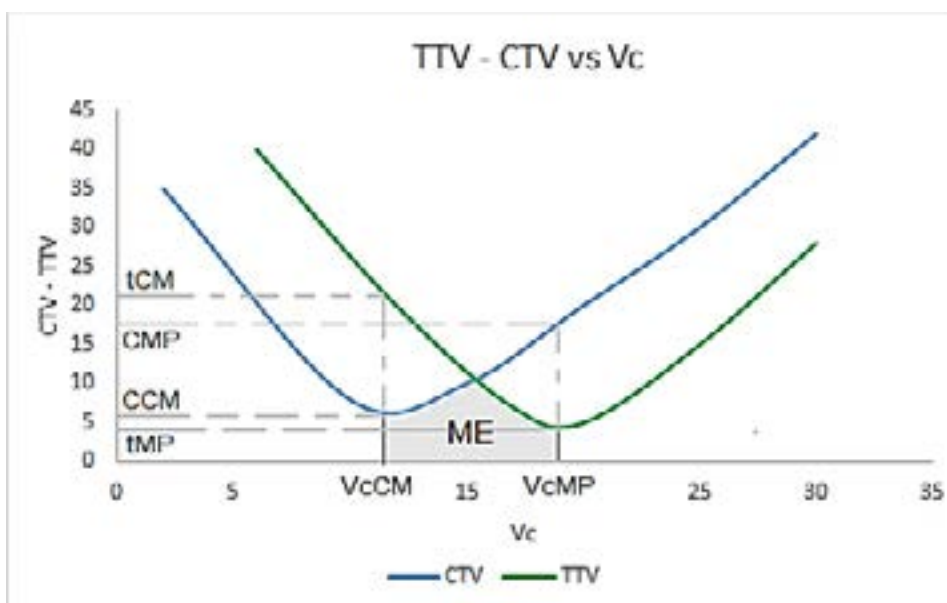
Fuente: Autores.

3.3. Máximo beneficio o máxima eficiencia por unidad de volumen (ME)

Es una zona conformada entre la velocidad de corte del criterio de mínimo costo y el de máxima producción. En la Figura 1 y 2, se muestra la gráfica que se obtiene de la suma de tiempos y costos de producción con respecto a la velocidad

de corte y a la vida de la herramienta [19]. Al unir estas dos curvas (TTC y CTV), se genera un área de máxima eficiencia, como lo muestra la Figura 3.

Figura 3. Curvas de costos y tiempos en función de T y la velocidad de corte; zona de máxima eficiencia (ME).



Fuente: Autores.

