

# Simulación del comportamiento dinámico de un torno de control numérico en entornos virtuales

## Simulation of the dynamic behavior of a lathe of numerical control in virtual environments

Miguel Angel Hidalgo S<sup>1</sup>. M.Sc., Fabio Andrés Rojas<sup>2</sup>. P.hD., Jesús David Cardona<sup>1</sup>. M.Sc. Luis Joyanes Aguilar<sup>3</sup>. P.hD.

1. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

2. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia

3. Universidad Pontificia de Salamanca, España

mahidalgo@uao.edu.co; farojas@uniandes.edu.co; jdcardona@uao.edu.co; luis.joyanes@upsam.net

Recibido para revisión 25 de febrero de 2009, aceptado 10 de febrero de 2010, versión final 2 de marzo de 2010

**Resumen**—Se presenta el resultado de una investigación en la que se desarrolló un entorno virtual con la asistencia de herramientas matemáticas y de programación 3D para la simulación del comportamiento dinámico de un torno CNC en procesos de mecanizado. Como parte de este trabajo se generó una interfaz que permite la visualización y simulación 3D en un entorno virtual de las diferentes operaciones de corte en un torno CNC a través de Internet, además, el proyecto permite consultar una base de datos en la que es posible obtener variables experimentales de mecanizado de diferentes materiales para corte ortogonal. La interacción con los objetos del entorno virtual permite finalmente generar código G para programar máquinas CNC reales.

**Palabras Clave**—Torno Virtual, Simulación Digital, Máquinas CNC, Manufactura Virtual.

**Abstract**—This paper presents the results of an investigation that developed a virtual environment with the assistance of mathematics tools and programming 3D for the simulation of dynamic behavior of a CNC lathe in mechanized processes. As part of this work was built an interface that allows the visualization and simulation 3D in a virtual environment of the different operations of court produce by a CNC lathe through the Internet, in addition, the project allows to consult a database in which its possible obtain experimental variables of mechanized of diferent materials for orthogonal court. The interaction with objects in the virtual environment finally allows generate G code for programming CNC machines real.

**Keywords**—Virtual lathe, Digital Simulation, CNC Machines, Virtual Manufacturing.

### I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería basada en la simulación se ha convertido en una herramienta indispensable para asistir el diseño y manufactura de componentes de máquinas y productos. La ingeniería virtual es un método basado en la simulación, dentro de la ingeniería virtual esta contenido el término manufactura virtual, que es una tecnología emergente que resume actividades de manufactura computarizada con modelos, simulación e inteligencia artificial, en lugar de objetos y sus operaciones en el mundo real.

Se refiere ampliamente al modelado de sistemas de manufactura y componentes con el uso eficaz de accesorios audiovisuales y sensoriales para simular o diseñar alternativas para un ambiente de manufactura real, principalmente a través del uso eficaz de computadores. La motivación de la manufactura virtual es reforzar la habilidad de predecir los problemas potenciales antes de que suceda la manufactura real [1]. Este artículo plantea un primer acercamiento a la manufactura virtual, debido a que la plataforma de trabajo está pensada para que posteriormente se puedan vincular periféricos. El entorno virtual es un marco computacional en el cual las propiedades físicas y geométricas de sistemas reales son exactamente simuladas.

La ingeniería virtual incluye la simulación de varias actividades de ingeniería como el mecanizado, ensamble, operaciones en líneas de producción, inspección y evaluación como también el proceso de diseño. Así la ingeniería virtual puede extenderse a un completo desarrollo del producto y a un ciclo de producción. Por ejemplo, después de que una parte ha sido modelada, se realiza la simulación por mecanizado o ensamble, luego se realiza

la prueba y el rediseño durante la simulación. Esta simulación genera un prototipo final optimizado y unos procedimientos de producción que sirven como base para un sistema físico, el uso de esta metodología facilita a los proyectos de desarrollo de nuevos productos, eliminar los costos de prototipos físicos y experimentos físicos, reduciendo drásticamente el tiempo de desarrollo de productos [2]. Cheung y Lee [3] construyeron un marco de mecanizado virtual para un torno y el sistema de inspección correspondiente. Li et al. [4] construyó un sistema de simulación tridimensional (3D) para torneado, en el cual el proceso de corte puede ser simulado. Zhang et al. [5] construyó un centro de mecanizado virtual y la correspondiente celda de medida. Wang et al. [5] Describió y construyó un sistema de corte virtual en lenguaje C ++. Mas allá para obtener una sensación más realista, muchos expertos han enfocado su atención en la construcción de una viruta en 3D, como es el caso de, Wang et al. [6]. que describe la construcción de una escena realista en un torno virtual basada en un modelo de iluminación global y una simulación de viruta.

