



# Universidad Autónoma de Querétaro

## Facultad de Ingeniería

Selección automática de la herramienta y de las trayectorias de corte en equipos CNC, aplicando Procesamiento de Imágenes.

### **TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Doctor en Ingeniería

### **Presenta**

M. en C. Mario Mejía Ugalde

Querétaro, San Juan del Río, Septiembre de 2014



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

División de investigación y posgrado

Selección automática de la herramienta y de las trayectorias de corte  
en equipos CNC, aplicando Procesamiento de Imágenes.

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Doctor en Ingeniería**

#### Presenta

M. en C. Mario Mejía Ugalde

#### Dirigido por:

Dr. Aurelio Domínguez González

#### SINODALES

Dr. Aurelio Domínguez González  
Presidente

Dr. Miguel Trejo Hernández  
Secretario

Dr. Juan Primo Benítez Rangel  
Vocal

Dr. Luis Alberto Morales Hernández  
Suplente

Dr. Roque Alfredo Osorio Ríos  
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González  
Nombre y Firma  
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Nombre y Firma  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Septiembre de 2014  
México

## Resumen

La selección automática de herramienta en operaciones de torno y fresa se ha convertido en un paso muy importante en los procesos de manufactura y planeación para el maquinado de piezas. La principal contribución de la presente tesis es el desarrollo de un nuevo método basado en procesamiento de imágenes con criterios morfológicos direccionales, aplicados a la selección automática de la herramienta en máquinas de torno de control numérico para maquinar piezas geométricas en 2D y 2.5D a partir de modelos 3D generados por computadora de una imagen tomada con otros dispositivos. En primer lugar, la imagen es pre-procesada aplicando varias técnicas de procesamiento de imágenes. Enseguida, se utiliza morfología matemática como la erosión o dilatación para crear elemento estructural con la forma de la herramienta de corte. El método consiste en desplazar un elemento estructural a lo largo de toda la imagen con los valores de las longitudes de la herramienta de corte para seleccionar la herramienta de corte correcta y la trayectoria. Además con el mismo elemento estructural las trayectorias del contorno se obtienen en código estándar de Control Numérico Computarizado (CNC). Los resultados de estos experimentos muestran que el método hace que sea posible seleccionar automáticamente la apropiada herramienta para procesos de maquinado en Torno y Centros de maquinados.

**Palabras clave:** Selección automática de la herramienta, procesamiento de imágenes, maquinados, morfología direccional.

## Summary

Automatic tool selection in Turning and milling operations has become a very important manufacturing processes and planning for machining parts step. The main contribution of this thesis is the development of a new method based on image processing with directional morphological criteria applied to the automatic tool selection on lathe and milling machine CNC for machining prismatic parts in 2D and 2.5D, from 3D model generated by computer or an image taken with other devices. First, the image is pre-processed by applying various image processing techniques, later, mathematical morphology as erosion or dilation is applied to create structural element in the shape of the cutting tool. The method involves moving a structural element along the whole image with boundary values of the lengths of the cutting tool to select the correct cutting and the trajectory. In addition to the same structural element of the contour are obtained in the standard code of Computer Numerical Control (CNC). The results of these experiments show that the method makes it possible to automatically select the proper tool for lathe machining processes and machining centers.

**Keywords:** Automatic tool selection, image processing, machining, directional morphology.

**Mi agradecimiento a toda mi familia: En especial  
A mi hija y esposa, a mis padres y hermano  
Por sus grandes enseñanzas  
Gracias**

## **Agradecimientos**

Primeramente quiero agradecer a Dios, por darme la fortaleza en toda la carrera y ser mi principal apoyo espiritual.

Quiero agradecer a todas aquellas personas que contribuyeron en la realización de la presente tesis en especial al director y codirector de tesis, Dr. Aurelio Domínguez González y Dr. Miguel Trejo Hernández respectivamente por su compromiso permanente, su dedicación y constancia, que me entregaron durante toda la realización de esta investigación. A mis asesores: Dr. Juan Primo Benítez, Dr. Luis Alberto Morales Hernández, Dr. Roque A. Osornio Ríos y a mis profesores porque de ellos he recibido mi preparación en la Universidad.

Extiendo mis agradecimientos a la UAQ por haberme permitido llevar a cabo mis estudios de posgrado en sus instalaciones. A mis compañeros por su apoyo durante todos estos años de estudio. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda financiera otorgada durante la realización de mis estudios.

¡Gracias a todos!

# Índice

	<b>Página</b>
1 Introducción.....	12
1.1 Justificación.....	16
1.2 Descripción del problema.....	17
1.3 Hipótesis y objetivos.....	17
1.3.1 Hipótesis.....	18
1.3.2 Objetivo general.....	18
1.4 La presente tesis.....	18
2 Estado del arte.....	20
3 Metodología.....	26
3.1 Metodología 2D.....	28
3.1.1 Paso 1. Adquisición del archivo DXF.....	28
3.1.2 Paso 2. Transformación de archivo.....	29
3.1.3 Paso 3. Transformación a imagen binaria.....	30
3.1.4 Paso 4. Identificación de la pieza.....	31
3.1.5 Paso 5. Etiqueta del contorno y perímetro.....	32
3.1.6 Paso 6. Morfología direccional y vector gradiente en el contorno.....	33
3.1.7 Paso 7. Selección de la herramienta.....	35
3.2 Metodología para centros de maquinado.....	37
3.2.1 Etapa 1 Adquisición y transformación de un archivo.....	39
3.2.2 Etapa 2. Pre-procesamiento de imagen.....	40
3.2.3 Etapa 3. Procesamiento de la imagen.....	41
3.2.4 Etapa 4. Morfología direccional.....	43
3.2.5 Etapa 5. Selección de la herramienta.....	47
Numero de cambios de la herramienta:.....	49
3.2.6 Etapa 6. Estrategia para la selección de la trayectoria de la herramienta.....	50
4 Resultados y discusiones.....	52
4.1 Resultados para maquinado en 2D.....	52
4.2 Resultados para centros de maquinado.....	55
5 Conclusiones, Prospectivas y Referencias.....	60

5.1	Referencias .....	61
6	Anexo 1 Artículos publicados en revistas indizadas y arbitradas.....	66
7	Anexo 2 Artículo enviado a revista indizada.....	104
8	Anexo 3 Derechos de autos registrados .....	105

## Índice de figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
3.1. Diagrama a bloques general.....	26
3.2. Diagrama general para la selección automática de la herramienta. ....	27
3.3. Archivo original, a) diseño de CAD, b) archivo DXF. ....	29
3.4. Archivos, a) diseño sin textura (en alambre), b) imagen (BMP). ....	29
3.5. Archivo original, a) diseño de CAD, b) archivo DXF. ....	31
3.6. Definiciones de etiquetado, a) etiqueta de la pieza, y b) etiqueta del perímetro. ....	32
3.7. Vectores de la pieza, a) vector direccional de la pieza, b) magnitud de la dirección del contorno. ....	34
3.8. Elemento estructural, a) para el inserto derecho, b) inserto incorrecto y c) inserto correcto. ....	37
3.9. Diagrama general de la selección automática de la herramienta para centros de maquinado.....	38
3.10. Archivos originales, a) diseño de CAD o cámara, b) archivo DXF. ....	39
3.11. Archivos, a) Diseño sin textura (archivo en alambre), b) imagen (archivo BMP.). ....	41
3.12. Definición del etiquetado, a) etiquetado de la pieza, y b) etiquetado del perímetro. ....	41
3.13. Vectores de la pieza, a) vectores direccionales de la pieza, b) magnitud de la dirección del borde. ....	43
3.14. Morfología direccional a) dilatación del tamaño de la herramienta, b) dilatación del tamaño de la trayectoria. ....	44
3.15. Morfología direccional, a) erosión del tamaño de la herramienta, b) erosión del tamaño de la trayectoria. ....	45
3.16. Selección de la herramienta, a) Elemento estructural, b) Herramienta incorrecta y herramienta correcta. ....	46
3.17. Selección de la herramienta (pieza final), a) identificación de las fronteras y b) rough fresado (zig). ....	50

4.1. Selección de herramienta, a) pieza final, b) rosca y desbaste (zig).....	52
4.2. Selección de herramienta (pieza final), a) desbaste (zig) y b) acabado (zig con contorno).....	53
4.4. Software final para la selección de la herramienta (Maquinado 2D).....	54
4.3. Selección de herramienta. a) Pieza final, b) Desbaste y roscado. ....	54
4.5. Selección de la herramienta de corte para la primera pieza basada en residuos de pixeles.....	56
4.6. Selección de la herramienta para la segunda pieza usando zig-zag con contorno. ....	57
4.7. Selección de la herramienta para la tercera pieza (rough mill usando zig con contorno). ....	58
4.8. Software final para la selección de la herramienta de corte (maquinado en 2.5D). ....	59

## Índice de tablas

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
3.1 Insertos comunes (elementos estructurales).....	36
3.2. Herramientas de corte comunes (elementos estructurales) usados.....	48
3.3. Algoritmo general para la selección de la herramienta basada en residuos de píxeles. ....	49
4.1. Selección de herramienta de corte para la primera pieza. ....	53
4.2. Insertos seleccionados para la pieza de la Figura 4.2.....	53
4.3. Insertos seleccionados para la pieza de la Figura 4.3.....	55
4.4. Selección de la herramienta de corte para el primer ejemplo (fresado). ....	55
4.5. Selección de la herramienta para el Segundo ejemplo (fresado) .....	57
4.6. Selección de la herramienta de corte para el tercer ejemplo (fresado) .....	58

## 1 Introducción

Hoy en día, una amplia variedad de formas geométricas complejas son manufacturados con tornos y fresas de CNC. Sin embargo existen numerosas variables que afectan el proceso de torneado como la selección del material de la pieza, condiciones de corte, material de la herramienta, secuencia de la herramienta, lubricación de corte y selección de la herramienta. Una gran cantidad de investigaciones existen acerca del primer tema. Sin embargo, la selección de la herramienta basada sobre la forma no ha sido ampliamente estudiada. En la actualidad el software comercial de CAM (*Manufactura Asistida por Computadora*) deja esta tarea a los operadores y diseñadores quienes lo hacen esto basado en su experiencia, habilidad y conocimiento. Debido a lo antes mencionado una técnica de selección automática que seleccione una herramienta basada en la forma es particularmente deseable.

El área en los procesos de manufactura, la demanda para mejor productividad con alta calidad ha sido constante. La nueva generación de máquinas de control numérico computarizado, se debe de tomar en cuenta los siguientes temas como: los errores totales de la compensación, conceptos de manufactura autónoma, monitoreo de condiciones de procesos, desarrollo comercial de la manufactura asistida por computadora (CAM) y el desarrollo de un sistema capaz de reconocer complejas formas, entre otros ([Mekid et al, 2009](#)). Algunas contribuciones de estos temas son las investigaciones llevadas a cabo por [Rodríguez et al \(2008\)](#) quien implementa un sensor inteligente para monitorear la corriente del estado de arranque y paro de un motor en máquinas CNC, [Eladawi et al \(2003\)](#) desarrolla un método experimental aplicando procesamiento de imágenes para seleccionar los parámetros de corte.

Además, un gran porcentaje de piezas utilizadas en la industria tienen una forma de contornos donde la cara de la base es una superficie denominada 2.5 ejes. Un modelo sólido en 2.5D puede ser definido como un corte en 2D como una serie de trayectorias de la herramienta en diferentes Z rebanadas de un modelo sólido 3D. Del mismo modo, la selección automática de la herramienta en operaciones de fresado es uno de los pasos más importantes en la planificación de procesos, además, en la actualidad, el software CAM transfiere esta tarea al operador quien lo hace a base de su propia experiencia, habilidad y conocimiento. Considerables artículos han sido reportados acerca de las variables que afectan el proceso de fresado, tal como: selección del material de la pieza (Siller et al, 2009), condiciones de corte, materiales de la herramienta (Siller et al, 2009), secuencia de la herramienta (Zaryab et al, 2010), selección del refrigerante (Siller et al, 2009), trayectoria de la herramienta (Eladawi et al, 2003), control de proceso (Osornio et al, 2007), identificación de la planta (Morales et al, 2010), selección de la herramienta (Hemant et al, 2011).

La selección de herramienta es una tarea comúnmente realizada por un operador humano, es un importante aspecto en los procesos de maquinado, ya que si la herramienta seleccionada es incorrecta, puede producir errores dimensionales en la pieza de trabajo, tales como posibles choques, y en consecuencia el rechazo de la pieza. En este sentido, algunos métodos han sido desarrollados para la selección de la herramienta en procesos de fresado en cajas 2.5D como en el trabajo presentado por Zaryab et al (2010) en la que un algoritmo de optimización basado sobre métodos analíticos fue propuesto para la formulación de la secuencia de herramienta en el problema de selección, obteniendo buenos resultados con el soporte de un software CAD (Diseño Asistido por Computadora). Otro método es el propuesto por Lim et al (2001), quien utiliza algoritmos experimentales usando matemática booleana para determinar el conjunto de herramientas en el vaciado de cajas con la integración de CAD / CAM. De la misma manera, Hemant et al (2011) desarrolla un algoritmo para la descomposición de polígonos dentro de áreas

convexas utilizando dinámica de programación. Las investigaciones anteriores utilizan un algoritmo complejo y cierta intervención humana que aún es necesaria.

Algunos métodos han sido desarrollados para la selección automática de la herramienta en procesos de torneado o fresado tales como el presentado por [Bouaziz y Zghal, \(2008\)](#) en que un algoritmo de optimización basado en modelos analíticos fue propuesto para maquinar cajas 3D obteniendo buenos resultados solo para cajas prismáticas. O el propuesto por [Hemant et al., \(2011\)](#) quien usa dinámica de programación para determinar el juego óptimo de herramientas, solo para maquinar cajas poligonales. Del mismo modo [Chun et al., \(2007\)](#) presenta una técnica para cajas de formas arbitrarias. Ellos usaron un procedimiento vinculado para elegir la herramienta óptima para fresado de cajas.

En el caso de problemas de selección y secuencia de herramientas en máquinas torno, [Oral y Cemal, \(2004\)](#) presentaron un método que usa una base de reglas extensas con información características compuesta de años de conocimiento heurístico. [Edalew et al., \(2001\)](#) desarrollo un módulo de datos de una aproximación híbrida basada en conocimientos matemáticos y heurístico para seleccionar el mejor juego de herramientas de corte, parámetros de corte óptimos, tiempos y costos de maquinado, Sin embargo se necesita de un conocimiento previo. [Chung y Peng, \(2004\)](#), Usa las características de reconocimiento con la forma de la pieza contenida en un formato DXF para seleccionar una correcta operación usando una dinámica SQL y criterios de búsqueda para seleccionar la herramienta de la base de datos.

Por otro lado, el procesamiento de imágenes ha sido ampliamente usado en aplicaciones en las que los estudios de las condiciones de corte afectan como: la rugosidad en un simple proceso de torneado de acuerdo a [Sarma et al., \(2008\)](#); Las predicciones de las condiciones de corte en proceso de fresado por [Gadelmawla et al., \(2009\)](#), y la generación de trayectorias en máquinas CNC de fresado ([Eladawi et al., 2003](#)) son incluidas.

A través de los años el control numérico fue evolucionando e integrando diferentes herramientas científicas para crear nuevas tecnologías. Muestra de ello es que hay quien ha integrado la inteligencia artificial para el auxilio de procesos relacionados al control numérico por computadora, por ejemplo, [Vosniakos y Krimpenis, \(2002\)](#) proponen una aplicación paradigma con algoritmos Genéticos para la optimización en la aproximación de la máquina a un hemisferio de múltiples herramientas de CNC. [Thanapandi et. al, \(2006\)](#) generan un algoritmo genético para obtener la solución óptima al problema de generación de secuencia de curvas y selección de herramienta.

Las investigaciones anteriores presentan ciertas desventajas en la selección de herramientas, tales como: solo para ciertas piezas específicas, reglas extensas para las condiciones de selección, años de conocimiento heurístico, el uso de criterios para seleccionar la herramienta, por lo tanto, es necesario hacer una investigación para satisfacer estos aspectos.

En esta investigación con relación a 2D presenta un nuevo método usando técnicas de procesamientos de imágenes para la selección automática de herramienta en máquinas torno CNC, en operaciones de torneado tal como: torneado externo (longitudinal, transversal, ranurado, biselado, cono, roscado y perfil), y torneado interno (longitudinal, transversal, ranurado, biselado, cono, roscado y perfil).

Por otro lado, la morfología es un método que remueve o adhiere píxeles de una imagen binaria formada por un conjunto llamado elemento estructural, la morfología aplicada sobre procesamiento de imágenes ha sido ampliamente usado en aplicaciones en la cual una operación de apertura es introducido para monitorear varios defectos que ocurren en hilos de chenille según [Tunak et al \(2011\)](#), los efectos de las condiciones de corte como la rugosidad presentada por [Sarma et al \(2005\)](#), la predicción de las condiciones de corte por [Gadelmawla et al \(2009\)](#), y la generación de la trayectoria se incluyen para fresadoras CNC por [Eladawiet al \(2003\)](#).

La novedad de la presente tesis en relación a maquinados de piezas 2.5D es un nuevo método basado sobre la dirección morfológica de procesamiento de imágenes aplicado a la selección automática de la herramienta en máquinas fresadoras de CNC, mostrando una forma fácil de simular piezas, eliminando al diseñador decisiones subjetivas, reduce errores de selección de herramienta, hace el proceso de selección y diseñar más rápido y no requiere un conocimiento a priori en operaciones tal como: Pocket, Mill, Mill thread, Helicoidal mill, Extrusión, Profile y Selección, Fillet, Chamfer y Mill thread.

En este trabajo se propone la selección de la herramienta basada sobre la forma, pero esto no ha sido estudiado, este método es importante porque elimina las decisiones subjetivas de diseño, no requiere previos conocimientos, no utiliza modelos matemáticos complejos y es fácil de implementar. Por tales razones, es deseable desarrollar un método para hacer la selección herramienta de fresado en base a la forma y de manera automática.

Las ventajas más notables del sistema desarrollado son: el método propuesto reduce la compleja utilización de algoritmos matemáticos y muestra una forma sencilla para simular la selección de la herramienta de corte, se eliminan las decisiones del diseñador, se reduce errores, el proceso de selección y el diseño es más rápido, fácil de usar y no requiere un conocimiento a priori.

## **1.1 Justificación**

La necesidad por mejorar la eficiencia y la precisión en sistemas de control numérico ha sido la mejor razón para el desarrollo de nuevas investigaciones y tecnologías tanto para el ámbito industrial como para el académico. Dada la competitividad que muestran países desarrollados y emergentes, es de gran importancia generar empresas con base tecnológica, que además favorezcan el desarrollo de conocimiento en áreas estratégicas y que generen empleos.

Hoy en día uno de los problemas para manufacturar piezas es la selección de herramienta ya que en la actualidad cualquier software de CAD-CAM no permite esta función de manera automática o todavía no se ha integrado esta técnica y solo esta referenciada al diseñador, con su experiencia, habilidad o conocimiento. Ejemplos de lo anterior se puede mencionar algunos UNIGRAPHICS, VISI-CAD, Master-CAM ente otros.

En esta investigación se pretende desarrollar una aplicación para obtener la selección automática de la herramienta para maquinar desde una imagen o directamente desde la pieza dibujada en CAD, mediante técnicas de PI (*Procesamiento de Imágenes*).

## **1.2 Descripción del problema**

La técnica normalmente usada para el diseño de piezas, consiste en dibujar el objeto en la computadora a través de un software de diseño CAD y posteriormente con ayuda de la misma computadora diseñar los ciclos de maquinado o CAM para las máquinas CNC en las que posteriormente se maquinarán las piezas; que pueden ser desde ciclos de maquinado para torno hasta centros de maquinado de ejes múltiples ([Smid, 2003](#)).

Uno de los problemas para pasar de la pieza dibujada en CAD a la manufactura CAM es la selección de la herramienta de corte, ya que depende de varios parámetros como son las dimensiones de la herramienta de corte, el espacio entre cavidades, las dimensiones de la pieza.

Otro de los problemas a la hora de fabricar la pieza, son las condiciones de corte ya que estas son dadas por el diseñador y no son las óptimas por que dependen de ecuaciones, métodos y experiencia.

## **1.3 Hipótesis y objetivos**

### **1.3.1 Hipótesis.**

La selección automática de la herramienta de corte y la definición de las trayectorias a seguir por los cortadores durante el proceso de maquinado en equipos CNC puede ser alcanzada mediante la aplicación de metodologías de morfología direccional y gradientes en imágenes.

### **1.3.2 Objetivo general**

Implementar una metodología para determinar de manera automática la selección de la herramienta y sus trayectorias con la ayuda de Procesamiento de Imágenes.

Los objetivos particulares de trabajo son los siguientes

- 1 Desarrollar un módulo de manipulación y transformación de archivos (CAD=>BMP y CAD=DXF).
- 2 Diseñar un módulo para manipular una imagen (morfología, filtros, contraste, binaria, etiquetado, gradiente, trayecto, )
- 3 Desarrollar un módulo (en software ya desarrollado *de CNC*) que tenga la capacidad de determinar de manera automática los cambios de herramienta a partir de PI.
- 4 Generar un algoritmo a partir de los cambios de herramienta para generar de manera automática el CAM (Manufactura asistida por computadora)

## **1.4 La presente tesis**

El presente trabajo de investigación fue dividido en cinco capítulos, además de un anexo al final de la tesis.

En el capítulo uno, se presentan la introducción acerca de selección de la herramienta de corte, la Justificación, la descripción del problema, las hipótesis y objetivos de esta investigación.