1. DISEÑO DEL ALGORITMO

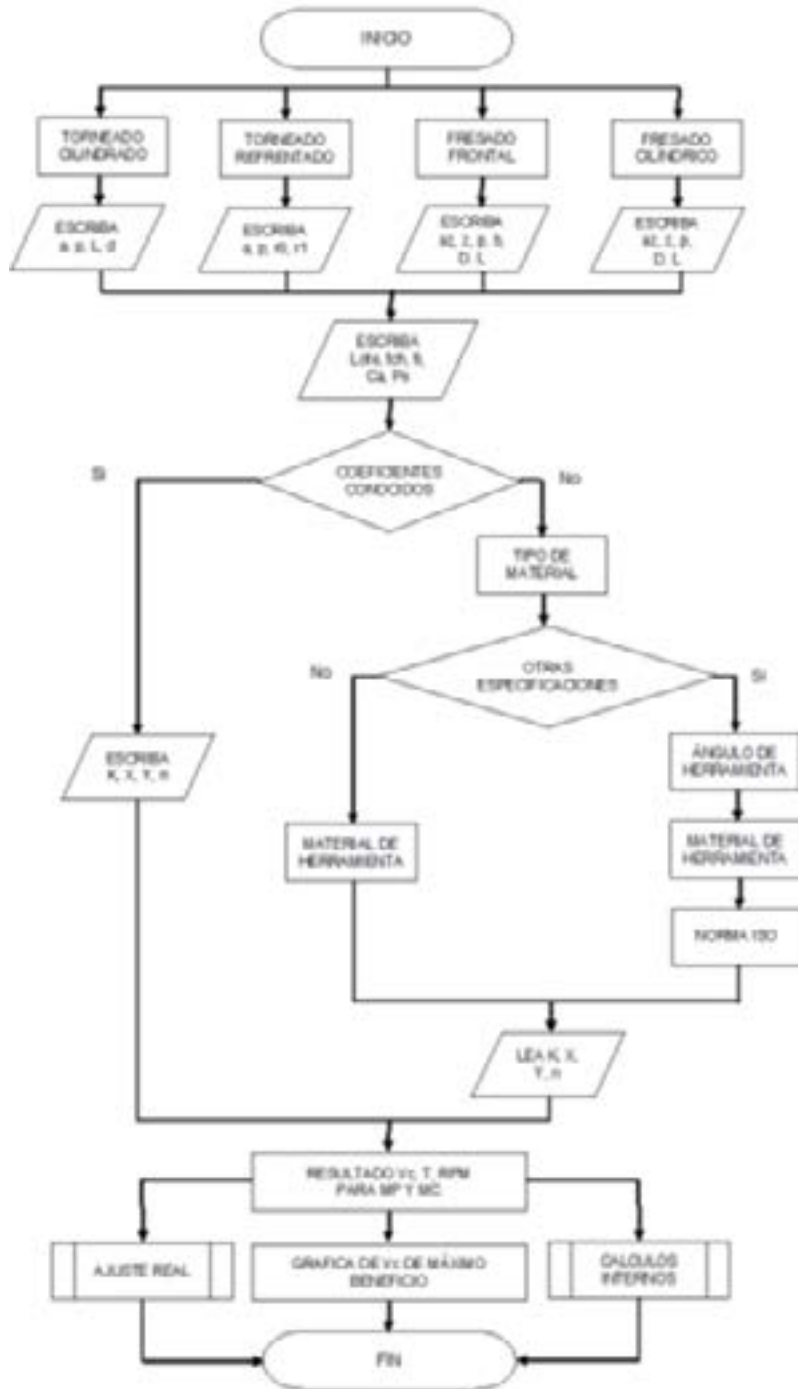
La aplicación “Condiciones Técnicas Y Económicas durante el Mecanizado” (CTEM) es una aplicación para uso a nivel universitario, es una herramienta que permitirá reforzar conocimientos ingenieriles sobre optimización de procesos de mecanizado o economía del mecanizado, está desarrollada en el Software Matlab, dado que este permite usar muchas herramientas para graficar e incluso programar y crear un software independiente, por medio de comandos como GUIDE (GUI development environment). GUI (Graphical User Interface) es un entorno de programación visual para realizar y ejecutar programas que necesiten continuo ingreso de datos [20].

Debido a que existen muchos procesos de mecanizado, se limitó la cantidad de procesos que podría calcular a fin de mostrar los criterios de los cuales se hablaban en el ítem anterior, máxima producción y mínimo coste. Es por ello que se decidió escoger 4 procesos conocidos a nivel general en las diferentes áreas de la ingeniería como lo son el cilindrado y el refrentado, realizados en el torno y el fresado cilíndrico y frontal, realizados por la fresadora.

Una vez definido estos 4 procesos, se investigaron las variables principales que se presentan durante el proceso y que son vitales para el cálculo de la velocidad y la durabilidad de la herramienta. Variables como el avance, la profundidad, dimensiones de la pieza, número de dientes, entre otros, se verían afectadas por otros parámetros de costos y tiempos que van relacionados con la obtención de los valores propios de cada criterio de economía del mecanizado. Por otra parte, partiendo que se tiene una pieza definida como un eje, por ejemplo, se necesitan unos coeficientes propios que caracterizan cada material y a las herramientas que realizan el proceso de corte ya que, como es sabido, los materiales por naturaleza tienen miles de propiedades como

la resistencia, la dureza, la maquinabilidad, la elasticidad, la conductividad térmica, etc. Este tipo de información se encuentra registrada en amplias tablas que son difíciles de conseguir y en ocasiones, su mala interpretación puede llevar a un mal cálculo. Otras aplicaciones ofrecen estas tablas anexadas como alternativa a una búsqueda rápida, pero CTEM tenía por objetivo lograr un diseño más dinámico y se estableció ingresar estas tablas al sistema, para que el usuario por medio de filtros, llegara más rápido y de forma segura a la información correspondiente al material y la herramienta elegida. Figura 4.

Figura 4. Algoritmo para CTEM.