## II. TORNO VIRTUAL

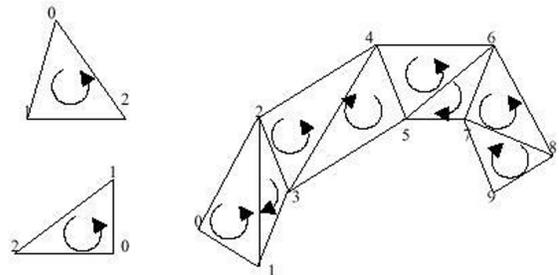
En este trabajo se generó un entorno virtual que permite la visualización y simulación 3D en ambientes virtuales de algunas operaciones de corte en un torno CNC a través de Internet, además, es posible realizar una consulta completa de las bases de datos experimentales de mecanizado de diferentes materiales para Corte Ortogonal desarrollado por el LATEMM de la Universidad de los Andes, y obtener datos de parámetros de corte que se utilizarán posteriormente para la generación del código CNC dentro del simulador.

El simulador de torno CNC permite realizar la verificación, siendo esta uno de los propósitos más importantes de la simulación digital. Con la simulación, el usuario puede verificar la trayectoria de la herramienta de una máquina CNC, en este caso un proceso es operado gráficamente como si fuera hecho en una máquina real, esta máquina CNC virtual ejecuta el código NC estándar y la máquina virtual realiza la operación de mecanizado completa de tiempo real, incluyendo los movimientos de herramientas, accesorios, y partes, además el usuario al mismo tiempo puede interactuar dentro del espacio en el que se encuentra la máquina CNC, permitiendo el continuo monitoreo del material removido y detectar colisiones entre la herramienta, accesorios y partes.

## III. ESTRUCTURA DE LOS OBJETOS DE LAS ESCENAS EN 3D

La estructura que se utilizó para la construcción de los objetos, se puede observar en el figura 1. Para la generación de polígonos, se utilizó el tipo de geometría de la figura 1, esta clase de geometría se puede usar para especificar puntos, líneas y polígonos

rellenos (triángulos y cuadriláteros), en la figura se puede apreciar, el orden en el que es posible especificar, a través de coordenadas, los puntos, líneas etc., que posteriormente permitirán construir los objetos, en este caso el cilindro, el cual dentro del programa representa, el material a mecanizar; esta geometría se seleccionó, después de evaluar otras geometrías.



**Figura 1.** Estructura de la geometría tipo TriangleSpriteArray del Java 3D.

La forma de construcción del TriangleSpriteArray, se basa en la triangulación con los tres últimos puntos que contengan el arreglo, logrando de esta manera optimizar, debido a que no se repiten puntos.

En la figura 2, se puede observar la forma como se construye el cilindro base para mecanizar (workpiece), esto se puede interpretar como la sucesión de placas circulares, que están unidas con el tipo de geometría mostrado en la figura 1, esta geometría nos permite posteriormente facilitar el control de la forma de la pieza, para realizar las intersecciones e interpolaciones con la herramienta de corte, que finalmente serán mostradas de tiempo real en la escenas.

Para construir las escenas, se utilizaron dos formas, la primera fue cargar partes del torno en lenguaje VRML (Virtual Reality Modeling Language), lenguaje que describe objetos 3D interactivos con efectos de iluminación, texturas, detección de colisiones, etc., el cual permite desplegar gráficos 3D interactivos a través de Internet. Estas partes fueron modeladas en algunos CAD; la segunda, fue construir los objetos que se desean controlar, como es el caso de la workpiece, y las herramientas de corte, por medio del sistema para especificar coordenadas de vértices para puntos, segmentos de líneas y/o superficies poligonales.

En la figura 3 se puede observar como se realiza la transformación del diámetro de los discos, se observa de esta manera, debido a que se utilizó para obtener los dibujos de la figura un factor grande, para la aplicación de este proyecto el valor que utilizamos es el equivalente a una separación de 0.001 mm.

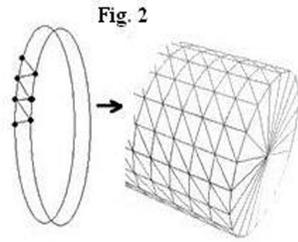


Figura 2. Modelo de construcción del cilindro base para simular el mecanizado.