En el capítulo dos, se muestra el estado del arte, los tipos de herramientas más comunes para 2D, 2.5D y 3D, las técnicas de procesamiento de imágenes más comunes son, las operaciones morfológicas, la estructura de una imagen binaria, la reconstrucción de los vectores direccionales de la pieza, las extracciones más comunes de la pieza, la generación y obtención de modelos 2D, 2.5D y 3D, la creación de elementos estructurales a partir de cortadores o herramientas de corte, la adquisición de la imagen así como la detección y etiquetado del contorno, y finalmente los paquetes computacionales de creación de piezas en 3D (Software) CAD-CAM.

En el capítulo tres se genera la metodología (pasos y etapas) para la selección automática de la herramienta para piezas en 2D y 2.5D usando procesamiento de imágenes.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados y discusiones para los maquinados en 2D y 2.5D, en el capítulo 5 las perspectivas, conclusiones y referencias, en el anexo se muestra los artículos publicados en revistas indizadas y arbitradas.

### 2 Estado del arte

La selección automática de la herramienta ha sido un método con éxito para reducir el tiempo de maquinado, los errores en el proceso, la interacción humana, los costos y la mejora de la calidad del producto (Astakhov et al, 2010), (Smid, 2003), la creación de nuevos métodos por el amplio uso de máquinas de CNC en la industria. En la presente tesis, el método para la selección automática de la herramienta empieza, extrayendo el modelo en 3D proveído por un archivo .DXF (de las siglas en ingles, Drawing Exchange Format) o de una imagen tomada con otros dispositivos, el formato del archivo DXF es utilizado por su fácil y bajo costo en términos de trabajo computacional. Tufoi et al (2011) define el formato del archivo DXF como información en un archivo de texto ASCII con .dxf como extensión y Chung y Peng (2004) muestra la sección de la organización de un archivo DXF. Después obteniendo el archivo DXF en orden para disminuir los posibles errores en las fronteras, un archivo DXF es utilizado para comparar y corregir este cuando una imagen es utilizada (archivo BMP). Finalmente, la morfología matemática se aplica para generar la selección automática de la herramienta.

**Herramienta de Corte:** La selección automática de la herramienta juega un importante papel para reducir tiempos de maquinado, errores, interacción humana, costos y mejor calidad del producto. La selección geométrica de la herramienta es una tarea compleja; sin embargo, el amplio uso de máquinas CNC en la industria justifica desarrollar una metodología para este proceso. El desarrollo de insertos de corte en forma de diamante para torno es variado (ángulo de contorno de la herramienta de corte mayor de 90°). El desarrollo de insertos de corte de 80°, 70°, y 35° en forma de diamante combinados con varias porta herramientas hacen esto posible para obtener un amplio rango de tales herramientas. Las herramientas externas más comunes en forma de diamante con 80° son CNGG, CNGA, CNMA, CNMG, CNMP y los diferentes tipos de insertos internos en forma de diamante son

SCLCR/L, SDUCR/L, SDQCR/L, SD-CR/L, SSSCR/L, la herramienta de corte también suele llamarse ID-Diámetro-L/R para herramienta interna y OD-Diámetro-L/R para herramienta externa (Astakhov, 2010 y Leu, 2011). Esta tesis se usa datos de manuales y catálogos de herramientas de manufactura para seleccionar la apropiada herramienta para operaciones de torneado.

Las técnicas de procesamiento de imágenes modelos sólidos y otros sistemas utilizados son los siguientes:

**Operaciones morfológicas:** Estos definen como un filtro del borde de la pieza, satisfaciendo propiedades como: invariancia translacional, anti-extensividad, incremento mono-tónico e idempotencia (Mllik et al, 2000) entre los métodos más comunes de la morfología matemática en el procesamiento de imágenes es la erosión y dilatación. Estos métodos remueven o adhieren píxeles de una imagen binaria de acuerdo a reglas que dependen sobre el patrón de los píxeles vecinos formados por la interacción de un conjunto llamado elemento de estructural con un conjunto de píxeles dentro de la imagen, la operación de erosión reduce el tamaño de una imagen, mientras que la operación de dilatación amplía su tamaño geométrico (Barone et al, 2001).

**Imagen binaria:** El valor de cada píxel en la imagen es cambiada a un número lógico binario; thresholding es el método más aplicado para convertir a una imagen en escala de grises  $f(i, j)$  dentro de una imagen binaria  $f^B(i, j)$ .

**Vectores direccionales de la pieza:** El gradiente del borde es muy importante para el análisis de imágenes y este es ampliamente usado para la adquisición, etiquetado, identificación, segmentación y compresión del objeto en escena (Tufoi et al, 2011), (Kekre et al, 2010) para obtener el borde. El operador Sobel es utilizado debido a la baja sensibilidad al ruido y de bajo costo en términos de trabajo computacional.

**Extracción de la pieza:** El método de algoritmo secuencial y el escaneo de exploración por [Sutheebanjard](#) y [Premchaiswad \(2009\)](#) son los más comúnmente aplicados y se utilizan para registrar imágenes.

**Modelos 2D, 2.5D y 3D:** Las gráficas en la presente son los modelos 2D y 2.5D, en la que un modelo sólido 2D es una X-Y forma extruida en Z, un ejemplo es un círculo y un rectángulo en un modelo 2D extruido en Z produce un cilindro y el cubo en un sólido 3D respectivamente, mientras que un modelo en 2.5D sólido, puede ser un corte con una serie de trayectorias de herramienta en 2D en diferentes cortes de Z, produciendo una forma analítica (líneas y círculos) ([Gibbs and Associates, 2009](#)).

**Elementos estructurales:** La forma de la herramienta de corte es creado por elementos estructurales, las dimensiones de las herramientas en esta investigación son obtenidas de manuales y catálogos de fabricación de herramientas.

Por otra parte, la obra publicada por Bithika y Asit ([Mallik et al, 2000](#)) aplica morfología matemática para detectar defectos de fabricación (el desbaste). Este es un ejemplo de aplicación de procesamiento de imágenes, usando tales técnicas para medir los efectos de la velocidad de corte en la rugosidad de la superficie, que es otro ejemplo que proporciona una nueva estrategia en la fabricación presentado por [Sarma et al \(2009\)](#).

**Adquisición de la imagen:** Los formatos más comunes para transformar un objeto 3D a un archivo de texto son; archivo DXF, archivo STEP, archivo ParaSolid, archivo CGM, archivo STL, archivo CATIA y archivo HEAL GEOMETRIC. En esta tesis el formato DXF es usado por su fácil y compacto en términos de trabajo computacional. [Tufoi et al., \(2011\)](#) define el formato de archivo DXF como información en un archivo de texto ASCII con extensión .dxf. [Chung y Peng, \(2004\)](#) muestra la selección organizada de un archivo DXF como: **Begin of file**, **Header** (esta sección contiene información general acerca del dibujo), **Tables** (contiene definiciones del nombre de los contenidos), **Blocks** (describe las entidades que

componen cada bloque en el dibujo), **Entities** (esta sección contiene las formas del dibujo), **End of file** (da finalizado el archivo).

**Imagen binaria:** Entre los métodos más comunes para transformar una imagen en escala de grises a una imagen binaria 2D son el thresholding, fixed thresholding, histogram-derived thresholds, iso-data algorithm, background symmetry algorithm, triangular algorithm (Eladawi et al., 2003). Thresholding es el método más aplicado para convertir una imagen en escala de grises  $f(i,k)$  en una imagen binaria 2D  $f^B(i,k)$ . Aquí todos los pixeles de la imagen son condicionados; si la intensidad en escala gris de un pixel en la imagen es menor que 128, este pixel es etiquetado con cero ( $f^B(i,k)=0$ ) de otra manera con uno ( $f^B(i,k)=1$ ).

**Detección del contorno:** El contorno es muy importante para el análisis de imágenes y ampliamente usado para la adquisición, registración, identificación, segmentación y comprensión de objetos en escena algunos de los operadores de gradiente más usados para la extracción del contorno son: Sobel, Prewitt, Roberts, Canny, zero-crossing and beamlet transform (Jing et al., (2009). El método de Sobel está basado sobre la primera derivada y convolución de la imagen llamado operador gradiente que incluye un filtro direccional en horizontal y vertical basado sobre una máscara. En esta investigación el operador Sobel es usado debido a la baja sensibilidad al ruido y barato en términos de trabajo computacional.

**Etiquetado del contorno y componentes:** Para encontrar componentes conectados de una región (contorno) que representa un objeto en una imagen binaria 2D, hay varios métodos para etiquetar las piezas en la imagen; algoritmos recursivos, algoritmos secuenciales o como el propuesto por Sutheebanjard y Premchaiswadi, (2011) quien usa dos nuevas mascarar para conectar componentes etiquetados.

En esta investigación el método de algoritmo secuencial y la máscara de exploración son usados por ser el método más común y usado. El método consiste en desplazar

una máscara a través de todos los píxeles, checando el contorno etiquetado, si el píxel es uno entonces checar los vecinos de 4x4 píxeles y guardar la trayectoria del contorno de la pieza.

**Software CAD-CAM-CAE:** Diseño asistido por ordenador (CAD), manufactura asistida por ordenador (CAM) y la ingeniería asistida por ordenador (CAE) son sistemas que grafican, diseñan y simulan respectivamente facilitando al usuario hacer las tareas ([Smit, 2003](#)), ([Tufoi et al, 2011](#)), ([Ming et al, 2011](#)).

De la misma manera cualquier paquete de software por computadora que usa gráficos y aplicaciones para facilitar las tareas de ingeniería en proceso de diseño puede ser clasificado como Diseño Asistido por Computadora (CAD).

Un sistema que planea, dirige y controla la manufactura de las operaciones a través de interfaz de la computadora puede ser definido como Manufactura Asistida por Computadora (CAM) y un sistema que analiza las funciones de un dibujo CAD permitiendo simular y estudiar cómo se comporta la invención, puede ser clasificado como Ingeniería Asistida por Computadora (CAE). El desarrollo real de los sistemas CAD/CAM inició en los años 50s que fue conocida como la era del desarrollo de herramientas programadas automáticas (APT) por General Motors. En los años 60s fue el período de gráficos interactivos por computadora. Los años 70s fue llamada la época de oro para la computadora de dibujo y el inicio del formato de archivo de IGES. En los años 80 y 90 nuevas teorías y algoritmos de evolución e integración de varios elementos de diseño y fabricación fueron desarrollados (CAE).

Hoy en día la mejor investigación y desarrollo se enfoca ampliar sistemas CAD/CAM/CAE permitiendo diseños geometrías tridimensionales ofreciendo más aplicaciones de ingeniería ([Tufoi et al., 2011](#)) ([Smid, 2003 – Leu y Joshi, 2011](#)).

Ejemplo de aplicación de procesamiento de imágenes en el proceso de manufactura es el trabajo publicado por [Cheng et al., \(2011\)](#) donde utiliza un método basado en

imagen para examinar la precisión del perfil para estrías en micro-perforación. Otro ejemplo da la metodología para medir la rugosidad del fresado final en el contorno de la pieza de trabajo usando técnicas de procesamiento de imágenes ([Sharan y Onwubolu, 2011](#)).

### 3 Metodología

El método propuesto inicia reconociendo un archivo DXF. Posteriormente una transformación de archivos es usada (de un archivo DXF a un archivo BMP) para obtener una imagen. Entonces, una lineal transformación es aplicada a la imagen en escala de grises, en imagen binaria 2D. Después la operación de segmentación y morfológica direccional es implementada para determinar la posición y dirección absoluta y relativa de un marco de referencia para cada pixel del contorno de la pieza y herramienta, la herramienta seleccionada es guardada cuando un elemento estructural que tiene la forma de la herramienta de corte, es aplicada para cada pixel localizado en la frontera.

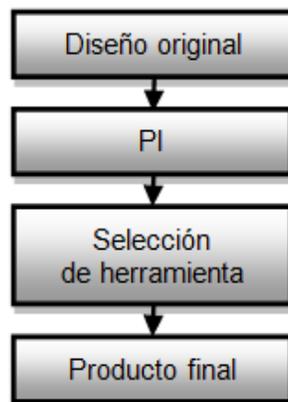


Figura 3.1. Diagrama a bloques general.

La Figura 3.1 representa un diagrama a bloques de la estructura general de trabajo con el uso de PI para la selección automática de la herramienta, como primer módulo se tiene la pieza original diseñada en CAD que posteriormente se transformara en imagen, en el segundo módulo se implementa un PI donde se registrar y manipula la imagen, el tercer módulo es usado para seleccionar la herramienta de corte con respecto a la información obtenida anteriores y los datos de las herramientas a partir de manuales, finalmente el resultado del módulo final la selección automática.

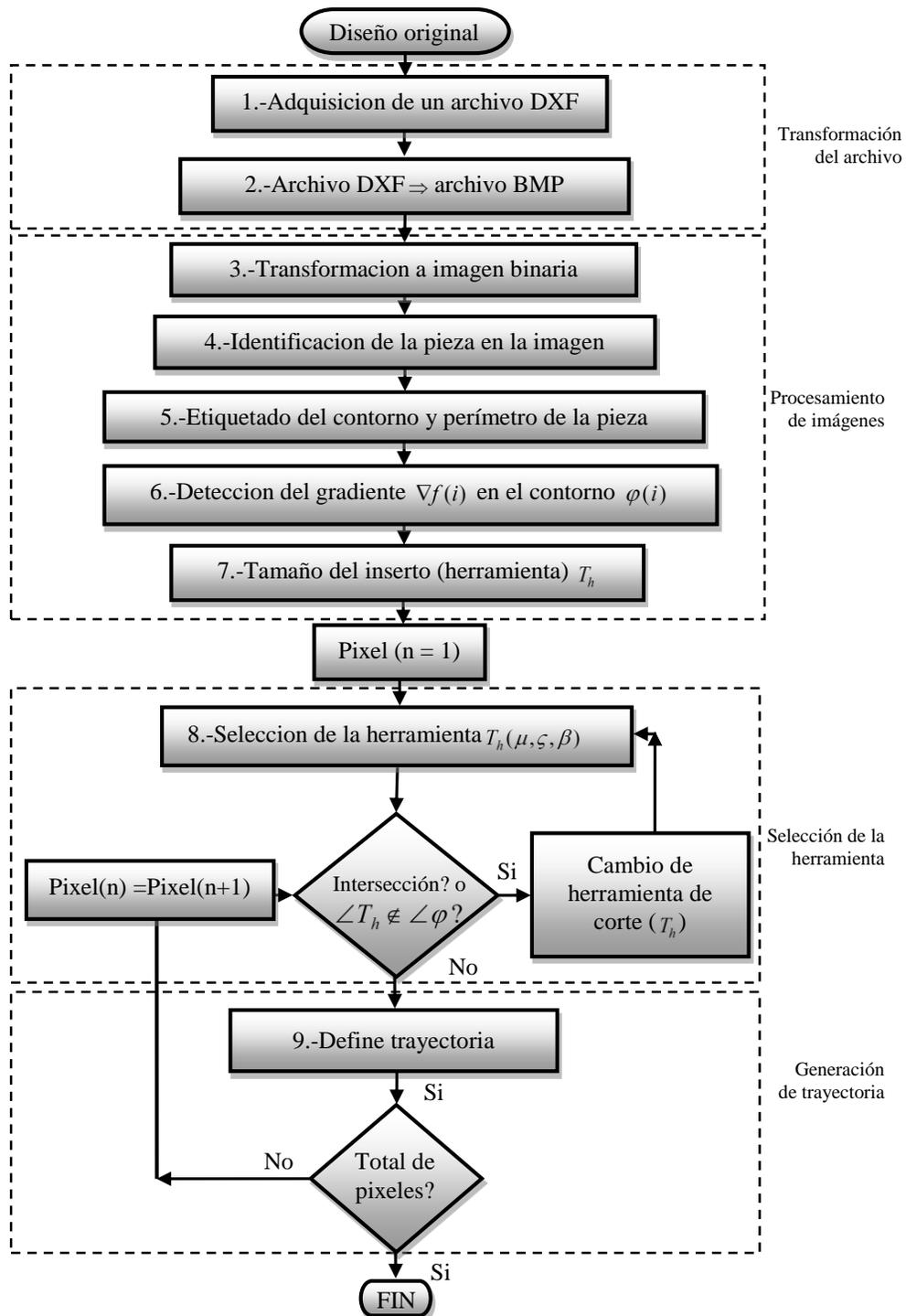


Figura 3.2. Diagrama general para la selección automática de la herramienta.

El uso de procesamiento de imágenes para resolver problemas de manufactura, es un campo sin explorar, en ésta tesis siete pasos son propuestos para la selección

automática de la herramienta usando procesamiento de imágenes de esta manera. El diseño original (Figura 3.2) es tomado de CAD (modelo en alambre) como archivo DXF. Después, un método de extracción de datos (Chung y Peng, 2004) es aplicado para generar la imagen.

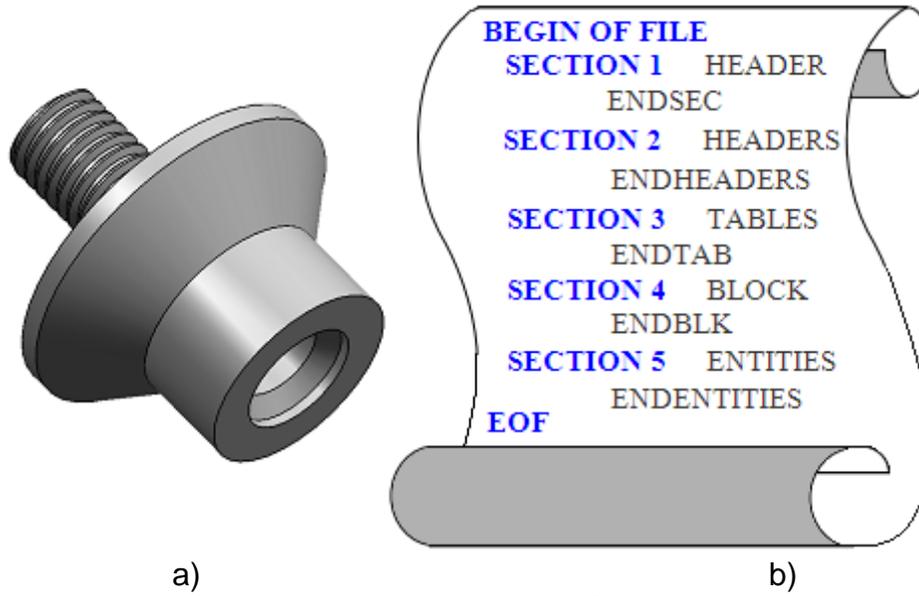
Después, usando diferentes transformaciones de procesamiento de imágenes, tal como el etiquetado para definir la pieza de la imagen, el gradiente para encontrar la pendiente, el contorno para detectar la posición del vector gradiente. Y finalmente un elemento estructural con la forma de la herramienta de corte con ángulo  $\mu$ , longitud  $\zeta$  y ángulo de la nariz  $\beta$  es desplazada a través de toda la imagen de derecha a izquierda y de la parte inferior hasta la superior creando trayectorias de desbaste para  $m$  total de píxeles.

### 3.1 Metodología 2D

La Figura 3.2 muestra dos condiciones, si el ángulo de la herramienta de corte ( $\angle T_h$ ) no está en el rango del ángulo permisible del contorno ( $\angle \varphi$ ) o si hay una intersección entre la herramienta de corte con la pieza, entonces la herramienta de corte es cambiada por otra. Si no hay intersección entre el elemento estructural y el contorno de la pieza, entonces se considera como parte de la trayectoria. Los pasos detallados son los siguientes:

#### 3.1.1 Paso 1. Adquisición del archivo DXF.

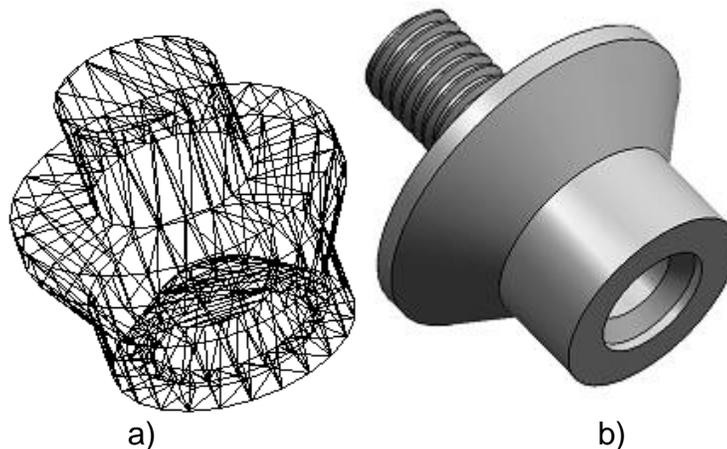
El diseño original (Figura 3.3a.) es obtenido de un archivo .CAD después este es convertido a un archivo .DXF (Zhao et al., 2002). Este archivo contiene información general acerca del dibujo, las definiciones de los elementos y las entidades que componen cada bloque en el dibujo (Figura 3.3b).



a) b)  
 Figura 3.3. Archivo original, a) diseño de CAD, b) archivo DXF.

### 3.1.2 Paso 2. Transformación de archivo.

Un método de extracción de datos (Chung y Peng, 2004) (Zhao et al., 2002) es aplicado para convertir de archivo DXF a archivo BMP, el método inicia con un archivo DXF este archivo se obtiene al guardar la pieza CAD en formato de datos, finalmente estos se extraerán con una transformación DXF a BMB, obteniendo la Figura 3.4a y Figura 3.4b.



a) b)  
 Figura 3.4. Archivos, a) diseño sin textura (en alambre), b) imagen (BMP).