592

Finalmente, uno de los objetivos principales de la aplicación es incluir las curvas de máxima producción y mínimo coste que permiten hallar el punto de máximo beneficio del proceso. Sin embargo, basándose en crear una aplicación de uso universitario, se adiciono una ventana

en la aplicación donde se puede visualizar los cálculos internos para fines estudiantiles y realizar un ajuste de cálculo en caso de hablar de un caso real y obtener datos más cercanos al concepto de máximo beneficio. Figura 5.

Figura 6. Página de inicio de la aplicación CTEM



Figura 7. Procesos por arranque de viruta analizados por CTEM.



Fuente: Autores.

CTEM permite digitar variables y las dimensiones de la pieza como longitud (L), diámetro (D), avance (a) y profundidad (p), para los

procesos de cilindrado y refrentado, mostrando gráficamente donde hallar el valor en la pieza o en el movimiento de máquina. Figuras 8 y 9.

5 9 4

Figura 8. Variables y dimensiones del proceso de cilindrado en CTEM.



Figura 9. Variables y dimensiones del proceso de refrentado en CTEM



Fuente: Autores.

Estas variables son digitadas en la aplicación en las casillas que se muestran en las Figuras 10 y 11. CTEM proporciona imágenes dentro de la aplicación que muestran como hallar estas variables, con la finalidad que el estudiante se sienta más orientado a introducir los valores

correspondientes para que obtenga resultados lo cercanos al proceso real. Es importante tener claro que estas variables no pueden ser casillas vacías porque son de suma importancia para el cálculo de la velocidad de corte y de ello depende la formación de las curvas de máxima producción, mínimo coste y máximo beneficio.

Figura 10. Panel de variables y dimensiones del proceso de fresado frontal en CTEM.

Figura 11. Panel de variables y dimensiones del proceso fresado cilíndrico en CTEM

5 9 5

Fuente: Autores.

5.1. Parámetros económicos del mecanizado por arranque de viruta

Se define como parámetros económicos a los costos de operario, los costos de máquina y el costo de las herramientas utilizadas en el

mecanizado [15]. En la aplicación CTEM, estos parámetros son idénticos en cualquiera de las operaciones que sea escogida (cilindrado, refrentado, fresado frontal o fresado cilíndrico) e incluye los valores observados en la Figura 12.

Figura 12. Panel de parámetros económicos en CTEM.

Fuente: Autores.

Para aplicar criterios de economía de mecanizado, es importante que la cantidad de piezas que se realizan sean masivas, es por eso que está incluido el número de lote.

La tasa horaria de funcionamiento del torno (P_o) dependerá del costo del operario y los costos de la máquina. Figura 13. El primer término cuantifica en unidades monetarias por hora y se desglosa en dos componentes: el salario en sí mismo y la agrupación del resto de costos como seguridad social y complementos. El segundo término cuantifica los gastos generales de la máquina, es decir los costos de mantenimiento y el consumo energético, las horas de uso de la máquina y el período de amortización.

Figura 13. Panel de cálculo de tasa horaria de funcionamiento de la maquina en CTEM.

Fuente: Autores.

CTEM fue diseñado con una serie de filtros que facilitan la búsqueda de los coeficientes K, X, Y y n, por medio de la utilización de los comandos y componentes de la GUI; estos permiten al usuario escoger y que visualice un resultado de acuerdo a lo que seleccione y adicional, también permite la digitación directa de los valores de los coeficientes como lo muestra la Figura 14.

Figura14. Panel de cálculo o digitación de coeficientes de influencia en la ecuación de Taylor generalizada en CTEM.

Fuente: Autores.

5.2. Criterios de economía durante el mecanizado en CTEM

CTEM permite el cálculo de los criterios de economía durante las operaciones de corte de cilindrado, refrentado, fresado frontal y fresado cilíndrico, como lo muestra la Figura 15.

Figura 15. Panel de aplicación de criterios al proceso seleccionado CTEM.



Fuente: Autores.

Una vez digitados todos los parámetros y variables que caracterizan el proceso seleccionado en los paneles anteriores de la aplicación, al presionar el botón “calcular”, CTEM ejecuta las ecuaciones que caracterizan al proceso para obtener el resultado según dos criterios: máxima producción y mínimo costo. El documento *.m* de la GUI, guarda todas las ecuaciones descritas en el capítulo anterior con el fin de hallar los resultados; así, para el proceso de cilindrado, CTEM hallará la velocidad y tiempo de vida de la herramienta según máxima producción y mínimo.