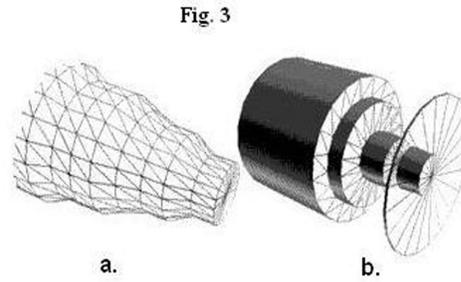


Figura 3. a) Malla con separación amplia; b) Malla con separación 1 predeterminada.

IV. INTERPOLACIONES PARA EL MOVIMIENTO DE LA HERRAMIENTA

Dentro del simulador hay dos objetos que se deben controlar para poder obtener la escena, y llegar a realizar simulaciones muy semejantes al comportamiento real de un torno CNC, el primero es el cilindro que se explicó anteriormente, y simula la pieza que se requiere mecanizar, el segundo es la herramienta, en la figura 4 se muestra como se realiza la trayectoria de la herramienta.

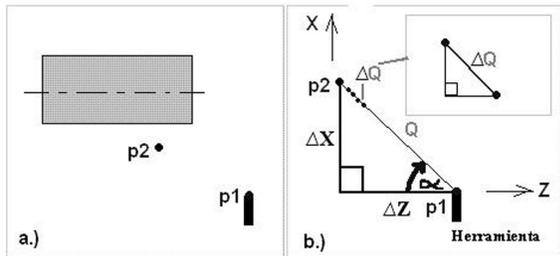


Figura 4. Esquema de cambio de posición de la herramienta.

El efecto de movimiento y cambio de velocidad de la herramienta esta determinado por la Ec. (7) de la herramienta, se explica con el cambio en la posición («Q») de acuerdo a una trayectoria lineal (figura 4), esto permite obtener un incremento en la posición en la coordenada X y un incremento en la coordenada Z, de acuerdo a las Ec. (1) y (2):

$$\text{Sen}\alpha = \frac{\Delta X}{\Delta Q} \tag{1}$$

$$\text{Cos}\alpha = \frac{\Delta Z}{\Delta Q} \tag{2}$$

La representación equivale a hacer interpolaciones segmentarias de primer orden para un grupo ordenado de coordenadas que pueden definirse como un conjunto de funciones lineales de la siguiente manera:

$$f(x) = f(x_0) + m_0(x - x_0) \quad x_0 \leq x \leq x_1 \tag{3}$$

$$f(x) = f(x_1) + m_1(x - x_1) \quad x_1 \leq x \leq x_2 \tag{4}$$

$$f(x) = f(x_{n-1}) + m_{n-1}(x - x_{n-1}) \quad x_{n-1} \leq x \leq x_n \tag{5}$$

Donde  $m_i$  es la pendiente de la línea recta que une los puntos:

$$m_i = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \tag{6}$$

Para garantizar derivadas m-ésimas y que exista continuidad en los nodos, se puede utilizar segmentarias cuadráticas, esto se puede observar en la figura 5, si se utilizan segmentarias cúbicas, se garantiza primera y segunda derivada. Es importante citar estos conceptos debido a que a futuro, es un objetivo poder vincular la mayoría de conceptos que permitan desarrollar programas para asistir problemas en ingeniería, y puedan ser simulados lo mas cercano posible a la realidad en manufactura virtual, el tipo de interpolación segmentaria es el equivalente a la curva suave conocida como Spline [7].



Figura 5. Segmentaria de primer y segundo orden, observe el último gráfico en donde hay n intervalos y n+1 datos [7].

En el simulador esta incluida esta aplicación y se puede practicar entrando como usuario invitado en la página (<http://augusta.uao.edu.co/gitem/>), en la opción libre del simulador, con ella es posible obtener una simulación como la que se observa en la figura 6, se incluyó el efecto de movimiento de la herramienta obedeciendo a variables que pueden ser determinadas por el usuario.

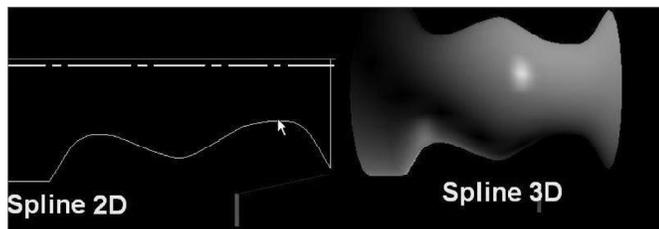


Figura 6. Movimiento de la herramienta de acuerdo a una curva Spline.