Un análisis de la calibración antes y después de aplicar técnicas de procesamiento de imágenes es utilizado para encontrar la resolución más apropiada de acuerdo

con las dimensiones de la pieza a maquinar (resolución máxima utilizado 50,800 mm) y la herramienta de corte (dimensión máxima utilizada 19,049 mm), la misma distancia se determina automáticamente en píxeles de la imagen y un valor de calibración se obtiene dividiendo la distancia en milímetros por la distancia en píxeles para obtener una relación de mm por píxel. El valor de calibración para este sistema es aproximadamente de 1.1  $\mu\text{m}$  con una resolución de pantalla de 50800x50800 píxeles.

### 3.1.3 Paso 3. Transformación a imagen binaria.

El espacio de una imagen ( $f$ ) está dividida en  $\tau$  regiones, estas regiones hacen un espacio regularmente de una malla espaciada en hiper-cubos generando una densidad de población de igual tamaño  $\lambda^\tau$  que está representado por:

$$\lambda^\tau \subset f \Rightarrow \bigcup_{\tau=1}^{m-1} (\lambda^\tau = f) \text{ y también; } (\lambda^\tau \cap \lambda^{\tau'}) = \phi, \forall \tau \neq \tau'$$

Donde  $m$  son los pixeles totales de la imagen,  $\tau$  y  $\tau'$  la región de la imagen y complemento respectivamente. Después iniciando con la imagen que es mostrada en la Figura 3.5a, una transformación (thresholding) es aplicada para convertir la imagen, de escala gris a binaria (Figura 3.5b) usando la siguiente ecuación.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \left\{ \text{Si } f(i, k) > 128 \text{ Entonces } f^B(i, k) = 1 \text{ de otra manera } f^B(i, k) = 0 \right\} \quad (1)$$

Donde  $f(i, k)|_n^m$  es la imagen en escala gris (imagen matricial de  $n \times m$  pixeles), y  $f^B(i, k)|_n^m$  es el resultado de la transformación de gris a binaria.

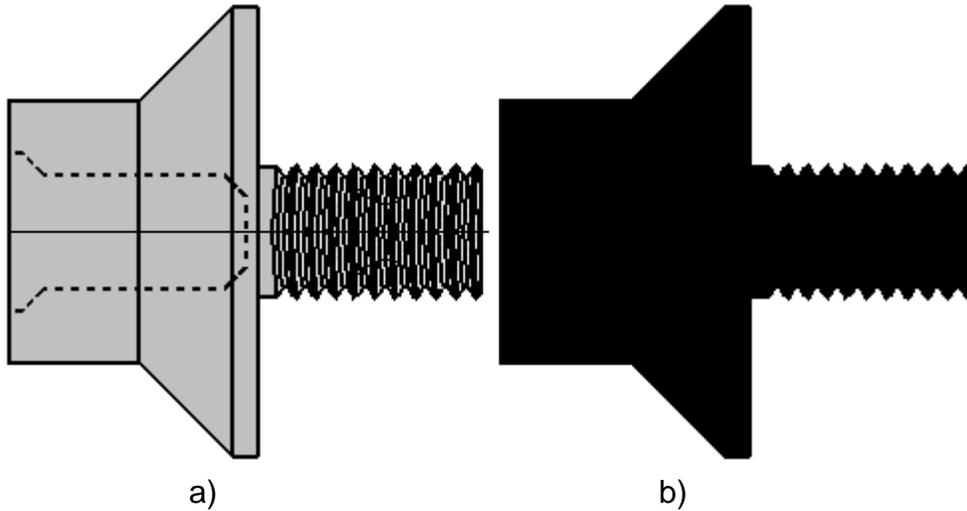


Figura 3.5. Archivo original, a) diseño de CAD, b) archivo DXF.

### 3.1.4 Paso 4. Identificación de la pieza.

El siguiente paso es la etiqueta binaria o limitación de la pieza  $e(i, k)|_n^m$  (Figura 3.6a) (Ecuación 2). Sea una imagen  $f_k \subseteq f(i, k)|_n^m$  en blanco y negro en el espacio binario  $f^B$  donde.

$$e = \bigcup_k \left\{ \forall f_k \in f^B \mid \langle \text{Si } f_k = 0 \text{ Entonces } x_k = 0 \rangle \vee \langle \text{Si } f_k = 1 \text{ Entonces } x_k = 1 \rangle \right\} \quad (2)$$

O también escrita como la Ecuación 3.

$$\sum_{k=\frac{m}{2}}^m \sum_{i=0}^n \{ e(i, k) = [\text{Si } f(i, k) = 1 \text{ Entonces } f_e(i, k) = 1] \cup [\text{Si } f(i, k) = 0 \text{ Entonces } f_e(i, k) = 0] \} \quad (3)$$

Donde  $f_e(i, k)|_n^m$  es la imagen etiquetada guardada en la imagen de salida  $e(i, k)|_n^m$  de Ecuación 3, tomando la mitad de la imagen  $k = m/2$  sobre el eje  $Z$ . La clasificación de dirección del contorno de la mitad de la imagen en el punto  $p(i, k)$  es presentada en la Figura 3.6b.

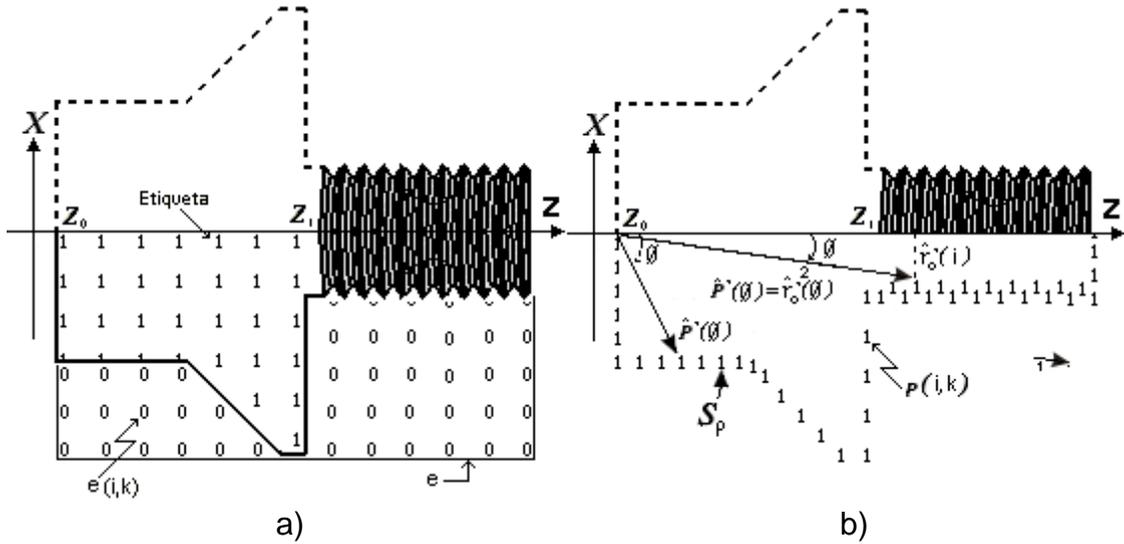


Figura 3.6. Definiciones de etiquetado, a) etiqueta de la pieza, y b) etiqueta del perímetro.

### 3.1.5 Paso 5. Etiqueta del contorno y perímetro.

El perímetro ( $\hat{P}(\theta)$ ) puede ser obtenido desde el contorno ( $|\nabla f|$ ) de la imagen ( $f(i, k) |^m_n$ ) Kindratenko, (1997) por la Ecuación 4.

$$\hat{P}(\theta) = 2 \int_{z_0}^{z_1} \sqrt{1 + \hat{q}'^2} dz = \int_0^{2\pi} \sqrt{\hat{r}'_o{}^2 + \hat{r}'_o{}^2} d\theta \quad (4)$$

Donde el vector  $\hat{q}'(i, k)$ , es la primera deriva de la imagen en  $f(i, k)$ , y  $\hat{r}'_o(k)$  son el radio y la longitud del vector del punto  $p(i, k)$  para una referencia absoluta, ver Figura 3.6b.

La integral está definida como la suma de la función ( $\sum f(i, k) |^m_n$ ) con límites de  $Z_0$  y  $Z_1$  con respecto a  $Z$ . El perímetro etiquetado  $S_p$  puede ser definido como la posición del vector para el contorno en la siguiente manera (Loncaric, 1998) (Ecuación 5 y la Ecuación 6).

$$\sum_{N=0}^{\infty} \{ (E_N(i, k) \leftarrow \{p(z, P(z)), \{N = N + 1 \vee z = N\} \}) \} \quad (5)$$

$$S_p = \sum_{k=\frac{m}{2}}^{m-2} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \prod_{N=1}^{m-2} \langle \text{Si } E_N(i,k)=1 \text{ Ent } f(i,k) \Leftarrow E_N(i,k), \text{ de otra manera } f(i,k) \Leftarrow f(i,k) \rangle \right\} \quad (6)$$

Donde el  $\Leftarrow$  (la flecha) significa que el vector se almacena en otro vector, la Figura 3.6b presenta el resultado de la trayectoria del perímetro etiquetado  $S_p$  representado con 1's en el punto  $p(i,k)$  de la imagen.

### 3.1.6 Paso 6. Morfología direccional y vector gradiente en el contorno.

El contorno en la imagen digital es obtenido por la evaluación de discontinuidades significativas en la intensidad de los píxeles (Chen et al., 2010). El gradiente, da la posición, orientación y dirección de la pieza (espacio de trabajo para maquinar).

Una transformación ( $T$ ) que toma la imagen  $e(i,k)_n^m$  obtenida en el paso anterior para obtener el gradiente (Ecuación 7). Dónde  $T$  es un operador gradiente de Sobel (Ecuación 8 y Ecuación 9) (Kekre et al., 2010) para encontrar los vectores de dirección.

$$\nabla f = \text{gradiente } f = \begin{cases} G_x = \frac{\partial}{\partial x} f(x,z) = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} = \frac{\partial}{\partial x} \hat{u}_1 \\ G_z = \frac{\partial}{\partial z} f(x,z) = \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} = \frac{\partial}{\partial z} \hat{u}_2 \end{cases} \quad (7)$$

Donde  $\hat{u}_1$  y  $\hat{u}_2$  son vectores en un marco de referencia con respecto al contorno de la pieza.

$$G_x = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{m-2} \left\{ \text{Edge}_x(i,k) = \sum_{z=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 e(x,z) M_x(z+2, x+2) \right\} \quad (8)$$

$$G_z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{m-2} \left\{ \text{Edge}_z(i,k) = \sum_{z=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 e(x,z) M_z(z+2, x+2) \right\} \quad (9)$$

Aquí  $M_x$  y  $M_z$  son la matriz de transformación para generar el borde aplicado a la imagen dadas por la siguiente expresión.

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

El gradiente vectorial representa el cambio máximo de intensidad para el punto  $p(i, k)$ .

La magnitud ( $|\nabla f|$ ) y dirección ( $\angle \nabla f$ ), está dada por la Ecuación 10 y la Ecuación 11, respectivamente.

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x + G_z} \quad (10)$$

$$\angle \nabla f = \tan^{-1} \frac{G_z}{G_x} \quad (11)$$

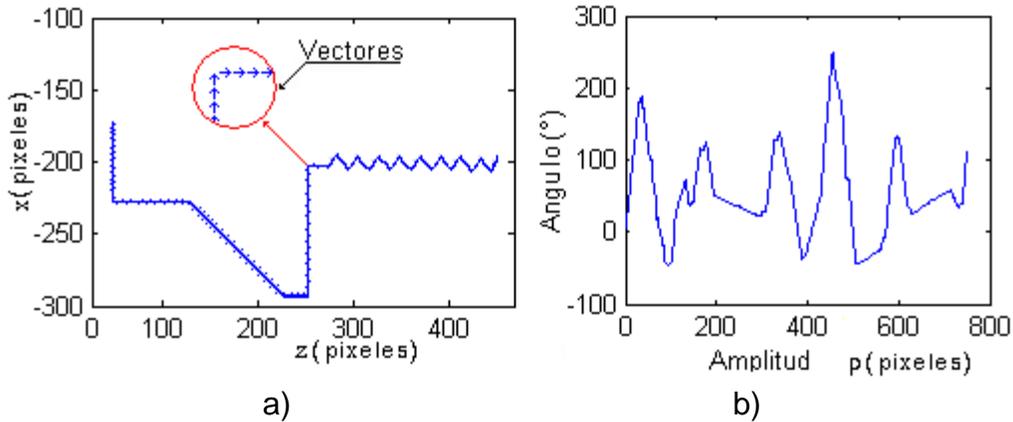


Figura 3.7. Vectores de la pieza, a) vector direccional de la pieza, b) magnitud de la dirección del contorno.

Figura 3.7a ilustra el vector direccional de del contorno de la pieza ejemplo. Figura 3.7b muestra los ángulos direccionales de acuerdo a la trayectoria del contorno cuando el gradiente se aplica a la imagen binaria en la pieza.

La magnitud y dirección del contorno es guardada en la variable  $Maq(i, k)$  usando la Ecuación 12 para generar las dimensiones del elemento estructural.

$$\sum_{k=mi=1}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{n=1}^{n-1} \left\{ Si\ existe\ contorno\ Entonces \left\{ Maq(i, k) \leq \left\{ \begin{array}{l} |\nabla f|(i, k) \text{ "magnitud"} \\ \angle \nabla f(i, k) \text{ "dirección"} \end{array} \right\} \right\} \quad (12)$$

### 3.1.7 Paso 7. Selección de la herramienta.

La dirección del contorno permite seleccionar el tipo, tamaño y el ángulo del inserto, que está representado por un elemento estructural en el procesamiento de imágenes. La Tabla 3.1 ilustra los tipos más comunes de herramientas de corte empleados en este trabajo de maquinado: la izquierdo (L), derecho (R), neutro (N), cuchillo (K), taladrado(D) y el soporte (H) para maquinado exterior y sus equivalentes para trabajos internos, donde  $\zeta$  es la longitud del inserto,  $\mu$  el ángulo de orientación y  $\beta$  radio de nariz. La librería de la herramienta de corte es generada a partir de manuales con los datos (longitud, ángulo y radio de nariz de la herramienta) son procesados para convertirlos en elementos estructurales (en píxeles) como se muestra en la Figura 3.8a. Los insertos han sido dibujados con una malla de 3 x 3 píxeles como ejemplos; aunque, un inserto real como el inserción externo derecho con dimensiones de  $45^\circ$  ( $\mu$ ), en 0.750 ( $\zeta$  72 píxeles), 0.2 ( $\beta$ ) requiere de una malla de 51 x 51 píxeles y el elemento estructural tiene 828 píxeles, para más detalles ver la Figura 3.8a.

Para identificar que inserto es el más adecuado, hacemos uso de los vectores de dirección del contorno ( $\angle \nabla f$ ) de la siguiente manera. Primero se determina la dirección del contorno del píxel en  $\angle \nabla f$  que siempre es localizado en el tercer y cuarto cuadrante y la decisión es dada por.

Si es  $180^\circ \leq \angle \nabla f < 270^\circ$  entonces se usa el inserto izquierdo.

Si es  $270^\circ \leq \angle \nabla f < 360^\circ$  entonces se usa el inserto derecho.

Cuando el elemento estructural viaja a través de la imagen y el contorno tienen un valor ( $Maq(i,k) = 1$ ) entonces un elemento estructural de un inserto es seleccionado de acuerdo a el ángulo del contorno (Ecuación13).

Tabla 3.1 Insertos comunes (elementos estructurales)

Herramienta para torneado			Tipo	$\mu(^{\circ})$	Tamaño (mm)			
Nombre	Letra	Forma			$\zeta$	$\beta$	FL	$\phi$
1.-Derecho	R		Externo	35	19.049	0.406	-	-
			Interno	125			-	-
2.-Izquierdo	L		Externo	197	19.0496	0.406	-	-
			Interno	19			-	-
3.-Neutro	N		Externo	90	12.699	0.507	-	-
			Interno	93			-	-
4.-Cuchilla	K		Externo	90	12.699	-	-	-
			Interno	95			-	-
5.-Taladrado	D		Externo	60	44.449	-	38.099	12.699
			Interno					
6.-Sanco	H		S16R PCLNR-L 09	95	71.118	20.141	20.319	19.989

$$\sum_{k=mi=1}^{\frac{m}{2}-1} \sum_{n=1}^{n-1} \{Si Maq(i,k) = 1 \text{ entonces selecciona inserto } \{\mu(i,k) \Leftarrow \angle \nabla f(\text{angulo de contorno})\}\} \quad (13)$$

Donde  $\mu$  son las dimensiones para la herramienta de corte y presentada en la Ecuación 14.

$$\sum_{k=mi=1}^{\frac{m}{2}-1} \sum_{n=1}^{n-1} \left\{ Si Maq(i,k) = 1 \text{ Entonces } \mu(i,k) \text{ is } \left\{ \begin{array}{l} \text{inserto derecho, Si } 17.5^{\circ} \leq \mu(i,k) < 45^{\circ} \\ \text{inserto izquierdo, Si } 107^{\circ} \leq \mu(i,k) < 180^{\circ} \\ \text{inserto neutro, Si } \mu(i,k) = 90^{\circ} \\ \text{inserto cuchilla, Si } \mu(i,k) = 90^{\circ} \end{array} \right\} \right\} \quad (14)$$

Después se selecciona un inserto siguiendo el orden de la Tabla 3.1, el elemento estructural mostrado en la Figura 3.8a es movido a través del contorno tal que la esquina del pixel, que representa la nariz de corte, coincide con cada píxel del contorno. Si en cualquier pixel del contorno hay una intersección entre la pieza y el elemento estructural (Figura 3.8b) el inserto no es el correcto y se trata con otro inserto (Figura 3.8c), repitiendo el mismo proceso.

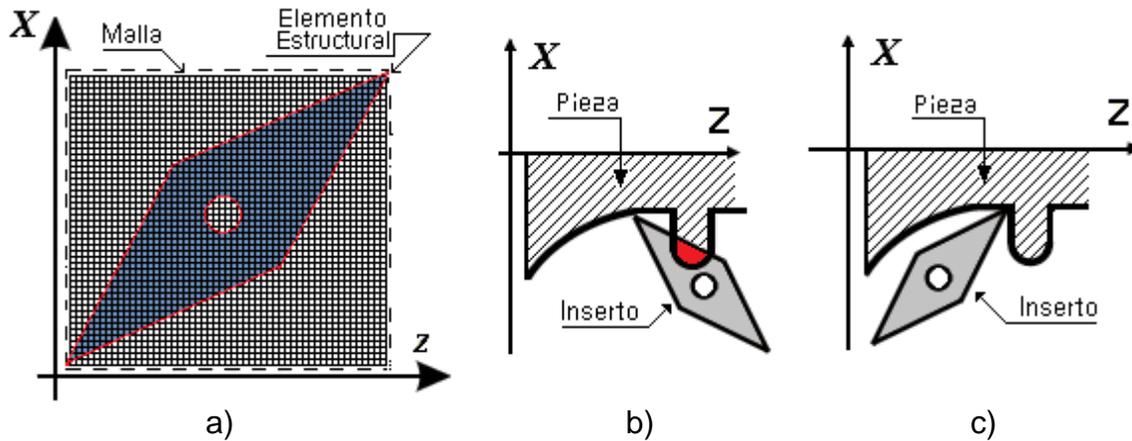


Figura 3.8. Elemento estructural, a) para el inserto derecho, b) inserto incorrecto y c) inserto correcto.

Después que han sido seleccionados los insertos correctos para trabajar cada área, esto es posible que algunos cambios de herramientas de corte sean requeridos. El número de cambios puede ser reducido al ordenar los cambios con el siguiente procedimiento (Ecuación 15).

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=\frac{m}{2}}^{m-2} \left\{ Si \left\{ (S_p(i,k) = 1) \text{ y } \sum_{h=-1}^1 \sum_{\psi=-1}^1 \lambda[i+\psi][k+1] = 1 \right\} EntTray(i,k) \Leftarrow \lambda[i+\psi][k+1] \right\} \quad (15)$$

Donde  $\lambda[i+\psi][k+1]$  es la malla aplicada a el contorno ( $S_p$ ) con vecindad de ocho para identificar la ruta.

### 3.2 Metodología para centros de maquinado

La aplicación de morfología matemática para resolver problemas de manufactura es una nueva propuesta en la literatura esta metodología está enfocada a la selección de la herramienta pero en fresa. En la presente, se proponen seis pasos para obtener la selección automática de la herramienta usando operaciones morfológicas. De esta manera, el archivo original es un modelo en 3D tomado de CAD y exportado a un archivo DXF, entonces aplicando una transformación dentro del archivo DXF para construir una imagen de formato BMP.

Después aplicando varias técnicas de pre-procesamiento de imágenes tales como: imagen binaria, registración, identificación, segmentación y compresión de imagen

para generar el contorno de la pieza y usando las fronteras de la pieza y aplicando el procesamiento de imágenes tales como gradiente y etiquetado del perímetro de la pieza para generar las longitudes de las fronteras como para localizar y separar la imagen de la pieza.