5.3. Gráfica de criterio de Máximo Beneficio (MB)

CTEM permite observar la región que caracteriza esta eficiencia en el proceso. Suponga usted un ejemplo de valores como los mostrados en la Figura 16 para los paneles “Propiedades del proceso de corte” y “Coeficientes del proceso de corte” respectivamente; al presionar el botón calcular, se obtiene los resultados y grafico mostrados en la Figura 17:

Figura 16. Ejemplo de digitación de valores para los paneles propiedades del proceso de corte y coeficientes del proceso de corte



Figura 17. Ejemplo No. 2 de resultados y gráfica MP – CM vs Vc para hallar las velocidades de corte de MB.



Fuente: Autores

En caso de tener dificultad para tomar un valor, debido a la poca visualización de la gráfica, CTEM permite guardar el documento como .pdf para registrar los datos obtenidos en caso de realizar un informe y para acercar la gráfica, permitiendo un mejor detalle de los resultados.

5.4. Detalle de costos y tiempos para obtener CM y MP

De acuerdo a uno de los enfoques de CTEM, como lo es el ser usado en aulas universitarias a quienes corresponda estudiar los procesos de

manufactura, permite mostrar un panel llamado “Costos y tiempos del proceso de corte”, donde el estudiante, aprendiz, tutor, entre otros, pueden observar los valores base para el desarrollo de la ecuación del cálculo de la velocidad de corte y el tiempo de la herramienta, según el criterio de mínimo costo y máxima producción. Figura 18. Así mismo, este panel permite crear un documento .pdf con fines informativos, de soporte o para un análisis posterior de los resultados obtenidos.

Figura 18. Panel de costos y tiempos del proceso de corte para cálculo de CM y MP.



Fuente: Autores

5.5. Ajuste de criterio de acuerdo a las RPM ofrecidas por la máquina y Vc de Máximo Beneficio

CTEM ofrece la posibilidad de volver a calcular la velocidad de corte y otros factores importantes del proceso como tiempo y costo por pieza, sin necesidad del ingresar nuevamente los valores del proceso de corte, por medio del panel “Aplicación de criterios al proceso de corte por RPM de la máquina”, en este caso torno o fresadora. En este panel se digitan los valores de RPM reales de la máquina y cercanos a los obtenidos por CTEM en el panel de resultados (Figura 19). Adicionalmente, se puede calcular

los valores correspondientes a un proceso de Máximo Beneficio al digitar una velocidad de corte que se encuentre dentro del rango ofrecido por la gráfica en el panel de respuestas (Figura 20).

Figura 19. Panel de aplicación de criterios al proceso de corte por RPM reales de la máquina.



Figura 20. Panel de aplicación de criterios al proceso de corte por RPM y Vc escogida de la gráfica de CM – MP vs Vc.



Fuente: Autores.

3. CONCLUSIONES

El desarrollo de CTEM ofrece a los estudiantes y entes educativos un software que analice las ecuaciones de economía en el mecanizado, facilitando el cálculo de tiempo de la herramienta, velocidades de corte y revoluciones por minuto recomendables para 4 procesos, según criterios de mínimo costo, máxima producción y máximo beneficio por medio de la ecuación de Taylor generalizada, con una plataforma dinámica y mostrando graficas que permiten al usuario evaluar por sí mismo la velocidad de corte más eficiente según el ejercicio teórico lo plantee.

CTEM fue el resultado de compilar, las ecuaciones expuestas por diferentes textos fundamentados en la manufactura, en una GUI que permite una entrada de datos condicionados de acuerdo a las recomendaciones para la ejecución de procesos de cilindrado, refrentado, fresado frontal y fresado cilíndrico, y una salida de datos con gráficas, panel de verificación de cálculos y panel de ajustes de acuerdo a los resultados arrojados.

Al finalizar el desarrollo de CTEM, se validó la aplicación mediante estudio de casos, a través de la comparación de datos prueba como los ejercicios propuestos por libros enfocados procesos de manufactura y ejercicios propuestos por el profesor de la asignatura

y los estudiantes, lo que permitió demostrar a través de porcentajes de error y valores de los resultados, verificar su funcionalidad para el cálculo de economía en el mecanizado en aulas estudiantiles.