El movimiento libre del usuario obedece a la misma forma en que se obtuvieron las modificaciones de diámetro de acuerdo al método utilizado en la figura 4, el efecto se logra si el usuario realiza cambios de posición tan pequeños que finalmente son semejantes al comportamiento de una Spline, la otra forma, es programar de acuerdo a las ecuaciones que generan una Spline, como se observa en la figura 5.

**V. INTERSECCIÓN DE LA HERRAMIENTA CON LA PIEZA A MECANIZAR**

En la figura 7 se observa una trayectoria normal de mecanizado que describe un desplazamiento en el cual la función  $f(x)$  es comparada con una función imagen  $p(x)$  que se encuentra en el

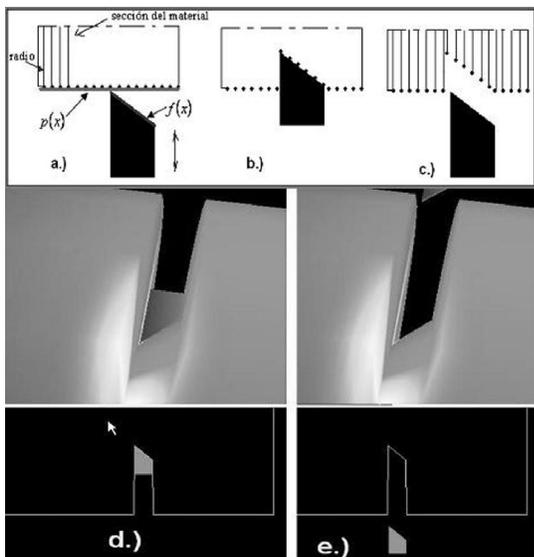


Figura 7. Esquema que representa las funciones de la herramienta y la pieza a mecanizar.

cilindro a mecanizar, se puede interpretar como una línea que forma el filo de la herramienta y tiene una imagen en el cilindro a mecanizar, el programa compara en todo momento la imagen del punto de la herramienta y de la pieza a mecanizar, para determinar en que momento realizar la variación del diámetro de cada disco y simular este efecto de tiempo real de acuerdo a la expresión de velocidad de la herramienta. Ec. (7)

$$\vec{g}(x, t) = \vec{t}(x, t) + \vec{v}t \tag{7}$$

Donde :  $\vec{v} = -\hat{v}\hat{j}$

$$\vec{H}(x, t) = \vec{v}(t-t) + h \quad t \geq t \tag{8}$$

La expresión  $g(x,t)$  contiene a  $p(xi)$ , y ésta, representa el movimiento de la función del filo de la herramienta, cuando se acerca al cilindro que se desea mecanizar, y lo hace a una velocidad de avance  $\vec{v}$ , la Ec.(8) representa el movimiento de la herramienta en el momento en que la función que describe la forma del filo de la herramienta intersecta al cilindro, representada durante la simulación como el desprendimiento de viruta.

**VI. CICLO DE MECANIZADO LONGITUDINAL**

Hasta el momento se ha podido generar la plataforma de trabajo, que posteriormente se utilizará para realizar todas las rutinas para que el torno virtual CNC pueda trabajar con la mayoría de las funciones de una máquina CNC real, esto se puede evidenciar con el ejemplo del Spline, donde es posible realizar movimientos libres con la herramienta y conseguir la simulación de tiempo real, e incluso, es posible guardar en una matriz las coordenadas del perfil de la función que describe la trayectoria de la herramienta.

El algoritmo implementado permite guardar en una matriz todas las coordenadas que describen la trayectoria de mecanizado, y que posteriormente se arreglan para generar el código G, esto se puede apreciar dentro de la simulación en tiempo real, y línea por línea. En la figura 8 se pueden observar cuales son las entradas y salidas de acuerdo a la trayectoria de mecanizado longitudinal que seleccione el usuario, esto obedece a las siguientes expresiones:

Matriz de entrada..... [A]2X2

Matriz de salida ..... [U]2xn

Donde n se calcula de acuerdo a la profundidad de corte que seleccione el usuario.