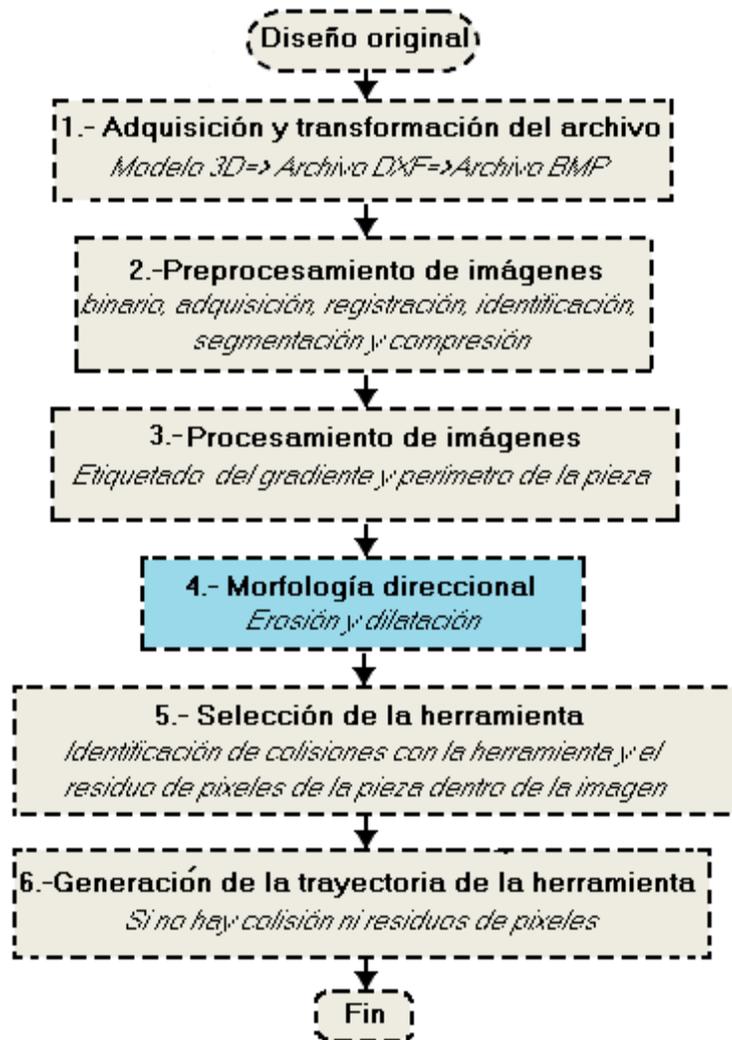


Figura 3.9. Diagrama general de la selección automática de la herramienta para centros de maquinado.

Finalmente un elemento estructural con la forma de la herramienta de corte es desplazada a través de toda la imagen con los valores de las dimensiones de la frontera de la pieza y las longitudes de la herramienta de corte, el uso de morfología matemática, especialmente la erosión o dilatación para generar automáticamente la selección de la herramienta y trayectoria de la herramienta. La Figura 3.9 muestra

los pasos detallados para la selección automática de la herramienta basada sobre la forma y cada paso es detallado como sigue:

### 3.2.1 Etapa 1 Adquisición y transformación de un archivo

Adquisición de archivo DXF. El diseño original (Figura 3.10a) se obtiene a partir de CAD o de una *imagen* tomada con otros dispositivos, entonces, el perfil superior se convierte en DXF file (Zhao et al, 2002) (Figura 3.10b). Este archivo contiene información acerca del dibujo, las definiciones de los elementos y las entidades que componen cada bloque.

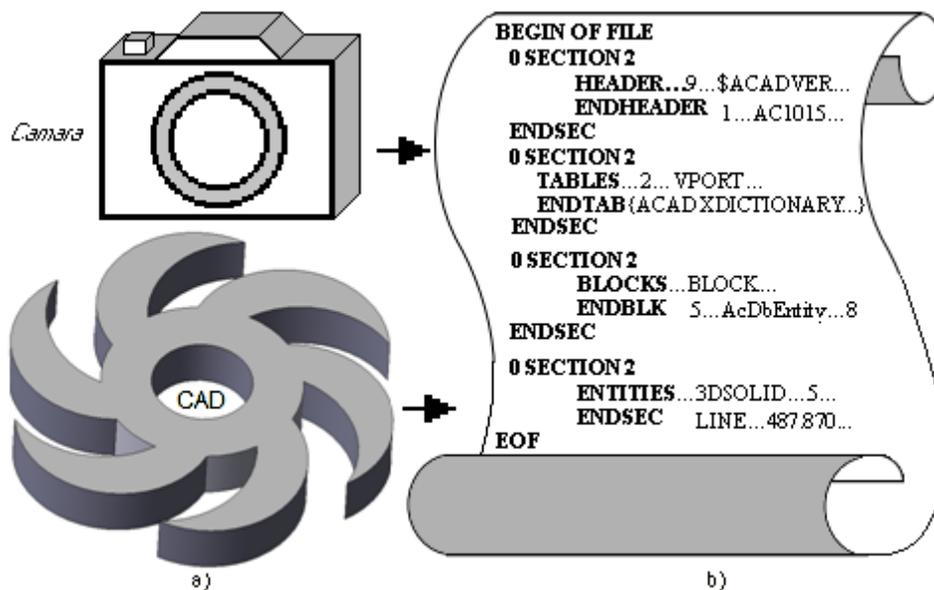


Figura 3.10. Archivos originales, a) diseño de CAD o cámara, b) archivo DXF.

*Trasformación del archivo.* Un análisis de precisión, antes y después aplicando técnicas de procesamiento de imágenes, para encontrar la más apropiada resolución de acuerdo a las dimensiones de las piezas para maquinarse (patrón de prueba utilizado es de 25.400 mm) y herramientas de corte (modelo de prueba utilizado es de 19.049 mm). El valor de calibración es también la resolución de este sistema y es aproximadamente un micrómetro, usando una resolución del sistema

para 1  $mm^2$  de 800X600 (escala 4:3, 15x11 píxeles) y 50800x50800 (escala 1:1, 1000x1000 píxeles).

Un método de extracción de los datos (Chung y Peng, 2004), (Zhao et al, 2002) se aplica para convertir el archivo de DXF a BMP, obteniendo la Figura 3.11(a) y Figura 3.11(b). La misma distancia es automáticamente determinada en píxeles en la imagen y un valor de calibración se obtiene dividiendo la distancia en milímetros ( $distancia_{mm}$ ) por la distancia en píxeles ( $distancia_{pixel}$ ) para obtener la siguiente relación de milímetros por píxel ( $relación (mm \text{ per } pixel)$ ).

$$Relación = \frac{distancia_{mm}}{distancia_{píxeles}}$$

Todas las dimensiones son conocidas en el fichero DXF. En orden para encontrar el gradiente direccional del borde, en la que se aplica procesamiento de imágenes.

### 3.2.2 Etapa 2. Pre-procesamiento de imagen

*Imagen Binaria.* Una imagen binaria ( $\mathbf{f}^B(i, j)_n^m$ ) en 2.5D es un subconjunto  $\chi_D$  de  $\mathfrak{R}^3$  si  $\{0,1\}^{2.5}$  representa el conjunto de funciones como  $\chi_D \subset \mathfrak{R}^3$  en el conjunto de  $\{0,1\}$ , de modo que cualquier imagen binaria puede ser representado por un función característica  $\chi_D : \mathfrak{R}^3 \rightarrow \{0,1\}$ , después comenzando con la imagen que se muestra en la Figura 3.11(b), una transformación (umbralización) se aplica para convertir la imagen de escala de grises a escala binaria usando las siguientes ecuaciones.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \left\{ Si \left( \begin{array}{l} \mathbf{f}(i, j) > T(\text{Píxeles en el objetos}) \Rightarrow A_1 = \mathbf{f}(i, j) \\ \mathbf{f}(i, j) \leq T(\text{Píxeles fuera del objeto}) \Rightarrow A_2 = \mathbf{f}(i, j) \end{array} \right) entonces \mathbf{f}^B(i, j) \right\} \quad (16)$$

donde  $\mathbf{f}^B(i, j)$  es igual a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \left\{ \mathbf{f}^B(i, j) = \frac{\text{Valor promedio de } A_1 + \text{Valor promedio de } A_2}{2} \right\} \quad (17)$$

dónde  $\mathbf{f}(i, j)|_n^m$  es la imagen en escala de grises (imagen con una matriz de  $n \times m$  píxeles), son áreas dentro de la imagen y  $\mathbf{f}^B(i, j)|_n^m$  es el resultado de la transformación de escala gris a color binario.

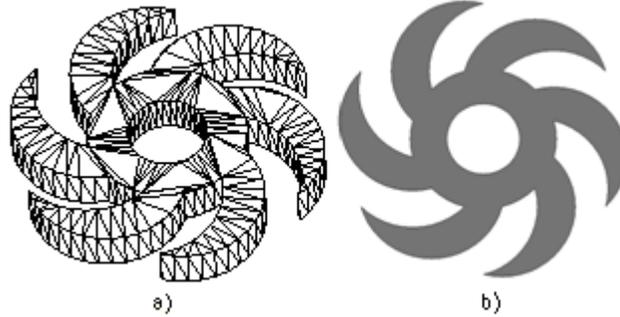


Figura 3.11. Archivos, a) Diseño sin textura (archivo en alambre), b) imagen (archivo BMP.).

### 3.2.3 Etapa 3. Procesamiento de la imagen

*Detección y etiquetado del gradiente y perímetro en el contorno de la pieza.*

El siguiente paso es el etiquetado binario o limitación de la pieza  $\mathbf{e}(i, j)|_n^m$  (Figura 3.12(a)). Sea una imagen  $\mathbf{f}_k \subseteq \mathbf{f}(i, j)|_n^m$  escrita en blanco y negro en el espacio binario  $\mathbf{f}^B$ .

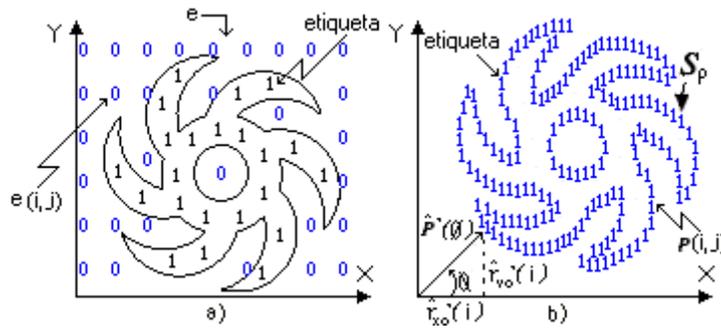


Figura 3.12. Definición del etiquetado, a) etiquetado de la pieza, y b) etiquetado del perímetro.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left\{ \mathbf{e}(i, j) = \begin{cases} \mathbf{f}(i, j) = 1 \Rightarrow \mathbf{f}_e(i, j) = 1 \\ \mathbf{f}(i, j) = 0 \Rightarrow \mathbf{f}_e(i, j) = 0 \end{cases} \right\} \quad (18)$$

dónde  $\mathbf{f}_e(i, j)|_n^m$  es el etiquetado de la imagen guardado en la imagen de salida  $\mathbf{e}(i, j)|_n^m$  de la ecuación (2). La clasificación direccional del borde para la mitad de la imagen en el punto  $p(x, y)$  es presentada en la Figura 3.12(b).

*El perímetro de la pieza.* El perímetro ( $\hat{P}(\theta)$ ) puede ser encontrado mediante la aplicación de un borde ( $|\nabla f|$ ) dentro de la imagen ( $\mathbf{f}(i, j)|_n^m$ ) para proveer información acerca de la forma del objeto (Kindratenko (1997) y Mejía et al (2012)) y el etiquetado del perímetro  $S_p$  puede ser definido como el vector de posición para el contorno (Mejía et al, 2012), (Loncaric), la Figura 3.12(b) presenta el resultado de la trayectoria del etiquetado del perímetro  $S_p$  representado con la etiqueta "1" en el punto  $p(i, j)$  de la imagen.

*Fronteras del borde de la pieza.* Las fronteras ( $B$ ) o el borde de la imagen ( $f$ ) pueden ser descritas por una función para un punto ( $h$ ), obtenido por la evaluación significativa de las discontinuidades en la intensidad de los píxeles (Chen et al. 2010) ( $\sigma$ ) el gradiente, da la posición ( $x$ ), orientación ( $\theta$ ) y la dirección de la pieza ( $\alpha$ ) (maquinado del espacio de trabajo), el contorno de la figura puede ser simétrica y periódica con respecto a una línea ( $x \in B$ ) para un pulso de Dirac ( $\delta_x(B)$ ) (Ecuación 19), utilizado para el procesamiento de imágenes y de lo contrario para más funciones complejas en el contorno o límite de piezas.

$$\frac{\partial f}{\partial h}(x) = \left( \frac{\partial f}{\partial h} \right) (x) + \sigma \cos(\theta) - \alpha \delta_x(B) \quad (19)$$

Una transformación ( $T$ ) que toma la imagen  $e(i, j)|_n^m$  obtenida en el paso anterior para obtener el gradiente donde  $T$  es un operador gradiente de Sobel (2011) para encontrar los vectores direccionales y el gradiente vectorial que representa el cambio máximo de intensidad para el punto  $p(i, j)$ , estos vectores tienen magnitud ( $|\nabla f|$ ) y dirección ( $\angle \nabla f$ ) la Figura 3.13(a) ilustra la dirección del vector del borde del

ejemplo de la primera pieza, la Figura 3.13(b) muestra los ángulos direccionales de acuerdo a la trayectoria del borde aplicando el gradiente en la pieza.

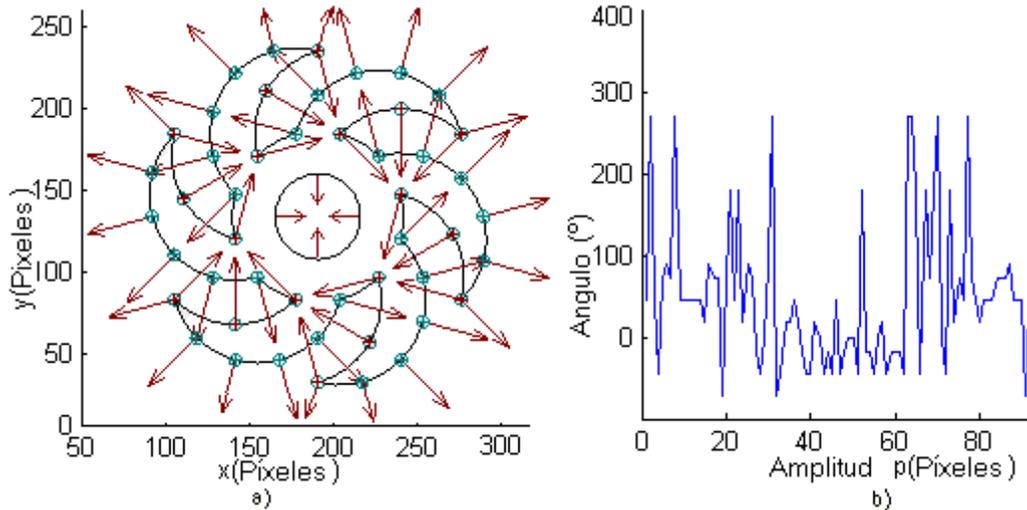


Figura 3.13. Vectores de la pieza, a) vectores direccionales de la pieza, b) magnitud de la dirección del borde.

La magnitud ( $|\nabla f|(i, j)$ ) y dirección ( $\angle \nabla f(i, j)$ ), en el etiquetado y perímetro ( $\angle \nabla f(i, j)$ ) del borde se guarda en la variable  $\mathbf{Des}(i, j)$  (Ecuación 20) para generar la dimensión del elemento estructural.

$$\left\{ \forall S_p(i, j) \in f(x, y) : \exists \begin{pmatrix} |\nabla f|(i, j) \wedge \\ \angle \nabla f(i, j) \end{pmatrix} \subset \mathbf{Des}(i, j) \right\}$$

Por lo tanto.

$$\mathbf{Des}(i, j) = \int_{j=1}^{j=m-1} \int_{i=1}^{i=n-1} [ (|\nabla f|(i, j) \wedge \angle \nabla f(i, j)) ] dx dy \quad (20)$$

### 3.2.4 Etapa 4. Morfología direccional

*Morfología direccional para generar el tamaño de la herramienta.* La erosión y dilatación son operaciones morfológica fundamentales para el procesamiento de imagen, definidos para imágenes binarias, para imágenes en escala de grises y para completar lattices (celosías), dilatación ( $\delta$ ) y erosión ( $\varepsilon$ ) es formado por la

interacción de un conjunto llamado elemento estructural (con forma) con un conjunto de píxeles de interés en la imagen se emplean como los elementos básicos de muchos algoritmos.

La Figura 3.14 muestra la dilatación de una imagen en escala de grises  $f(i, j)$  por un elemento estructural  $b(i, j)$  y este se define en la Ecuación 21.

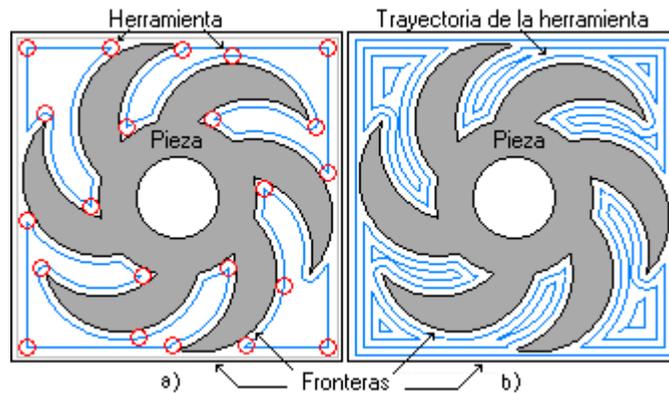


Figura 3.14. Morfología direccional a) dilatación del tamaño de la herramienta, b) dilatación del tamaño de la trayectoria.

$$(A \oplus B)(w, q) = \max \{ f(w-i, q-j) + b(i, j) \} \quad (21)$$

de tal manera que  $(w-i, q-j) \in D_A, (i, j) \in D_B$ , dónde  $D_A$  y  $D_B$  son los dominios de  $A$  y  $B$ , respectivamente, definido por  $A \oplus B$  donde  $A$  es un conjunto de píxeles y  $B$  es un elemento estructural,  $\hat{B}$  es la reflexión de  $B$  sobre su origen y seguido por un cambio por  $s$ . La dilatación también satisface las siguientes ecuaciones (Ecuación (22) y (23))

$$A \oplus B = \left\{ s \mid (\hat{B})_s \cap A \neq \Phi \right\} \quad (22)$$

equivalente,

$$A \oplus B = \left\{ s \mid ((\hat{B})_s \cap A) \subseteq A \right\} \quad (23)$$

La dilatación es una translación de un elemento estructural ( $A$ ) hacia el interior, para cada píxel del borde de una imagen ( $B$ ), llamado como la Ecuación 24.

$$A \oplus B = \bigcup_{b_i \in B} \mathbf{A}_{b_i} \quad (24)$$

Por lo tanto la generación de la Ecuación 25.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ S_i \left[ \left( (f(i, j) = 0) \right) \delta \left( (f(i, j-1) = 1) \parallel f(i, j) \right) \Rightarrow f(i, j) \leftarrow 1 \right] \right\} \quad (25)$$

La Figura 3.15 muestra la erosión de los niveles de gris y se define como la Ecuación (26).

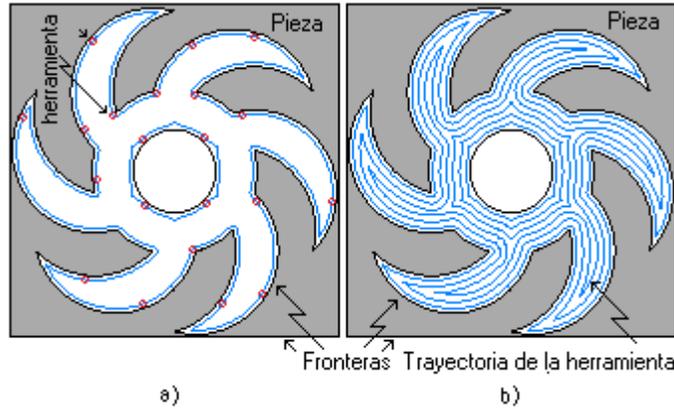


Figura 3.15. Morfología direccional, a) erosión del tamaño de la herramienta, b) erosión del tamaño de la trayectoria.

$$(A \ominus B)(w, q) = \min \{ f(w+i, q+j) - b(i, j) \} \quad (26)$$

De tal manera que

$$(w+i, q+j) \in D_A, (i, j) \in D_B$$

Dónde  $D_A$  y  $D_B$  son los dominios de  $A$  y  $B$ , respectivamente, o también escrito como las siguientes ecuaciones (Ecuación (27) y (28)).

$$(A \ominus B) = \{s \mid (B)_s \subseteq A\} \quad (27)$$

La erosión es una operación inversa a la dilatación

$$(A \ominus B) = \{p \mid B_p \subseteq A\} \quad (28)$$

La erosión es una translación de un elemento estructural ( $A$ ) hacia el exterior, para cada píxel del borde de una imagen ( $B$ ), llamado como la Ecuación 29.

$$A \ominus B = \bigcap_{b_i \in B} \mathbf{A}_{b_i} \quad (29)$$

Por lo tanto generando la Ecuación 30.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ Si \left[ \begin{array}{l} ((f(i, j) = 1)) \delta \delta ((f(i, j-1) = 0) \parallel f(i-)) \\ (1, j) = 0 \parallel f(i, j+1) = 0 \parallel f(i+1, j) = 0 \end{array} \right] \Rightarrow f(i, j) < 0 \right\} \quad (30)$$

Modificación la Ecuación (28) y (30) de la morfológica direccional para generar el elemento estructural del inserto y la trayectoria de la herramienta, usando las fronteras del espacio de trabajo, el borde y la función del perímetro de la pieza generando la Ecuación (34) y como resultados proporcionados por la Figura 3.16 (a) y Figura 3.16(b).