Por medio de esta aplicación se espera generar en los estudiantes la inquietud de explorar más acerca de la economía en los procesos de manufactura que a diario, junto con los avances tecnológicos y el control numérico, permiten al usuario mejorar en la productividad y en extender la vida útil de la máquina y las herramientas que maneja.

Se recomienda para trabajos futuros, realizar validaciones experimentales en ambientes de producción.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Nicolaou, P., Thurston, D. L., and Carnahan, J. V. (2002). "Machining Quality and Cost: Estimation and Tradeoffs." ASME. J. Manuf. Sci. Eng. November 2002; 124(4): 840–851. <https://doi.org/10.1115/1.1511169>

- [2] Jung, JY. Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing* 13, 227–238 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1016092808320>
- [3] David Ben-Arieh & Qian Li (2003) Web-based cost estimation of machining rotational parts, *Production Planning & Control*, 14:8, 778-788, DOI: [10.1080/09537280310001647896](https://doi.org/10.1080/09537280310001647896)
- [4] DKiritsis, K.-P Neuendorf, P Xirouchakis. (1999) Petri net techniques for process planning cost estimation, *Advances in Engineering Software*, Volume 30, Issue 6, 1999, Pages 375-387, ISSN 0965-9978, [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00126-4).
- [5] Fangwei Ning, Yan Shi, Maolin Cai, Weiqing Xu, Xianzhi Zhang, Manufacturing cost estimation based on the machining process and deep-learning method, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 56, 2020, Pages 11-22, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.011>.
- [6] Hameed H.S., Prabukarhi A., Guhapranav P., Deva Surya S. (2021) Multiple Criterion Decision-Making Technique for Optimization of Machining Parameters: A Case on Drilling of Titanium Alloy. In: Mohan S., Shankar S., Rajeshkumar G. (eds) *Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9809-8_26
- [7] S. Nandhakumar, R. Thirumalai, J. Viswaaswaran, TA. Senthil, VT. Vishnuvardhan, Investigation of production costs in manufacturing environment using innovative tools, *Materials Today: Proceedings*, Volume 37, Part 2, 2021, Pages 1235-1238, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.433>.
- [8] Soyoung Yoo, Namwoo Kang, Explainable artificial intelligence for manufacturing cost estimation and machining feature visualization, *Expert Systems with Applications*, Volume 183, 2021, 115430, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115430>.
- [9] Kurasova, O., Marcinkevičius, V., Medvedev, V., & Mikulskienė, B. (2021). Early cost estimation in customized furniture manufacturing using machine learning. *International journal of machine learning and computing*, 11(1), 28-33. <https://doi.org/10.18178/ijmlc.2021.11.1.1010>
- [10] Armillotta, A. (2021). On the role of complexity in machining time estimation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01741-y>
- [11] BALART, R.; GARCÍA-SANOQUERA, D.; FENOLLAR, O.; BORONAT, T. y SÁNCHEZ-NÁCHER, L. *Aplicación para la docencia en ingeniería: cálculo de costos de mecanizado*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia (UPV), 2011.

- [12] TAYLOR, Frederick W. The Principles of Scientific Management. New York: Cosimo Classics, 2010. 84 p.
- [13] Taylorismo. Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0, 2013. [cited 16 agosto 2020]. Available from internet: < <https://es.wikipedia.org/wiki/Taylorismo?oldid=91113471>>.
- [14] Taylor, F. W. (1906). On the art of cutting metals (Vol. 23). American society of mechanical engineers.
- [15] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Traducido por Carlos Roberto Cordero Pedraza, Javier Enríquez Brito y Jesús Elmer Murrieta Murrieta. 3 ed. Mexico: McGraw Hill, 2007. 1015 p.
- 6 0 1 [16] MICHELETTI, Gian F. Fuente: Mecanizado por arranque de viruta. Barcelona: Blume, 1980. Vol. 1.
- [17] BOTHROYD, Winston. Velocidades de corte y economía del mecanizado. Madrid: Narcea S.A. Ediciones, 1991. Tema 30.4. 20 p.
- [18] KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven R. Manufactura, ingeniería y tecnología. 5 ed. Mexico: Pearson Prentice Hall, 2008. 1267 p.
- [19] DENNIS, Charles. Velocidades de corte y economía del mecanizado. Abingdon: 2&4 Park Square, 1991. Taylor and Francis.
- [20] Matlab User Guide. 2021^a.