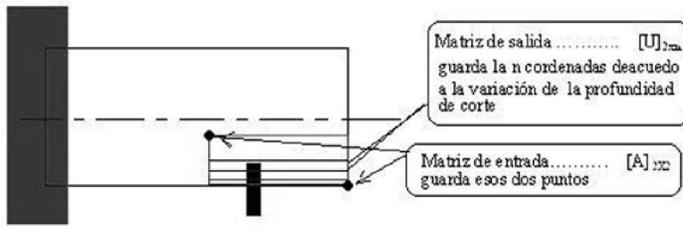


Figura 8. Descripción gráfica de la matriz de entrada y salida para generar el ciclo de torneado longitudinal

VII. ESQUEMA GENERAL DEL SIMULADOR

El modelo de torno que se utilizó para desarrollar la simulación y realizar pruebas comparativas es el Turn 55 de EMCO (fig.9).

El usuario después de ingresar a la página <http://augusta.uao.edu.co/gitem/> y lanzar el simulador, se encuentra con una interfaz, en la que se representan 4 zonas, como se observa en la figura 10.

En la zona 1 es posible que el usuario digite las coordenadas de la trayectoria que desea mecanizar, en la zona 2 se puede observar la máquina y después de ejecutada la orden para mecanizar, el usuario puede observar el mecanizado o decidir, realizar un recorrido virtual por el espacio del laboratorio; al mismo tiempo en la tabla de la zona 1, se generan las coordenadas que posteriormente permitirán por medio de una subrutina generar código G estándar, en la zona 3 se planea incluir sensores para que describan el comportamiento de algunas variables, como velocidades, fuerzas etc., La zona 4 es una interfaz gráfica en 2D que permite al usuario realizar de una forma muy simple la entrada de parámetros para mecanizar.

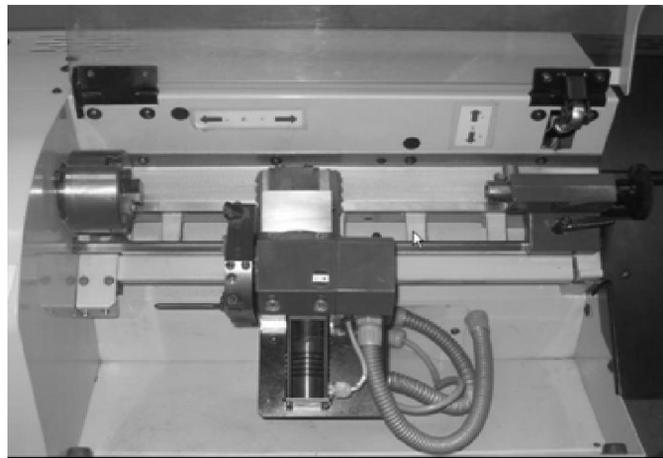


Figura 9. Turn 55 de EMCO

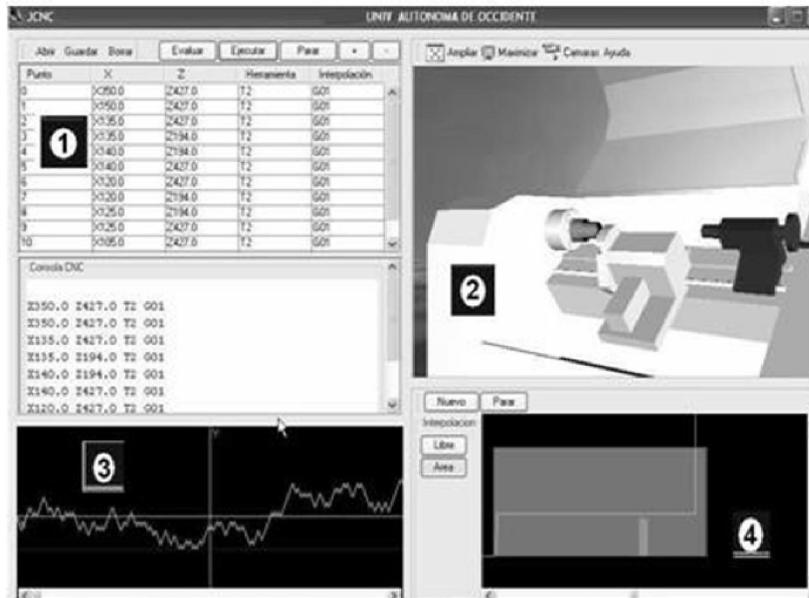
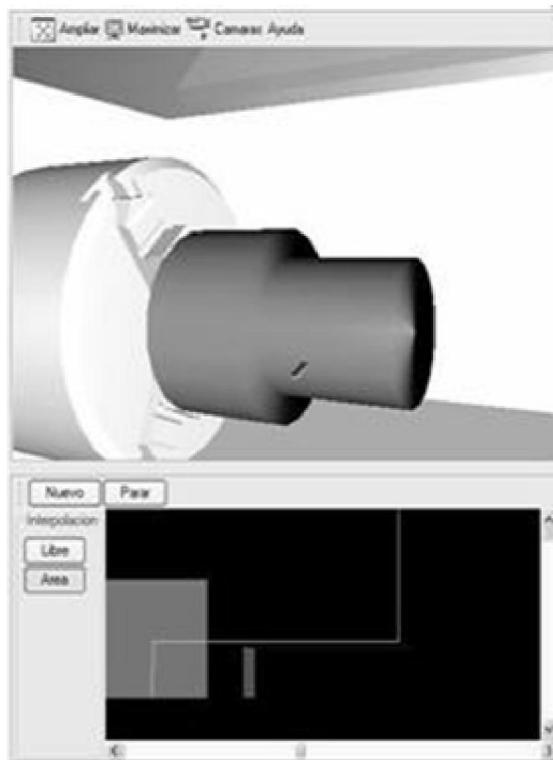