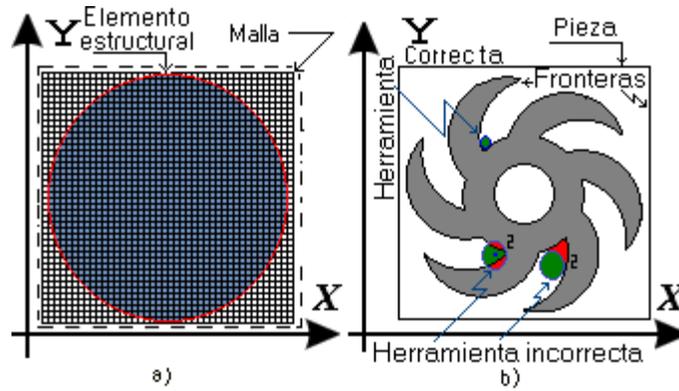


Figura 3.16. Selección de la herramienta, a) Elemento estructural, b) Herramienta incorrecta y herramienta correcta.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ SE_1(i, j) = \sum_{a=-2}^2 (i, j+a) \right\} \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ SE_2(i, j) = \sum_{b=-2}^2 (i+b, j) \right\} \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ \sum_{h=n-4}^n \left( SE_{n-2}(i, j) = \sum_{c=-1}^1 \sum_{d=-1}^1 (i+c, j+d) \right) \right\} \quad (33)$$

$$SE = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ \{SE_1(i, j)\} \cup \{SE_2(i, j)\} \cup \dots \cup \left\{ \sum_{h=n-4}^n (SE_{n-2}(i, j)) \right\} \right\} \quad (34)$$

if  $\{(SE_{n-2}) = ((SE_1) \text{ or } (SE_2)) \text{ entonces elimina } (SE_{n-2})\}$

dónde  $(SE_1)$  es el primer fragmento del elemento de estructural y  $(SE_1)$  está dada por la Ecuación 35.

$$SE_1 = \sum_{a=-2}^2 (i, j+a) = (i, j-2) \cup (i, j-1) \cup (i, j) \cup (i, j+1) \cup (i, j+2) \quad (35)$$

### 3.2.5 Etapa 5. Selección de la herramienta

Durante la operación de corte, es necesario considerar los posibles choques con diferentes elementos de herramienta de corte, tales como: el giro del cabezal, porta herramientas en la torreta y el contrapunto, entre otros. Estos elementos limitan el espacio de trabajo. Sin embargo, en esta investigación, la pieza de trabajo, la herramienta de corte y la porta herramienta son sólo estudiados, ya que el espacio de trabajo requiere un estudio aparte para su determinación y depende de cada estructura de la máquina, también se requerirá más tiempo de procesamiento y la resolución de la pantalla.

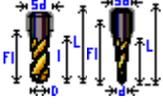
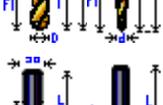
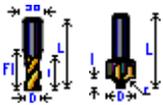
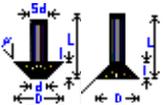
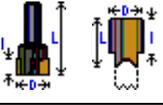
La dirección del contorno permite la selección del tipo, tamaño y trayectoria de la herramienta, que está representado por el elemento estructural de la pieza usando procesamiento de imágenes. Cuando un píxel del borde choca un píxel del elemento estructural (SE) un método iterativo se aplica utilizando morfología, el elemento estructural se mueve a través de la función del perímetro para generar la herramienta y la trayectoria de la herramienta

La

Tabla 3.2 ilustra los tipos comunes de las herramientas de corte utilizadas en las operaciones de fresado: Bola (B), acabado (E), cono de esquina (C), en V (D), chaflán (CH), contra bola (CB), Sanco (H), para el fresado, taladrado y operaciones de careado, donde  $D$  es el diámetro,  $d$  es el diámetro de la punta,  $L$  longitud mayor,  $l$  menor longitud,  $FI$  longitud útil,  $Sd$  preselección,  $\phi$  radio de la esquina de la herramienta de corte, la herramienta se genera a partir de manuales y herramientas almacenadas en el almacén, estos datos (diámetro, diámetro de la punta, mayor longitud, menor longitud, longitud utilizable, preajuste, radio de la esquina de la herramienta) se introducen en el software convirtiendo esos datos en elementos estructurales (en píxeles) como se muestra en la Figura 3.16(a). Las herramientas de corte ha sido dibujada con una malla de 42 por 42 píxeles como

ejemplo; aunque, un real inserto como la herramienta de corte en taladrado con un diámetro de 5,56 mm ( $D$ , 21 píxeles) requiere una herramienta de corte con un elemento estructural de  $\pi(20)^2$  píxeles. Para más detalles ver la Figura 3.16(a)

Tabla 3.2. Herramientas de corte comunes (elementos estructurales) usados

Herramienta para maquinado en 2.5 D			Tipo	Tamaño (mm)						
Nombre	Letra	Forma		$D$	$d$	$L$	$l$	$FI$	$Sd$	$\phi(^{\circ})$
Bola	B		Fresado	0.0157	0.0157	40.1496	15.1811	20.4173	0.0158	0.0085
Acabado	E		Taladrado	0.2000	0.1999	20.1496	15.1811	17.4173	0.2100	0.0999
				0.1500	0.0150	20.1496	14.1811	16.4173	0.0151	0.7499
Cono Esquina	C		Fresado	0.0999	0.0999	25.1496	14.1811	20.4173	0.1000	0.0499
				0.0499	0.0499	15.1496	7.1811	12.4173	0.0500	0.0249
En V	D			0.0099	0.0049	10.1496	5.1811	7.4173	0.0100	0.0049
Chañlán	CH		Careado	0.3099	0.3099	30.000	19.999	22.999	0.4000	0.2000
Contra-bola	CB			0.3999	0.3999	45.1496	10.1811	15.4173	0.3800	0.2300
Sanco	H			0.5999	0.5999	25.1496	10.1811	15.4173	0.3900	0.2500

Para identificar la herramienta de corte más apropiada, un elemento estructural con el diámetro (ver

Tabla 3.2) es movido en función del perímetro aplicando morfología direccional de los píxeles del contorno de la pieza para seleccionar la herramienta de corte más apropiada.

Cuando el elemento estructural se mueve a través de la imagen y el borde, se obtiene un valor ( $\mathbf{Des}(i, j) = 1$ ) entonces, un elemento estructural de un inserto es seleccionado de acuerdo al diámetro mostrado en la Ecuación 36.

$$\sum_{j=m}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \{Si \mathbf{Des}(i, j) = 1 \text{ entonces selecciona el inserto } \{\mu(i, j) \Leftarrow \text{diámetro}\}\} \quad (36)$$

Dónde  $\mu$  son las dimensiones para la herramienta de corte, después una herramienta de corte es seleccionada, siguiendo el orden de la

Tabla 3.2, el elemento estructural se muestra en la Figura 3.16(a) este es movido a través del contorno de una manera tal que la esquina del elemento estructural, que representa el diámetro de la punta del cortador. Si en cualquier píxel del borde hay una intersección entre la pieza y el elemento estructural (Figura 3.16(b)) el inserto no es correcto y otro inserto (herramienta de corte) se trata, repitiendo el mismo proceso como lo muestra el algoritmo de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Algoritmo general para la selección de la herramienta basada en residuos de píxeles.

---

```

F ←  $f(i, j) \big|_n^m$    Imagen
D ←  $d_k(mm)$        Selección del diámetro de la herramienta de corte, donde  $k = 1$ 
For (i=1 to n)
    For (j=1 to m)
        Erode or Dilate → F       Morfología direccional
        If (Intersection or residues pixels)
             $d(mm) \leftarrow d_k(mm)$    Cambio del diámetro
             $k = k + 1$ 
        Else
             $Area_k \leftarrow k = k$      Genera área
        End
    End
End

```

---

El procedimiento de intersección de la herramienta de corte con la pieza se comprueba usando técnicas de procesamiento de imágenes con el propio software (Este fue desarrollado en Microsoft Visual C++ 2010). Todos los píxeles contenidos en la pieza están etiquetados en coordenadas  $(i, j)$  y un valor lógico (0); todos los píxeles del elemento estructural de la herramienta con otro valor lógico se etiqueta (1), cuando un elemento estructural se desplaza con la forma de la herramienta de corte a través de toda la imagen y si la posición de uno o más píxeles del elemento estructural pertenecen a la pieza entonces hay una intersección.

### Numero de cambios de la herramienta:

Después de la correcta boquilla (Carpenter y Maropoulos, 2000) y herramientas de corte que han sido seleccionados para trabajar en cada área, es probable que se requiera muchos cambios de herramientas de corte. El número de cambios puede ser reducido por orden de los cambios con el siguiente procedimiento de la Ecuación 37.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-2} \left\{ Si \left\{ (S_p(i, j) = 1) \text{ y } \sum_{h=-1}^1 \sum_{\psi=-1}^1 \lambda[i + \psi][j + 1] = 1 \right\} \text{ entonces } \mathbf{Tray}(i, j) \leftarrow \lambda[i + \psi][j + 1] \right\} \quad (37)$$

Donde  $\lambda[i + \psi][j + 1]$  es una malla que se aplica al borde ( $S_p$ ) con vecindad de ocho píxeles para identificar la ruta.

### 3.2.6 Etapa 6. Estrategia para la selección de la trayectoria de la herramienta

Los métodos para la generación de trayectoria son: zig (un camino), zig-zag (dos caminos, ida y vuelta), zig con contorno, zig-zag con contorno, follow-periphery, trochoidal and profile (Sun et al, 2012). En esta tesis el método de zig zag con contorno se utiliza debido a la fácil generación de trayectorias. Aquí es importante aclarar que la generación de la trayectoria es sólo para el desbaste. La Figura 3.17 muestra el primer ejemplo de la selección de la trayectoria de la herramienta; la estrategia es lineal zig donde la etiqueta "1" representa un área con una herramienta de diámetro de 0,2000 mm.

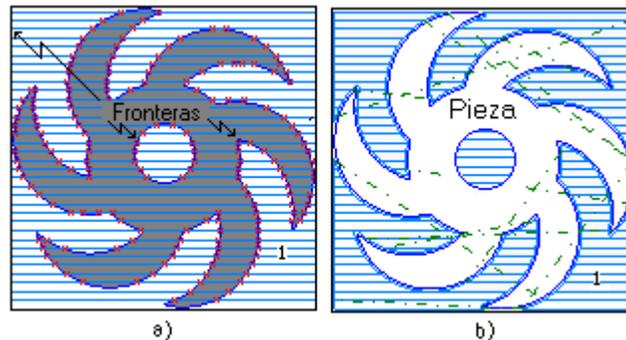


Figura 3.17. Selección de la herramienta (pieza final), a) identificación de las fronteras y b) rough fresado (zig).

La trayectoria de la herramienta es obtenida por un algoritmo (zig) de acuerdo a; un elemento estructural con la forma de la herramienta de corte con diámetro  $d$ , este se desplaza a través de toda la imagen de derecha a izquierda (primero solo el eje  $X$ ) y de abajo a arriba (eje  $Y$ ) creando trayectorias de desbaste para  $m$  total de píxeles si este se acerca al contorno de la pieza o si hay una intersección entre las herramientas de corte con la pieza o si existen residuos de píxeles; entonces, se cambia otra herramienta de corte. Si no hay intersección entre el elemento

estructural y el contorno de la pieza, entonces se considera como fragmento de la trayectoria de la pieza.

En cualquier imagen para una fija  $j$ , permite  $i$  movimientos de 0 cómo tan lejanos como  $i \in \mathbf{Tray}(i, j) \mid_n^m$  entonces este píxel es pieza del contorno y del inserto y debe volver atrás y empezar el proceso otra vez en el píxel ( $j=0, i=i+1$ ). De esta manera las trayectorias totales se obtienen por la Ecuación (38) y mostradas en la Figura 3.17, donde la Figura 3.17a describe la identificación de las fronteras y la Figura 3.17b muestra el desbaste (zig) aplicando después la selección de la herramienta correcta.

$$\sum_{j=m}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \{ \mathbf{Des}(i, j) \leftarrow \mathbf{f}(i, j); \{ \text{Si } \mathbf{f}(i, j) = \mathbf{Tray}(i, j) = 1 \text{ entonces } j = j+1 \} \} \quad (38)$$

## 4 Resultados y discusiones

La metodología presentada anteriormente es aplicada a la manufactura de tres piezas, que incluyen operaciones de desbaste en corte externo, desbaste de corte interno y una aproximación de roscas. Nueve herramientas son disponibles para maquinado de una pieza en 2D, cuatro para corte externo (derecho, izquierdo, neutro y cuchilla), cuatro para corte interno (derecho, izquierdo, neutro y cuchilla).

Con el objetivo de validar la metodología propuesta, tres diferentes piezas fueron procesadas para la seleccionar automáticamente la herramienta correcta para su maquinado en 2.5D, incluyendo operaciones de fresado como: cajas, roscas, helicoidal, extrusión, perfil, empalme, chaflán, desbaste y acabado.

### 4.1 Resultados para maquinado en 2D

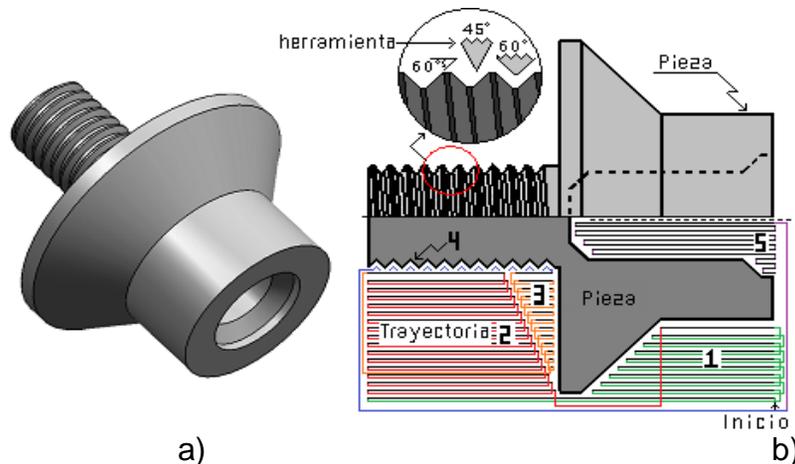


Figura 4.1. Selección de herramienta, a) pieza final, b) rosca y desbaste (zig).

El primer ejemplo es una fabricación de una pieza mecánica presentada en la Figura 4.1. La selección de la herramienta de corte es presentada en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Selección de herramienta de corte para la primera pieza.

Desbaste.		Acabado.	
Área.	Tipo.	Line.	Tipo.
1	L	1	L
2	L	2	-
3	R	3	R
4	M12_X_1.25	4	-
5	D/L	5	D/L

El segundo ejemplo es mostrado en la Figura 4.2. Los parámetros para cada herramienta de corte son presentados en la Tabla 4.2.

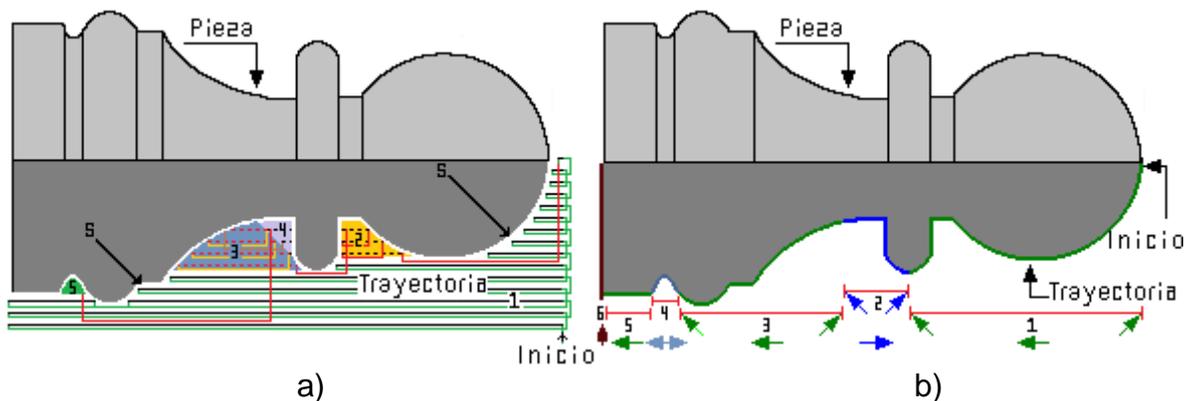


Figura 4.2. Selección de herramienta (pieza final), a) desbaste (zig) y b) acabado (zig con contorno).

La Tabla 4.2 muestra el resultado de insertos seleccionados aplicando el método propuesto

Tabla 4.2. Insertos seleccionados para la pieza de la Figura 4.2.

Desbaste del torneado.		Acabado del torneado.	
Área.	Tipo.	Line.	Tipo.
1	L	1	L
2	L	2	R
3	L	3	L
4	R	4	N
5	N	5	R
6	-	6	K

El último ejemplo se muestra en la Figura 4.4, donde se han etiquetado 5 áreas para el área las dimensiones son: diámetro mayor 17.981 mm, diámetro menor 16.332 mm, longitud 19.050 mm, pendiente 2.540 mm, ángulo 60°, M\_X\_1.5

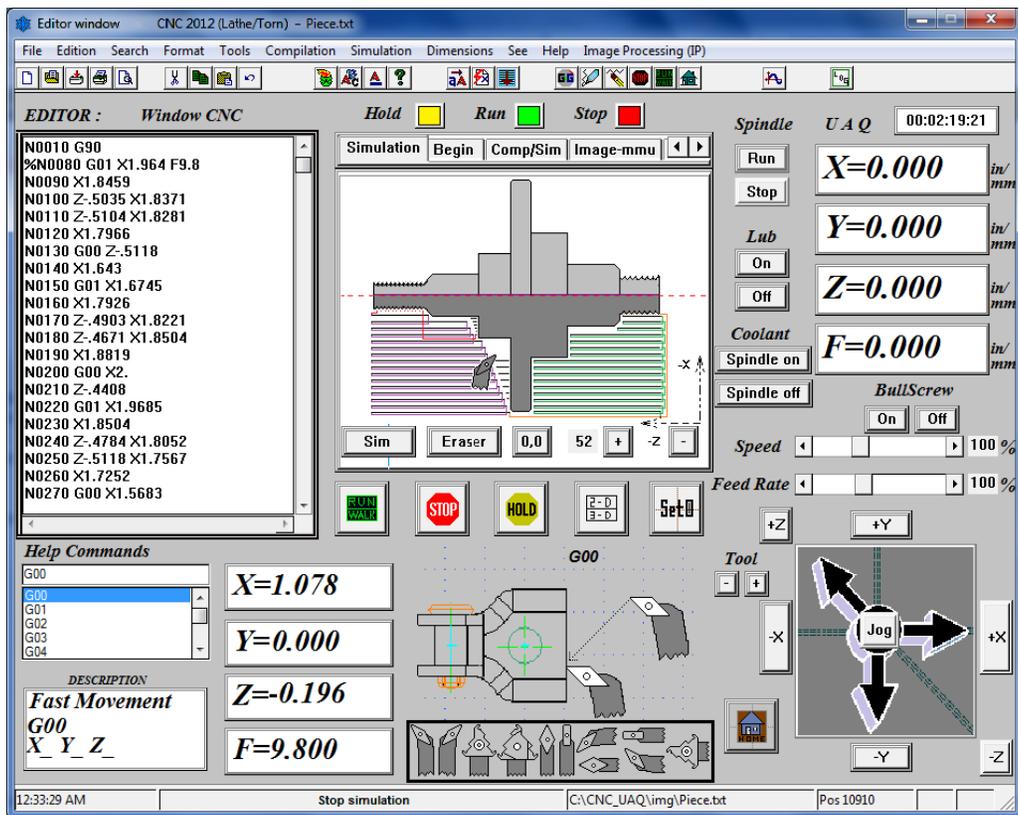


Figura 4.3. Software final para la selección de la herramienta (Maquinado 2D).

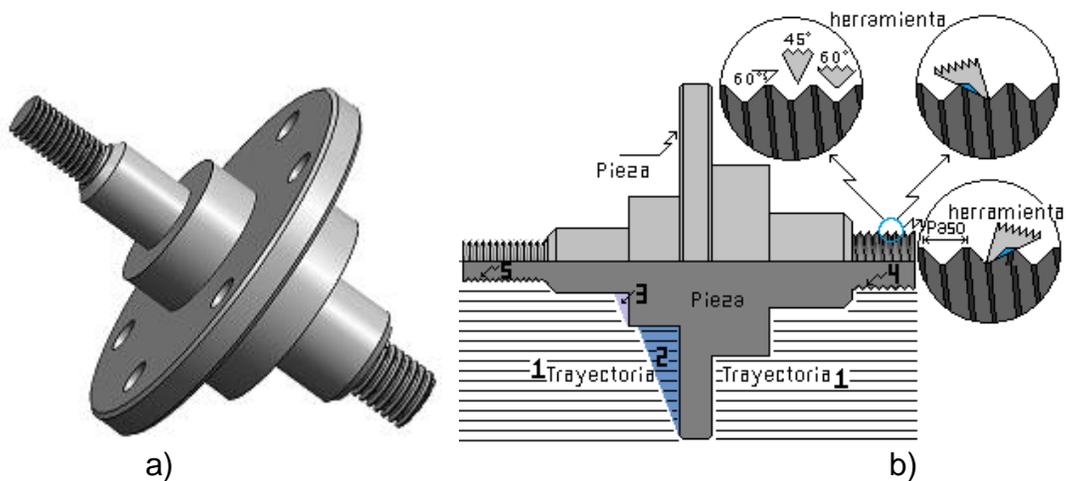


Figura 4.4. Selección de herramienta. a) Pieza final, b) Desbaste y roscado.

Para el área cinco: el diámetro mayor es de 12.70 mm, diámetro menor 10.744 mm, longitud 25.4 mm, pendiente 1.955 mm, ángulo 60°, M12\_X\_1, los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Insertos seleccionados para la pieza de la Figura 4.4.

Rough (Desbaste).		Thread (Acabado).	
Área.	Tipo.	Área.	Tipo.
1	L	4	M18_X_1.5
2	R	5	M12_X_1
3	R	-	-

La

Figura 4.3 muestra el software desarrollado. Este fue desarrollado en Microsoft Visual C++ 2010 y probado en imágenes 2D generado en cualquier software CAD y exportado a un archivo DXF.

## 4.2 Resultados para centros de maquinado

Con el objetivo de mejorar la precisión, las dimensiones obtenidas a partir de procesamiento de imágenes se comparan con los obtenidos a partir de las dimensiones del archivo DXF. Con el método propuesto, una imagen puede ser tomada directamente de una cámara fotográfica u otro dispositivo para la selección automática de la herramienta.

La Figura 4.5 muestra las cuatro etapas diferentes que generan automáticamente el método propuesto (cuatro herramientas diferentes fueron seleccionadas) para obtener la primera pieza de una caja en zig-zag con contorno. La dilatación es utilizada en esta pieza, porque la superficie para eliminar es externa a la geometría deseada.

Tabla 4.4. Selección de la herramienta de corte para el primer ejemplo (fresado).

Desbaste			Acabado
Área	Tipo	D (mm)	D(mm)
1	B	-	0.0157
2	C	0.1500	-
3	C	0.3499	-
4	CB	0.3999	-

En la Tabla 4.4, los parámetros de herramienta de corte seleccionado por el método propuesto pueden verse.

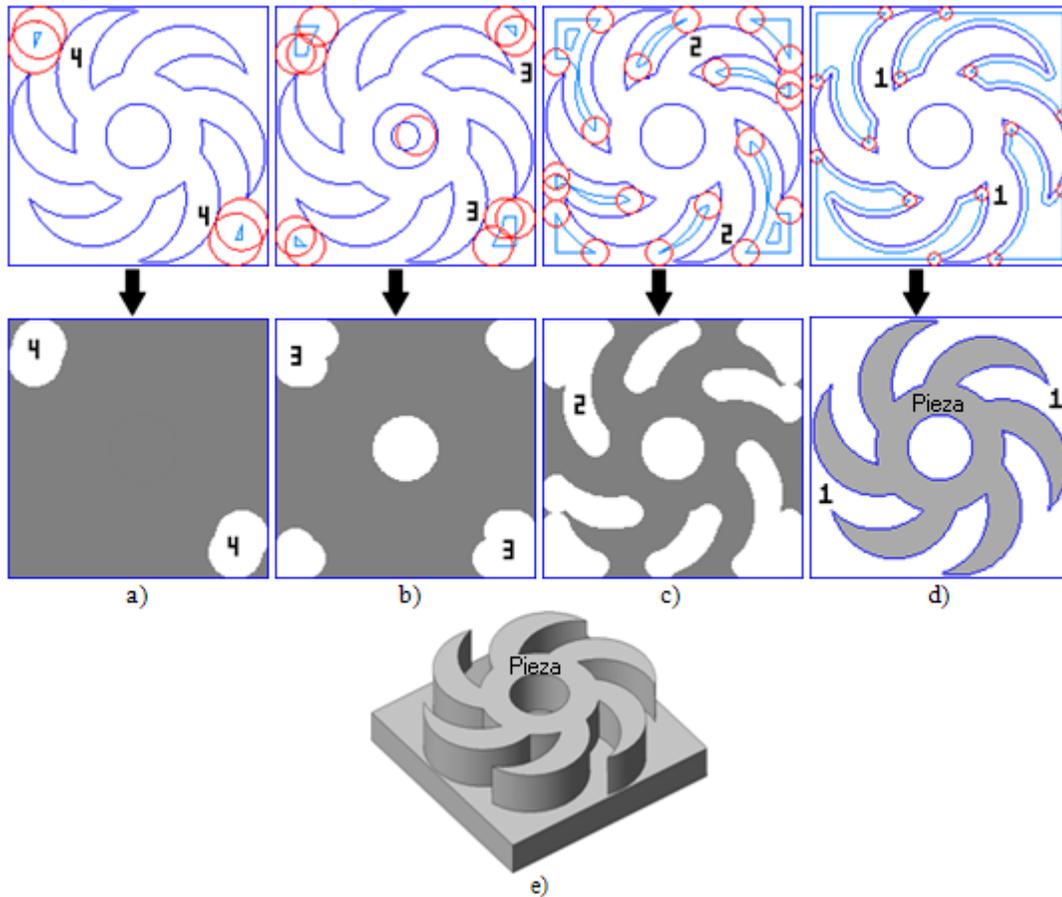


Figura 4.5. Selección de la herramienta de corte para la primera pieza basada en residuos de pixeles.

La Figura 4.5a representa un contorno de la pieza a maquinar y su respectiva aproximación de maquinado mediante el uso de una herramienta de CB cuya área de trabajo está marcado con la etiqueta "4". La Figura 4.5b muestran el contorno y una aproximación de maquinado con una herramienta de C, el área de mecanizado está marcado con la etiqueta "3". Después, en la Figura 4.5c, el área de maquinado (marcado con "2") puede ser visto. De la misma manera, la pieza finalmente maquinada con una herramienta de B se muestra en la Figura 4.5d. La Figura 4.5e representa la pieza final, de espacio de trabajo obtenido.

La segunda pieza se muestra en la Figura 4.6. En este caso, la pieza es maquinada usando zig-zag con contorno y fronteras. Una operación de erosión, para seleccionar automáticamente la herramienta, es aplicada debido a la superficie para eliminar píxeles internos por la geometría deseada. Los tres contornos y

aproximaciones de maquinado con diferentes herramientas marcadas con etiquetas "3", "2" y "1" se describen en la Figura 4.6a, Figura 4.6b y Figura 4.6c, respectivamente. Por último la Figura 4.6d representa la pieza maquinada.

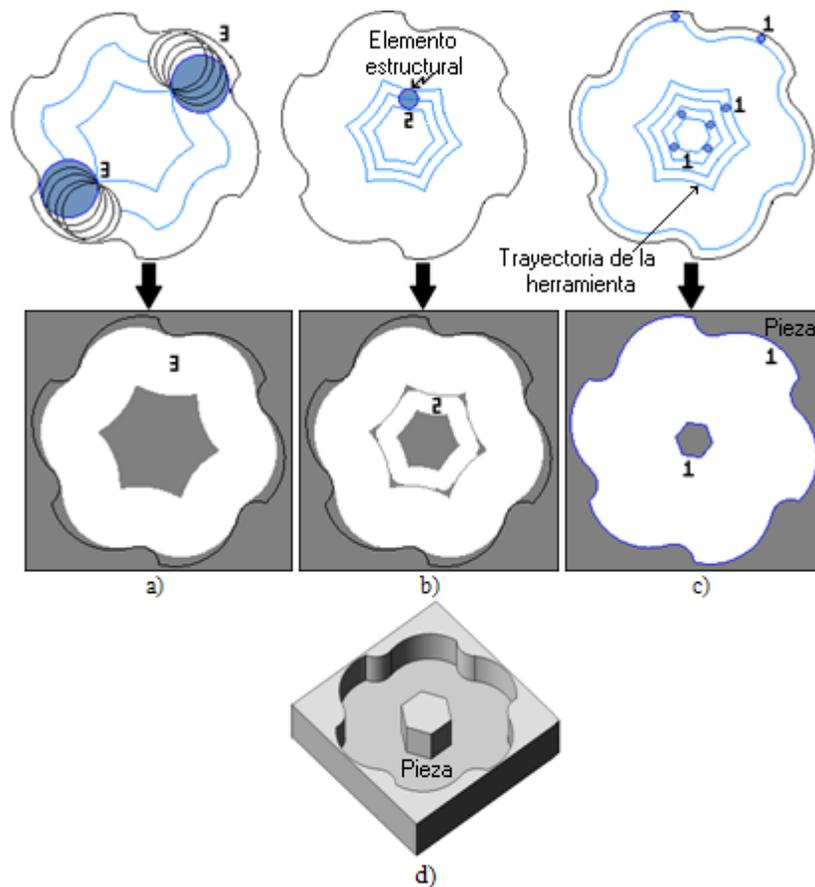


Figura 4.6. Selección de la herramienta para la segunda pieza usando zig-zag con contorno.

Tabla 4.5. Selección de la herramienta para el Segundo ejemplo (fresado)

Área	Desbaste		Acabado
	Tipo	D (mm)	D(mm)
1	B	-	0.0157
2	C	0.2000	-
3	C	0.3999	-

La Tabla 4.5 muestra los parámetros de las tres diferentes herramientas seleccionadas por el método.

Finalmente, la Figura 4.7 describe el tercer ejemplo, maquinado con herramienta de desbaste usando zig con contorno. Para la selección automática de la herramienta, la erosión se utiliza de acuerdo con la geometría de la pieza.

Tabla 4.6. Selección de la herramienta de corte para el tercer ejemplo (fresado)

Área	Desbaste		Acabado
	Tipo	D(mm)	D(mm)
1	B	-	0.0157
2	C	0.0499	-
3	C	0.1500	-
4	D	0.5999	-

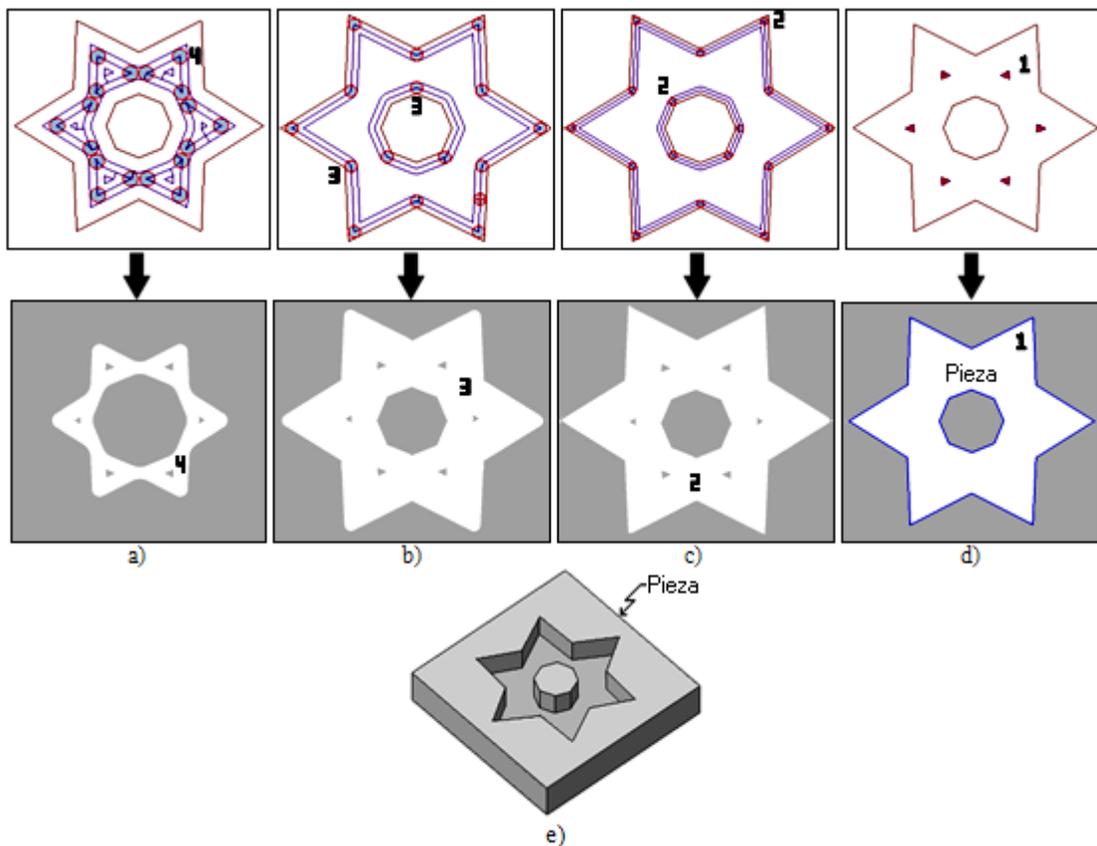


Figura 4.7. Selección de la herramienta para la tercera pieza (rough mill usando zig con contorno).

En la Tabla 4.6 se muestra el rough en fresado usando herramientas de C y D en las áreas marcadas con etiquetas de "2", "3" y "4", respectivamente. El acabado en fresado usa una herramienta de B con área marcada como "1". El desbaste de fresado se realiza en la Figura 4.7a, Figura 4.7b, Figura 4.7c con respectivas

selección de herramientas. La Figura 4.7d muestra el acabado de fresado y la Figura 4.7e la pieza final.

El software desarrollado se muestra en la Figura 4.8. Fue desarrollado en Microsoft Visual C++ 2010 y probado con imágenes 2D y 2.5D generados en software CAD y exportados a archivos DXF.

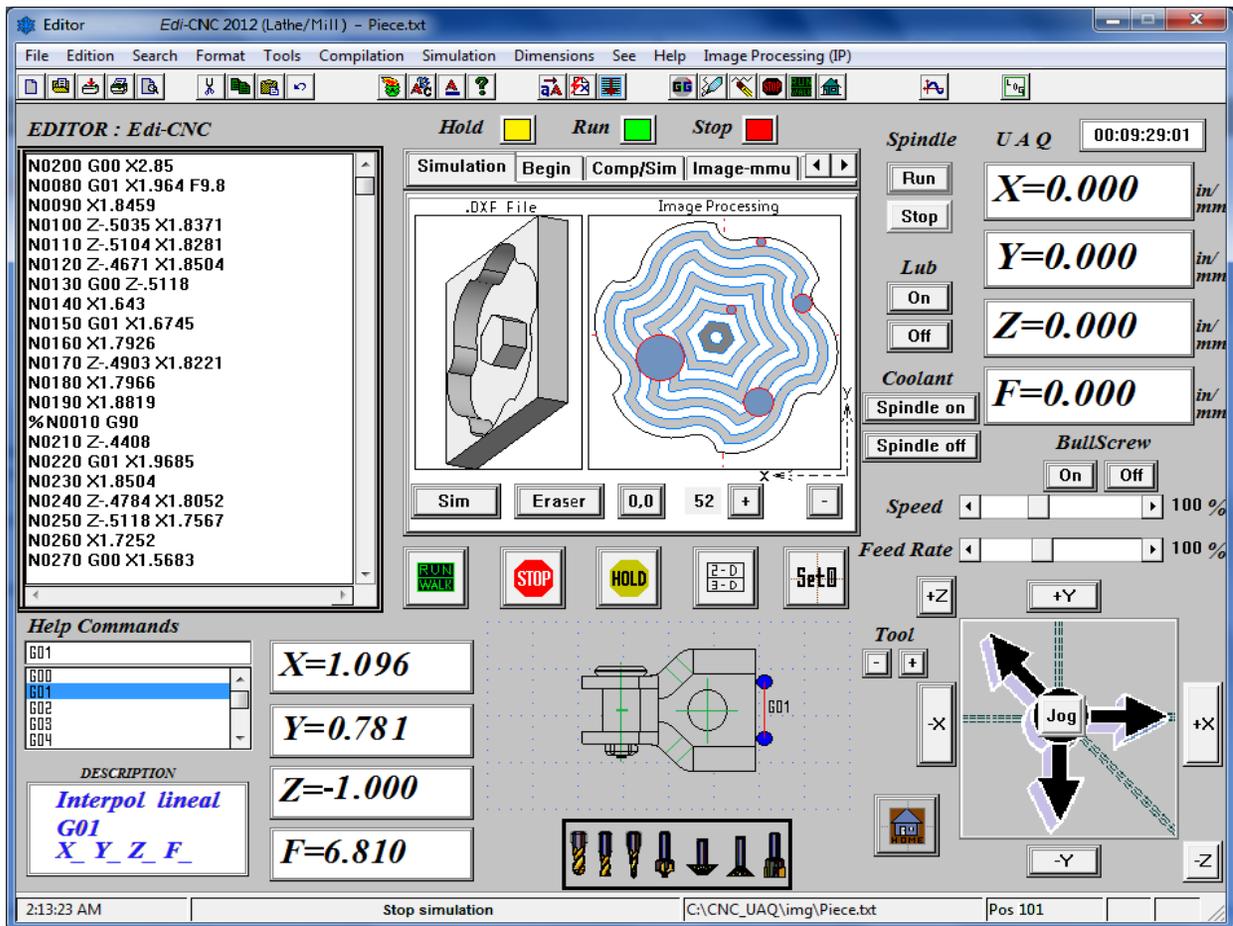


Figura 4.8. Software final para la selección de la herramienta de corte (maquinado en 2.5D).

### 5 Conclusiones, Prospectivas y Referencias

La presente tesis desarrolla un nuevo método para la selección automática de la herramienta de corte utilizando técnicas de procesamiento de imágenes para máquinas torno de control numérico computarizado. La principal contribución de este trabajo es el uso de procesamiento de imágenes generando un nuevo método para la selección automática de la herramienta de corte, cuando el campo direccional preferencial es detectado en la frontera de la pieza en la imagen y crea una dirección de campo a través de gradiente direccional. La experimentación muestra que el método propuesto trabaja con una resolución de 1.1 micrómetros y tiene buen rendimiento a la hora de la selección automática de la herramienta. La aplicación del método propuesto en esta investigación, reduce la utilización de complejos algoritmos matemáticos, muestra una forma sencilla para simular la selección de la herramienta de corte y puede ser adecuado para otros procesos de maquinado. La resolución de este sistema está determinado aproximadamente 1.1. Además, una transformación de mayor resolución de archivo DXF a BMP puede ser utilizado para mejorar tanto la resolución y la precisión de este sistema. El sistema está diseñado para integrarse dentro de un sistema CAD / CAM y poder ser utilizado en otras aplicaciones.

Dentro de las prospectivas de esta investigación está el usar esta plataforma desarrollada para poder implementar la optimización usando Algoritmos Genéticos, terminar con el tercer artículo titulado “Triangulation intersection approach from Poisson’s equation applied to the automatic selection of the tool CNC mill-turn” desarrollado para seleccionar la herramienta en procesos de fresado y torneado desde dos ejes hasta cinco ejes usando ecuaciones de Poisson basado en la intersección triangular y la optimización.

## 5.1 Referencias

- Astakhov V P. Geometry of single-point turning tools and drills. Fundamentals and practical applications. Springer series in advanced manufacturing. 2010, 1st ed, pp 1-565.
- Balic, Joze. Kovacic, Miha and Vaupotic, Bostjan. September, 2005. Intelligent Programming of CNC Turning Operations using Genetic Algorithm. Springerlink, Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Barone S, Berghini M and Bertini L. Grid pattern for in-plane strain measurements by digital image processing. Proc IMechE, Part B: The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2001; 36: 51-59.
- Bouaziz, Z. Zghal, A. January 2008. Optimization and selection of cutters for 3D pocket machining. Routledge, International Journal of Computer Integrated Manufacturing. Volume 21. Issue 1. Pages 73 – 88.
- Carpenter I D and Maropoulos P G. Automatic tool selection for milling operation Part 2: tool sorting and variety reduction. Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture. 2000; 214: 283-292.
- Chen T-H, Chang W-T, Shen P-H and Tarng Y-S. Examining the profile accuracy of grinding wheels used for microdrill fluting by an image-based contour matching method. Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture. 2010; 224: 899-911.
- Chun Fong You, Bor Tyng Sheen y Tzu-Kuan Lin., 2007, Selecting optimal tools for arbitrarily shaped pockets, Int J Adv Manuf Technol, 32, 132–138.
- Chung C and Peng Q. The selection of tools and machines on web-based manufacturing environments. Int J Mach Tools Mf. 2004; 44: 317–326.
- Dominguez-Gonzalez Aurelio. June, 2004. Design optimization and vibration control of adaptive structures. Thesis Doctoral of Philosophy at Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
- Edalew K O, Abdalla H S y Nash R J, A computer-based intelligent system for automatic tool selection, Materials and Design, 337-351.
- Eladawi A E, Gadelmawla E S, Elewa I M and Abdel-Shafy A. A. An application of computer vision for programming computer numerical control machines. Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture. 2003; 217: 1315-1324.