Figura 10. Zonas de visualización del simulador.



**Figura 11.** La imagen describe como se observa la simulación durante la inmersión.

## REFERENCIAS

- [1]. Lee K.,1999. Principles of CAD/CAM/CAE Systems. London: Addison-Wesley. 582 P
- [2]. Banerjee P. and Zetu D., 2001. Virtual manufacturing. Chicago: Jhon Wiley & Sons, 320 P
- [3]. Cheung C.F.; Lee W.B.; Mater J., 2001. A framework of virtual machining and inspection system for diamond turning of precision optics. En: Materials Processing Technology, Vol. 119, pp. 27-40.
- [4]. Li X.P.; Fan Q.W. and Liu R.Z., 1999. Sichuan University. En: Engineering Science Edition, Vol 33-2, pp. 96-98
- [5]. Wang G.F.; Wang T.Y. and Ji L.M., 2000. Proceedings of the First International Conference on Mechanical Engineering., pp. 21-24.
- [6]. Chapra C.S., 1998. Numerical methods for engineers with programming and software applications. Boston: McGraw-Hill, 944 P
- [7]. Arteaga N.; Rojas F., 2003. Creation of a teaching and learning aid for CNC turning in orthogonal machining. En: Pontificia Universidad católica del Perú: Tercer Congreso Bolivariano de Ingeniería mecánica. Lima.
- [8]. Ordoñez G.; Rojas F., 2003. Simulación Web De Fresado Y Taladrado A Partir De Un Modelo De Mecanizado. En: Pontificia Universidad católica del Perú: Tercer Congreso Bolivariano de Ingeniería mecánica. Lima.
- [9]. Acero C.; Rojas F. y Manrique M., 2004. Implementación de un Simulador de Procesos de Corte para Corte Ortogonal, En: Universidad Javeriana: IV Simposio de Automatización Industrial, Manufactura Integrada por Computador. Bogota.
- [10]. Cardona J.D. y Hidalgo M.A., 2007. Realidad virtual y procesos de manufactura. Cali: Universidad Autónoma de Occidente., 140 P.

## VIII. CONCLUSIONES

Hasta el momento es importante resaltar los resultados obtenidos, en cuanto a la simulación del modelo Spline, esto generó un modelo de trabajo, que permite seguir todas las teorías y principios para el desarrollo de entornos virtuales orientados con la teoría para desarrollo de software CAD/CAM/CAE, utilizando como herramienta matemática métodos numéricos para ingeniería. La rutina para generar el ciclo de corte longitudinal se desarrolló con una interfaz que permite al usuario realizar una inmersión durante la ejecución de este ciclo, asintiéndole a ejecutar dentro del ambiente en el que se encuentra el torno otras funciones que son idénticas a la máquina real y que también se realizan en tiempo real.

Desde el laboratorio del LATEMM de la Universidad de los Andes es posible vía Internet realizar un enlace para consultar la base de datos experimentales y cargar información de parámetros de mecanizado [8,9,10], para ser utilizados en la generación de los programas CNC que son susceptibles de ser ejecutados directamente en máquinas reales.