- Fan Hui-Yuan and Lampinen Jouni. 2003. A Trigonometric Mutation Operation to Differential Evolution. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, Journal of Global
- Gadelmawla E S, Eladawi A E, Abouelatta OB and Elewa I M. Application of computer vision for the prediction of cutting conditions in milling operations. Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture. 2009; 223: 791-800.
- Gibbs and Associates, a Cimatron company 2.5D Solids GibbsCAM 2009. April 2009, rev. 1.2. Available from <http://www.wilyguy.net/portfolio/pdfs/docs/2.5D%20Solids.pdf>.
- Hemant Ramaswami, Raj Shankar Shaw and Sam Anand. Selection of optimal set of cutting tools for machining of polygonal pockets with islands. Int J Adv Manuf Technol. 2011; 53: 963–977.
- Jing Li, Peikang Huang, Xiaohu Wang y Xudong Pan., 2009, Image edge detection based on beamlet transform, Journal of Systems Engineering and Electronics, 1–5.
- Kekre H B, Thepade S, Mukherjee P, Kakaiya M, Wadhwa S, Singh S. Image retrieval with shape features extracted using gradient operators and slope magnitude technique with BTC. Int J Computer Applic. 2010; 6: 28-33.
- Kindratenko V. Development and application of image analysis techniques for identification and classification of microscopic particles. PhD Thesis, University of Antwerp, Belgium, 1997, pp.1–6.
- Lampinen, J. (2000). A bibliography of differential evolution algorithm, Technical Report. Lappeenranta University of Technology, Department of Information Technology, Laboratory of Information Processing.
- Leu Ming C y Joshi Akul, UNIGRAPHICS-NX5., 2011, Department of Mechanicals and Aerospace Engineering, University of Missouri, Rolla, Missouri 65409, available from [http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5\\_tutorial.pdf](http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5_tutorial.pdf).
- Li Jing, Huang Peikang, Wang Xiaohu and Pan Xudong. Image edge detection based on beamlet transform. J Systems Engng Electronics. 2009; 20: 1–5.
- Lim T, Corney J, Ritchie J M and Clark D E R. Int. Optimizing tool selection. j. prod. Res. 2001; 39:1239- 1256.
- Loncaric S. A survey of shape analysis techniques. Pattern Recognition. 1998; 31: 983–1001.

- Mallik-Goswami Bithika and Asit K Datta. Detecting Defects in Fabric with Laser-Based Morphological Image Processing. *Textile Res. J.* 2000; 70: 758-762.
- Mejia-Ugalde M, Dominguez-Gonzalez A, Trejo-Hernandez M, Morales-Hernandez L A and Benitez-Rangel J P. New approach for automatic tool selection in computer numerically controlled lathe by applying image processing. *Proc IMech Part B. J Engineering Manufacture.* 2012; 226: 1298-1308.
- Mekid S, Pruschek P, Hernandez J. Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines. *Mechanism and Machine Theory.* 2009; 44: 466–476.
- Ming LC and Akul J. UNIGRAPHICS-NX5, Department of Mechanicals and Aerospace Engineering, University of Missouri, Rolla, Missouri 65409. Available from [http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5\\_tutorial.pdf](http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5_tutorial.pdf) (accessed 25 November 2011).
- Morales-Velazquez L, Romero-Troncoso R J, Osornio-Rios R A, Herrera-Ruiz G and Cabal-Yeppez E. Open-architecture system based on a reconfigurable hardware–software multi-agent platform for CNC machines. *Journal of Systems Architecture.* 2010; 56: 407-418.
- Oral Ali y Cakir Cemal M., 2004, Automated cutting tool selection and cutting tool sequence optimization for rotational parts, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 127-141.
- Osornio-Rios R A, Romero-Troncoso R J, Herrera-Ruiz G and Castañeda-Miranda R. Computationally efficient parametric analysis of discrete-time polynomial based acceleration–deceleration profile generation for industrial robotics and CNC machinery. *Mechatronics Elsevier.* 2007; 17: 511-523.
- Ponce-C Julio, Padilla Felipe, Padilla Alejandro y Meza-A Miguel. 2008. ACHPM: Algoritmo de optimización con Colonia de Hormigas para el Problema de la Mochila. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, artículo de congreso.
- Rodriguez-Donate C, Romero-Troncoso R J, Garcia-Perez A, Razo-Montes D A. FPGA based embedded system for induction motor failure monitoring at the start-up transient vibrations with wavelets. *Proceedings of the IEEE 3rd International Symposium on Industrial Embedded Systems SIES.* 2008; 208– 214.

- Saravanan, R. Sankar, R, Siva. Asokan, P. Vijayakumar, K. Prabhakaran, G. 2 March 2005. Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. Springer-Verlag. *Int J Adv Manuf Technol* (2005) pages. 26, 30–40.
- Sarma P M M S, Karunamoorthy L and Palanikumar K. Surface roughness parameters evaluation in machining GFRP composites by PCD tool using digital image processing. *J Reinforced Plastics and Composites*. 2009; 28: 1567-1585.
- Sharan R V y Onwubolu G C., 2011, Measurement of end-milling burr using image processing techniques, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225, 448.
- Siller H R, Vila C, Rodriguez C A and Abellan J V. Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools. *Int J Adv Manuf Technol*. 2009; 40: 12–25.
- Smid P. *CNC programming handbook*. 2nd ed. 2003, pp1, 304.
- Storn, R. y Price, K. (1997). DE-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space. *Journal of Global Optimization*. Pages 11(4), 341–359.
- Sun Yuwen, Ren Fei, Zhu Xinghua and Guo Dongming. Contour-parallel offset machining for trimmed surfaces based on conformal mapping with free boundary. *Int J Advd Mfg Technol*. 2012; 60: 261-271.
- Sutheebanjard Phaisarn y Premchaiswadi Wichian., 2011, Efficient scan mask techniques for connected components labeling algorithm, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 1,14.
- Thanapandi, C. Walairacht, M. Ohara, S. 18 April 2006. Multi-component genetic algorithm for generating best bending sequence and tool selection in sheet metal parts. *Robotics and Automation*. IEEE Xplore Digital Library. Volume 1. Pages 830-835.
- Tufoi M, Vela I, Marta C, Amariei D, Tuta A I and Mituletu C. Optimization of withdrawing cylinder at vertical continuous casting of steel using CAD and CAE. *Int J Mech*. 2011; 5: 10-18.
- Tunák Maros, Bajzík Vladimír and Testik Murat Caner. Monitoring chenille yarn defects using image processing with control charts. *Textile Research Journal*. 2011; 81: 1344–1353.

- Udhayakumar, P and Kumanan, S. 24 March 2010. Sequencing and scheduling of job and tool in a flexible manufacturing system using ant colony optimization algorithm. Springer-Verlag. *Int J Adv Manuf Technol* (2010) 50:1075–1084.
- Villalba Fernández de Castro Germán y Saldarriaga Juan Guillermo. 31 de octubre de 2005. Algoritmos de Optimización Combinatoria (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable., Universidad de los Andes, artículo de congreso.
- Vosniakos, G, C. and Krimpenis, A. 2002. Optimization of Multiple Tool CNC Rough Machining of a Hemisphere as a Genetic Algorithm Paradigm Application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Page 20, 727-734.
- Zaryab Ahmad, Keyvan Rahmani and Roshan M D'Souza. Applications of genetic algorithms in process planning: tool sequence selection for 2.5-axis pocket machining. *J Intell Manuf*. 2010; 21:461–470.
- Zhao Y, Ridgway K and Al-Ahmari AMA. Integration of CAD and a cutting tool selection system. *Computer Ind Engng*. 2002; 42: 17–34.

## 6 Anexo 1 Artículos publicados en revistas indizadas y arbitradas

Original Article

Institution of  
**MECHANICAL  
ENGINEERS**



### New approach for automatic tool selection in computer numerically controlled lathe by applying image processing

Proc IMechE Part B:  
J Engineering Manufacture  
226(8) 1298–1308  
© IMechE 2012  
Reprints and permissions:  
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav  
DOI: 10.1177/0954405412448346  
pib.sagepub.com  
SAGE

**Mario Mejia-Ugalde, Aurelio Dominguez-Gonzalez, Miguel Trejo-Hernandez, Luis A Morales-Hernandez and Juan P Benitez-Rangel**

#### Abstract

Tool selection is a very important step in manufacturing processes so as to improve productivity with high quality. The contribution of this work is the development of a new method for automatic tool selection in computer numerical control lathe machines, based on image processing techniques and information of the boundary of the piece, provided by either a .DXF file (drawing exchange format) or from an image taken with other devices. The proposed method detects the preferential direction in the boundary of the piece and creates a directional field through a directional gradient aiming at selecting the correct tool. Results from experiments show that the method makes it possible to work with a resolution of 1.1 micrometers, and to obtain good performance in automatic tool selection when several types of two-dimensional parts in the image are processed.

#### Keywords

Gradient, automatic tool selection, image processing

Date received: 29 January 2012; accepted: 24 April 2012

#### Introduction

Nowadays, a wide variety of complex geometrical shapes are made through a computer numerically controlled (CNC) lathe. There are numerous variables that affect the turning process, like material piece selection, cutting conditions, tool materials, tool sequence, cutting fluids and tool selection. A lot of investigation exists about the first topics; however, tool selection based on the shape has not been widely studied. At present, the commercial computer-aided manufacturing (CAM) software transfers this task to the worker who does it based on their own experience, ability and knowledge. Owing to the above an automatic technique that selects a tool based on the shape is particularly acceptable.

Some methods have been developed for automatic tool selection in turning or milling processes, such as that presented by Bouaziz and Zghal,<sup>1</sup> in which an optimization algorithm based on analytical models proposed a three-dimensional (3D) pockets machine obtaining good results only for prismatic pockets. Or

that proposed by Ramaswami et al.,<sup>2</sup> who used dynamic programming to determine the optimal set of tools, only to machine polygonal pockets. In the same way, You et al.<sup>3</sup> present a technique for arbitrarily shaped pockets. They used an upper bound procedure to choose the optimal tools for pocket milling.

In the case of tool selection and tool sequence problems in lathe machines, Oral and Cemal<sup>4</sup> presented a method that uses extensive rules base on feature information composed of years of heuristic knowledge. Edalew et al.<sup>5</sup> developed a hybrid approach based on mathematical and heuristic knowledge data modules to select the best set of cutting tools, optimal cutting parameters and machining time/cost, however, it needs a

Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty, San Juan of Rio, Queretaro, Mexico

#### Corresponding author:

Aurelio Dominguez-Gonzalez, Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty, San Juan of Rio, Queretaro, Mexico.  
Email: auredgz@uaq.mx

priori knowledge. Chung and Peng<sup>6</sup> use recognition characteristics of the piece shape contained in a .DXF format to select a proper operation and they use a dynamic SQL and investigation criteria to select the tool from the database.

On the other hand, image processing has been widely used in applications where studies from the cutting condition effects roughness in a single turning process according to Sarma et al.,<sup>7</sup> the prediction of cutting conditions in milling operations by Gadelmawla et al.<sup>8</sup> and path generation in milling CNC machines<sup>9</sup> are included.

The above mentioned research information presents certain disadvantages in tool selection, such as application of technology to specific parts, extensive rules for selection conditions, years of heuristic knowledge and use of criteria to select the tool; therefore, it is necessary to do research to satisfy all these aspects. The most remarkable advantage of the developed system is that the proposed method reduces the complex mathematical algorithms utilization and shows an easy way to simulate the cutting tool selection, in the same way, it eliminates the designer subjective decisions, reduces tool selection mistakes, makes the selection process and design faster and it is easy to use and does not require a priori knowledge.

This research presents a new technique based on image processing for automatic tool selection on a CNC lathe machine, in turning operations, such as external (longitudinal turning, transverse turning, grooving, chamfering, tapers, threading and profile turning) and internal (longitudinal turning, transverse turning, grooving, chamfering, tapers, threading and profile turning). The novel proposed method starts recognizing from a .DXF file. Then, a linear transformation is applied to a gray-scale image into a two-dimensional (2D) binary image. After the segmentation operation and the directional morphology is implemented to determine the position and direction absolute and relative reference frame for each edge of the pixel, the tool selection is achieved when a structural element, which has the shape of the cutting tool, is applied to each pixel located in the boundary. Also the zig and zig-zag trajectories are obtained with the same structural element and they are displayed in standard CNC code.

## Background

### Cutting tool

The automatic tool selection plays an important role to reduce machining time, errors, human interaction, costs and better product quality. Tool geometry selection is a complex task; however, the wide use of CNC machines in the industry justifies developing a methodology for this process. The development of cutting inserts of a diamond shape for a CNC lathe is varied (tool cutting edge angle greater than 90°). The development of 80°, 70° and 35° diamond-shaped cutting inserts, combined with various tool holders, made it possible to obtain a wide range of such tools. The most common external

tools with 80° of diamond shapes are CNGG, CNGA, CNMA, CNMG, CNMP (ANSI standard nomenclature, insert form C = 80°, clearance angle N = 0°, tolerance G = ±0.05, insert type A); and diamond shaped internal inserts are SCLCR/L, SDUCR/L, SDQCR/L, SD-CR/L, SSSCR/L (holding method S = screw, shape C = 80°, lead angle L = 5°, clearance C = 7°, hand of bar r = regular/insert name L = left). The cutting tool is also named ID-Diameter-L/R for the internal tool and OD-Diameter-L/R for the external tool.<sup>10,11</sup> In this research, data handbooks and catalogs of tool manufacturers were used to select the proper tool for turning operations.

### Image processing techniques

**Image acquisition.** The common acquisition format of an object 3D image is: .DXF file, .IGES file, .STEP file, ParaSolid file, .CGM file, .STL file, CATIA file and HEAL GEOMETRY file. In this article the format .DXF is used owing to the ease and low cost in terms of computational work. Tufoi et al.<sup>12</sup> define the .DXF file format as information in an ASCII text file with .dxf extension. Chung and Peng<sup>6</sup> show the organization section of a .DXF file as: *Begin of file*, *Header* (this section contains general information about the drawing), *Tables* (contains definitions of named items), *Blocks* (describe the entities that make up each block in the drawing), *Entities* (this section contains the drawing entities), *End of file*.

**Binary image.** Between the methods more common to transforming a gray-scale image into a 2D binary image, are the thresholding, fixed thresholding, histogram-derived threshold, iso-data algorithm, background symmetry algorithm and triangular algorithm.<sup>9</sup> Thresholding is the most applied method to convert a gray-scale image  $f(i, k)$  into a 2D binary image  $f^b(i, k)$ . All pixels of the image are conditioned here; if the intensity in gray scale of a pixel in the image is less than 128, this pixel is labeled with zero ( $f^b(i, k) = 0$ ), otherwise with one ( $f^b(i, k) = 1$ ).

**Edge detection.** Edge is very important for image analysis and widely used for acquisition, registration, identification, segmentation and compression of object in the scene.<sup>13</sup> Some of the gradient operators used for edge extraction are: Sobel, Prewitt, Roberts, Canny, Zero-crossing and Beamlet transform.<sup>14</sup> The Sobel method is based on the first derivative and convolution of the image, called gradient operator, which includes a filter in the horizontal and vertical direction based over a mask. In this article the Sobel operator is used because of the low sensitivity to noise and low cost in terms of computational work.

**Labeling of edge and components.** To find connected components that form a region (edge) that represents an object in 2D binary images, there are several methods

for labeling parts in images; recursive algorithm, sequential algorithm or that proposed by Sutheebanjard and Premchaiswadi<sup>15</sup> who used two new scan masks to connected labeled components. In this article, the method of sequential algorithm and scan mask are more commonly applied and used. The method consists of displacing a mask (of  $4 \times 4$  pixels) through all pixels, saving the part edge trajectory.

### Computer-aided design/manufacturing/engineering

Any computer software package that uses graphics and applications to facilitate engineering tasks in the design process can be categorized as computer-aided design (CAD) software. A system that plans, manages and controls the manufacturing operations through computer interface can be defined as CAM; and a system that analyzes the functions of a CAD drawing, allowing the user to simulate and study the way this will behave, can be classified as computer-aided engineering (CAE). The real development of CAD/CAM systems started in the 1950s and it was known as the era of the development of automatically programmed tools (APT) by General Motors. The 1960s was the period for interactive computer graphics. The 1970s was called the golden era for computer drafting and initial graphics exchange specification (.IGES) was initiated. In the 1980s and 1990s, new theories and algorithms evolved and integration of various elements of design and manufacturing were developed (CAE). Today the major research and development focus was to expand CAD/CAM/CAE systems beyond three-dimensional geometric designs and provide more engineering applications.<sup>11,12,16</sup>

An example of application of image processing in manufacture is the work published by Chen et al.,<sup>17</sup> where an image-based method for examining the profile accuracy of grinding wheels is used for micro-drill fluting. For measuring the height of the end-milling burr on the edge of a workpiece using techniques of image processing is another example that provides a new strategy to this methodology.<sup>18</sup>

### Methodology

The use of image processing to solve manufacturing problems is a new technique in literature. In this article, eight steps to get the selection tool using image processing are proposed. In this way; the original design is taken from a CAD (wire-frame model) as a .DXF file. Then a method of data extraction<sup>6</sup> is applied to generate the image to find the equivalence between pixels and millimeters. After, different transformations using image processing, such as labeling to define the part of the image, the gradient to find the slope and edge to detect the position of the gradient vector is applied.

A structural element with the shape of the cutting tool, with angle  $\mu$ , length  $\varsigma$  and nose angle  $\beta$ , is displaced through all of the image from right to left

and from bottom to top creating roughing paths for  $m$  total of pixels.

Figure 1 shows two conditions, if the angle of the cutting tool ( $\angle T_h$ ) is not inside the range of the permissible angle of the contour ( $\angle \phi$ ) or there is an intersection between the cutting tool with the part, then another cutting tool is changed. If there is no intersection between the structural element and the edge of the part, then it is considered as part of the path. The detailed steps are as follows.

#### Step 1. Acquisition of .DXF file

The original design (Figure 2(a)) is obtained from CAD, then the upper profile model is converted to a DXF file.<sup>19</sup> This file contains general information about the drawing, definitions of items, and the entities that make up each block are shown in Figure 2(b).

#### Step 2. File transformation

A precision analysis, before and after applying image processing techniques, to find the most appropriate resolution according to the dimensions of the parts to be machined (maximum test pattern used 50.800 mm) and cutting tools (pattern maximum test used 19.049 mm), are shown in the Table 1. The calibration value is also the resolution of this system and it is approximately  $1.1 \mu\text{m}$ .

A method of data extraction<sup>6,19</sup> is applied to convert .DXF file to a .BMP file, obtaining Figure 3(a) and (b). The same distance is then automatically determined in pixels in the image and a calibration value is obtained by dividing the distance in millimeters by the distance in pixels to obtain a relation of millimeters per pixel

$$\text{Relation} = \frac{\text{distance}_{\text{mm}}}{\text{distance}_{\text{pixel}}} \quad (1)$$

All the dimensions are known in the .DXF file. In order to find the directional gradient of the edge, image processing is applied.

#### Step 3. Transformations to binary image

The space of a characteristic of an image ( $\mathbf{f}$ ) is divided in  $\tau$  regions. These regions make a regularly spaced mesh in hypercube form generating a density of population of equal size called  $\lambda^\tau$  that is represented by

$$\lambda^\tau \subset \mathbf{f} \Rightarrow \bigcup_{\tau=1}^{m-1} (\lambda^\tau = \mathbf{f})$$

and also  $(\lambda^\tau \cap \lambda^{\tau'}) = \phi, \forall \tau \neq \tau'$ , where  $m$  are the pixels totals of image,  $\tau$  and  $\tau'$  the region of image and complement, respectively. After starting with the image that is shown in Figure 3(b), a transformation (thresholding) is applied to convert the image of gray scale to binary using

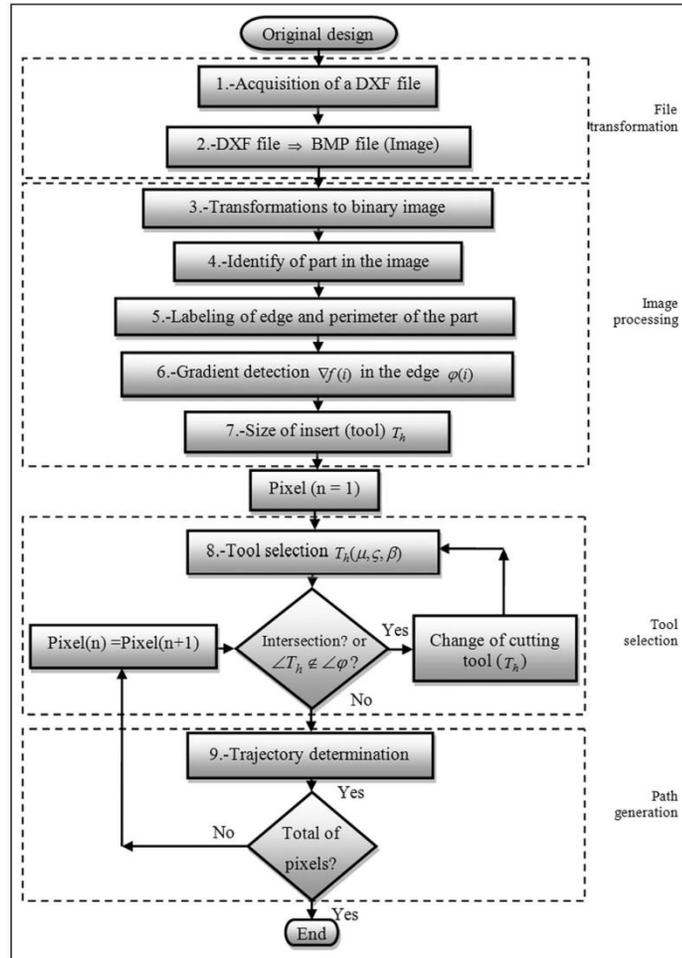


Figure 1. General diagram of the automatic cutting tool selection.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \{if \mathbf{f}(i, k) > 128 \text{ then } \mathbf{f}^B(i, k) = 1 \text{ else } \mathbf{f}^B(i, k) = 0\} \quad (2)$$

where  $\mathbf{f}(i, k)|_n^m$  is the image in gray scale (image matrix of  $n \times m$  pixels), and  $\mathbf{f}^B(i, k)|_n^m$  is the result of the gray transformation to binary.

**Step 4. Part identification**

The following step is the binary label, or limitation, of the part  $\mathbf{e}(i, k)|_n^m$  (Figure 4(a)) (equation 3). This can be an image  $\mathbf{f}_e \subseteq \mathbf{f}(i, k)|_n^m$  white and black in the binary space  $\mathbf{f}^B$  where

$$\mathbf{e} = \bigcup_k \{ \forall \mathbf{f}_k \in \mathbf{f}^B | (\text{if } \mathbf{f}_k = 0 \text{ then } x_k = 0) \vee (\text{if } \mathbf{f}_k = 1 \text{ then } x_k = 1) \} \quad (3)$$

or also written as

$$\sum_{k=\frac{m}{2}}^m \sum_{i=0}^n \{ \mathbf{e}(i, k) = [\text{if } \mathbf{f}(i, k) = 1 \text{ then } \mathbf{f}_e(i, k) = 1] \cup [\text{if } \mathbf{f}(i, k) = 0 \text{ then } \mathbf{f}_e(i, k) = 0] \} \quad (4)$$

where  $\mathbf{f}_e(i, k)|_n^m$  is the labeling image saved in the image of exit  $\mathbf{e}(i, k)|_n^m$  of equation (4), taking half of the image  $k = \frac{m}{2}$  on the  $z$  axis. The directional classification of

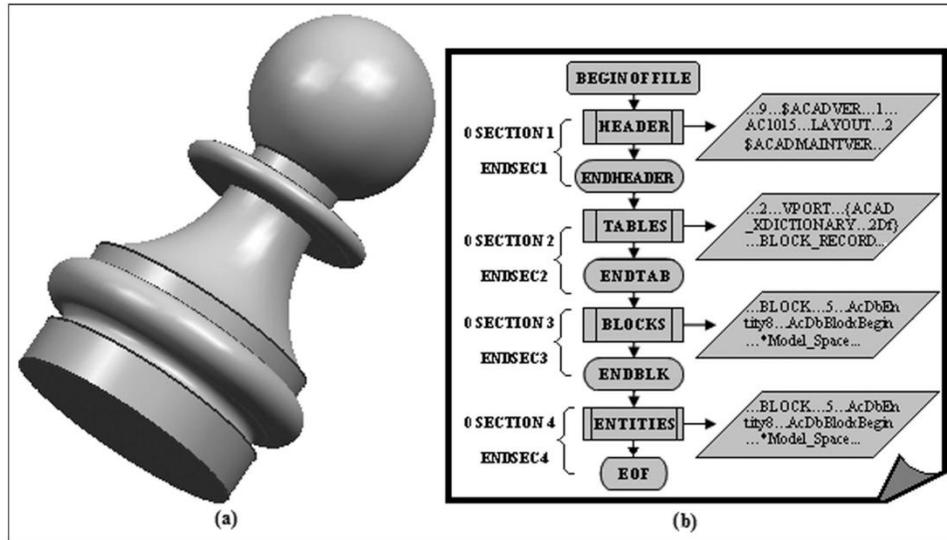


Figure 2. Originals file: (a) design from CAD; (b) .DXF file.

Table 1. The resolution of this system.

Resolution	Scale	mm	Length (pixels)	Height (pixels)
800 × 600	4:3	1	15	11
3200 × 2048	25:16	1	62	40
5120 × 4096	5:4	1	100	80
7680 × 4800	16:10	1	151	94
10,000 × 10,000	1:1	1	196	196
50,800 × 50,800	1:1	1	1000	1000

the edge for half of the image in the point  $p(x, z)$  is presented in Figure 3(b).

Step 5. Labeling edge and perimeter

The perimeter ( $\hat{P}(\theta)$ ) can be obtained from the edge ( $|\nabla f|$ ) of the image ( $f(i, k) |^m_n$ ) (Kindratenko<sup>20</sup>) by

$$\hat{P}(\theta) = 2 \int_{z_0}^{z_1} \sqrt{1 + \hat{q}'} dz = \int_0^{2\pi} \sqrt{\hat{r}_0^2 + \hat{r}'_0^2} d\theta \quad (5)$$

where the vector  $\hat{q}'(i, k)$ , is the first derive of the image in  $f(i, k)$ ,  $\hat{r}_0(i)$  and  $\hat{r}'_0(k)$  are the radius and length vectors of point  $p(i, k)$  for an absolute reference, see Figure 4(b).

The integral is defined as a sum of the function ( $\sum f(i, k) |^m_n$ ) with limits of  $z_0$  and  $z_1$  with respect to  $z$ . The labeled perimeter  $S_p$  can be defined as the position vector for the edge in the following way<sup>21</sup>

$$\sum_{N=0}^{\infty} \{ (E_N(i, k) \leftarrow \{ p(z, P(z)) \}, \{ N = N + 1 \vee z = N \} \} \quad (6)$$

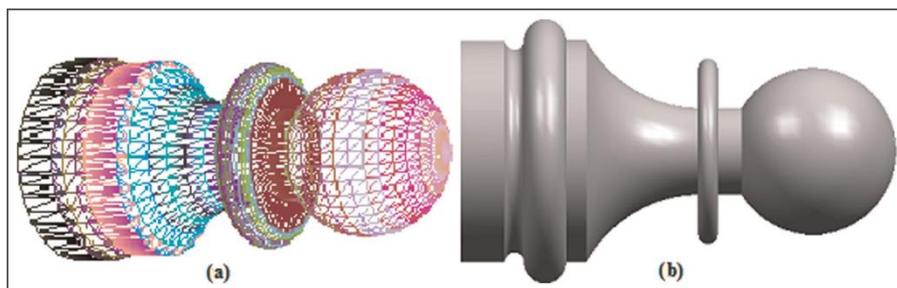


Figure 3. Files: (a) design without texture (wire file); (b) image (.BMP file).

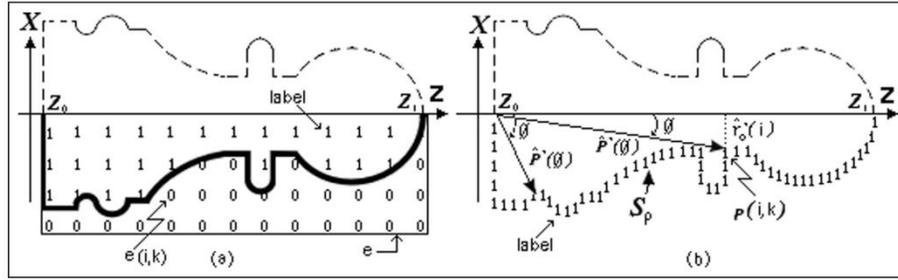


Figure 4. Labeling definition: (a) labeling of the part; (b) labeling of the perimeter.

$$S_p = \sum_{k=\frac{m}{2}}^{m-2} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \prod_{N=1}^{m-2} \left( \text{if } E_N(i,k) = 1 \text{ then } f(i,k) \right) \right. \\ \left. \Leftarrow E_N(i,k), \text{ else } f(i,k) \Leftarrow f(i,k) \right\} \quad (7)$$

where the  $\Leftarrow$  (arrow) means that the vector is stored in another vector, the Figure 4(b) presents the result of the trajectory of the labeled perimeter  $S_p$  represented with 1's in the point  $p(i,k)$  of the image.

**Step 6. Directional morphology and gradient vector in the edge**

The edge of the digital image is obtained by the evaluation of significant discontinuities in pixel intensity,<sup>17</sup> the gradient, give position, orientation and direction of the part (machining workspace). A transformation ( $T$ ) that takes the image  $e(i,k)$  obtained in the previous step to get the gradient (equation (8)). Where  $T$  is an operator gradient of Sobel (equations (9) and (10))<sup>12</sup> to find the directional vectors

$$\nabla f = \text{gradient } \mathbf{f} = \begin{cases} G_x = \frac{\partial}{\partial x} f(x,z) = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} = \frac{\partial}{\partial x} \hat{u}_1 \\ G_z = \frac{\partial}{\partial z} f(x,z) = \frac{\partial}{\partial z} \hat{K} = \frac{\partial}{\partial z} \hat{u}_2. \end{cases} \quad (8)$$

therefore

$$G_x = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{m-2} \left\{ \text{Edge}_x(i,k) = \sum_{z=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 e(x,z) M_x(z+2, x+2) \right\} \quad (9)$$

$$G_z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{m-2} \left\{ \text{Edge}_z(i,k) = \sum_{z=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 e(x,z) M_z(z+2, x+2) \right\} \quad (10)$$

Here  $M_x$  and  $M_z$  are the transformation matrix to generate the edge applied to the image. The vectorial

gradient represents the maximum change of intensity for the point  $p(i,k)$ .

The magnitude ( $|\nabla f|$ ) and direction ( $\angle \nabla f$ ), are given by the equations (11) and (12), respectively

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_z^2} \quad (11)$$

$$\angle \nabla f = \tan^{-1} \frac{G_z}{G_x} \quad (12)$$

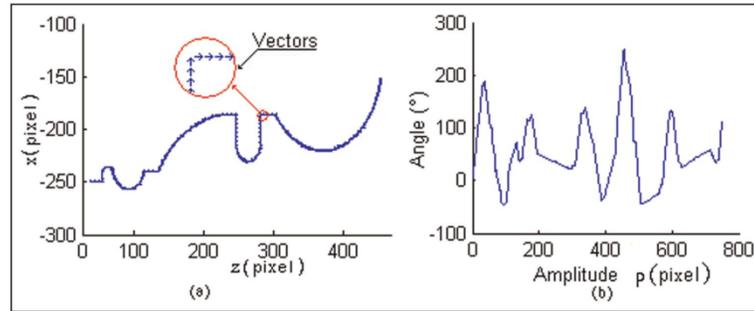
Figure 5(a) illustrates the vector direction of the edge of the part sample. Figure 5(b) shows the directional angles according to the trajectory of the edge when the gradient is applied to the binary image in the part.

The magnitude and direction of the edge is saved in the variable  $\mathbf{Maq}(i,k)$  using the equation (13) to generate the dimension of the structural element

$$\sum_{k=m}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \text{if exist edge then } \left\{ \mathbf{Maq}(i,k) \Leftarrow \begin{cases} |\nabla f(i,k) \text{ "magnitude"} \\ \angle \nabla f(i,k) \text{ "direction"} \end{cases} \right\} \right\} \quad (13)$$

**Step 7. Tool selection**

During the cutting operation, it is necessary to consider possible crashes with different machine tool elements, such as: the spindle, tool holders in the turret and tailstock, among others. These elements limit the workspace and should be taken into account. However, in this investigation only the workpiece, the insert, and tool holder are studied, since the whole workspace requires a deep study for its determination and depends on each machine structure, also it will require more time processing and screen resolution. The direction of the edge allows selecting the type, size and the angle of the insert, which is represented by the structural element in the image processing part. Table 2 illustrates the common types of cutting tools used in turning operations: left (L), right (R), neuter (N), knife (K), drilling (D) and holder (H) for external machining and their equivalents for internal works, where  $\zeta$  is the length of the insert,  $\mu$  the



**Figure 5.** Vectors of part: (a) direction vector of the part; (b) magnitude of edge direction.

**Table 2.** Common inserts (structural element).

Tool for turning			Type	$\mu(^{\circ})$	Size (mm)			
Name	Letter	Shape			$\zeta$	$\beta$	FL	$\phi$
1.-Right	R		External	35	19.049	0.406	-	-
			Internal	125				
2.-Left	L		External	197	19.0496	0.406	-	-
			Internal	19				
3.-Neuter	N		External	90	12.699	0.507	-	-
			Internal	93				
4.-Knife	K		External	90	12.699	-	-	-
			Internal	95				
5.-Drilling	D		External	60	44.449	-	38.099	12.699
6.-Holder	H		SI6R PCLNR-L 09	95	71.118	20.141	20.319	19.989

L: left; R: right; N: neuter; K: knife; D: drilling; H: holder.

orientation angle and  $\beta$  nose radius. The library of the cutting tool is generated from handbooks and tools stored in the warehouse, these data (length, angle and nose radius of the tool) are introduced into the software converting these data into structural elements (in pixels) as show in Figure 6(a). The inserts have been drawn with a mesh of  $3 \times 3$  pixels as example; although, a real insert as the external right insert with dimensions of  $45^{\circ}$  ( $\mu$ ), 19.049 mm ( $\zeta$ , 72 pixels), 5.079 ( $\beta$ ) requires a mesh of  $51 \times 51$  pixels and the structural element has 828 pixels, for more details see Figure 6(a).

To identify the most suitable insert, the directional vectors of the edge ( $\angle \nabla f$ ) are used in the following way. First the direction of the edge pixel in  $\angle \nabla f$  is determined, always located in the third and fourth quadrants, and the decision is given by

- If  $180^{\circ} \leq \angle \nabla f < 270^{\circ}$  then use left insert.
- If  $270^{\circ} \leq \angle \nabla f < 360^{\circ}$  then use right insert.

When the structural element moved through the image and the edge has a value ( $\mathbf{Maq}(i, k) = 1$ ) then, a structural element of an insert is selected according to edge

$$\sum_{k=m}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \{ \text{if } \mathbf{Maq}(i, k) = 1 \text{ then select insert } \{ \mu(i, k) \} \} \leftarrow \angle \nabla f / \{ \text{angle of edge} \} \} \quad (14)$$

where  $\mu$  is the dimension for tool cutting

$$\sum_{k=m}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \text{if } \mathbf{Maq}(i, k) = 1 \text{ then } \mu(i, k) \text{ is } \left. \begin{array}{l} \text{left insert, if } 17.5^{\circ} \leq \mu(i, k) < 45^{\circ} \\ \text{right insert, if } 107^{\circ} \leq \mu(i, k) < 180^{\circ} \\ \text{neuter insert, if } \mu(i, k) = 90^{\circ} \\ \text{knife, if } \mu(i, k) = 90^{\circ} \text{ (up and down)} \end{array} \right\} \right\} \quad (15)$$

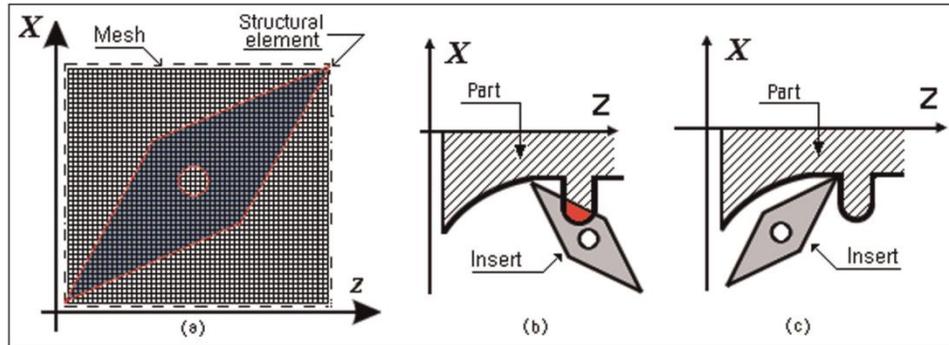


Figure 6. (a) Structural element for the right insert; (b) incorrect insert; (c) correct insert.

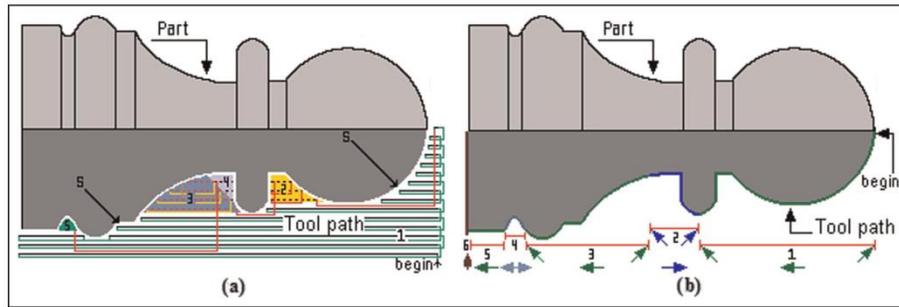


Figure 7. Tool selection (final piece): (a) rough turn (zig); (b) finish turn (zig with contour).

After an insert is selected, following the order of Table 2, the structural element shown in Figure 6(a) is moved through the edge in a way, such that the cornering structural element, which represents the nose cutting, coincides with each pixel of the edge. If at any pixel of the edge there is an intersection between the part and structural element (Figure 6(b)) the insert is not correct and another insert is tried (Figure 6(c)) by repeating the same process. The procedure of intersection of the insert with the part is checked using image processing techniques with software (it was developed in Microsoft Visual C++ 2010). All pixels contained in the part are labeled in coordinates  $(i, k)$  and a logical value (0); all pixels of the structural element of the tool with another logical value are labeled (1), when a structural element with the shape of the cutting tool is displaced through all the image and if the position of one or more pixels of the structural element belong to the part then an intersection exists.

After the correct holders<sup>22</sup> and inserts have been selected to work on each area, many changes of cutting tools will probably be required. The number of changes can be reduced by ordering the changes with the next procedure

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=\frac{\psi}{2}}^{m-2} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } (S_p(i, k) = 1) \text{ and} \\ \sum_{h=-1}^1 \sum_{\psi=-1}^1 \lambda[i + \psi][k + 1] = 1 \end{array} \right\} \text{ then Tray}(i, k) \Leftrightarrow \lambda[i + \psi][k + 1] \quad (16)$$

where  $\lambda[i + \psi][k + 1]$  is a mesh that is applied to the edge ( $S_p$ ) with the vicinity of eight pixels to identify the route.

**Step 8. Tool path generation strategy**

The methods of trajectories generation are: zig (one way), zig-zag (two ways), zig with contour, zig-zag with contour, follow-periphery, trochoidal and profile.<sup>23</sup> In this article the zig and zig with contour are used because of the easy generation of trajectories. Here it is important to clarify that path generation is only for rough cutting. The first machining is presented in Figure 7(a), the strategy is linear zig. The tool path is obtained by an algorithm (zig). Each pixel of the edge is

**Table 3.** Selected inserts for part of Figure 7.

Rough turn		Finish turn	
Area	Type	Line	Type
1	L	1	L
2	L	2	R
3	L	3	L
4	R	4	N
5	N	5	R
6	—	6	K

L: left; R: right; N: neuter.

**Table 4.** Cutting tool selection for second example.

Rough turn		Finish turn	
Area	Type	Line	Type
1	L	1	L
2	L	2	—
3	R	3	R
4	M12_X_1.25	4	—
5	D/L	5	D/L

L: left; R: right; N: neuter; D: drilling.

labeled with a position-relative reference frame ( $X, Z$ ) obtained in step 4 and step 5. A structural element with the shape of the cutting tool with angle  $\mu$ , length  $\varsigma$  and nose angle  $\beta$  is displaced throughout the image from right to left (only in the  $-Z$  axis), the structural element is removed ( $X$  pixel  $-1$ ) if this is approaching the boundary of the part, the structural element is moved back to the start (only in the  $+Z$  axis) and finally from bottom to top in the  $X$  direction ( $X$  pixel  $+2$ ).

On any image if a fix  $k$ , allows  $i$  movements from 0 as far as  $i \in \text{Tray}(i, k) \mid_n^m$  then this pixel is part of the edge and the insert must go back and start the process again at the pixel ( $k = 0, i = i + 1$ ). In this way the total trajectories are obtained by equation (17) and showed in the Figure 7(a)

$$\sum_{k=0}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \{\text{Maq}(i, k) \Leftarrow \mathbf{f}(i, k); \{if \mathbf{f}(i, k) = \text{Tray}(i, k) = 1 \text{ then } k = k + 1\}\} \quad (17)$$

Equation (18) can be used to determine the time of machining  $T$ , where the pixels of all trajectory machining are converted to distance ( $L_i$ ). Also the feed rate ( $v$ ) is considered

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{v_i} \quad (18)$$

## Results and discussion

Aiming at improving accuracy, the dimensions obtained from image processing are compared with the dimensions obtained from the .DXF file.

With the proposed method, an image can be directly taken with a photograph camera or other device for automatic tool selection. The methodology presented above is applied to the manufacture of two parts that includes operations of external rough cutting, internal rough cutting and the approach of the thread. Nine tools are available for machining one 2D part, four for external roughing (left, right, neutral and knife), four for internal roughing (left, right, neutral and knife) and one for threading. The parameters of each cutting tool are presented in Table 3.

The first example is the manufacture of a chess piece as presented in Figure 7. The selection of the cutting tools is presented in Table 3 and the cutting path for rough cutting is shown in Figure 7(a) and (b). The label  $S$  indicates that the finish shall not be touched.

Table 3 shows the results of the selected inserts by applying the proposed method.

The second example is presented in Figure 8. The selected cutting tools are presented in Table 4. Where the existing thread machine is represented by 4 and an internal machining labeled with the number 5.

The developed software is shown in Figure 9. It was developed in Microsoft Visual C++ 2010 and tested with 2D images generated in any CAD software and exported to .DXF file.

## Conclusions

The present work develops a new method for automatic tool selection using image processing techniques for computer numerical controlled lathe machines. The main contribution of this work is the use of image processing to generate a new method for automatic tool selection where the preferential direction field is detected in the boundary of the image part and creates a directional field through the directional gradient. In order to diminish the possible error in boundary obtaining, a .DXF file was used to compare and correct it when an image is utilized. Experimentation shows that the proposed method works with a resolution of 1.1 micrometers and it has good performance owing to the automatic tool selection, which can be carried out correctly. The application of the proposed method, developed in this investigation, reduces the complex mathematical algorithm utilization, shows an easy way to simulate the cutting tool selection and it can be suitable for other machining processes for further investigations. The resolution of this system is determined as approximately 1.1  $\mu\text{m}$ . Also, a higher resolution transformation of the .DXF file to .BMP file can be utilized to improve both the resolution and accuracy of this system. The designed tool selection will be integrated within a CAD/CAM system, to be used in other applications.

## Acknowledgments

This article received financial support from UAQ and financial support by CONACYT (grant number 209333).

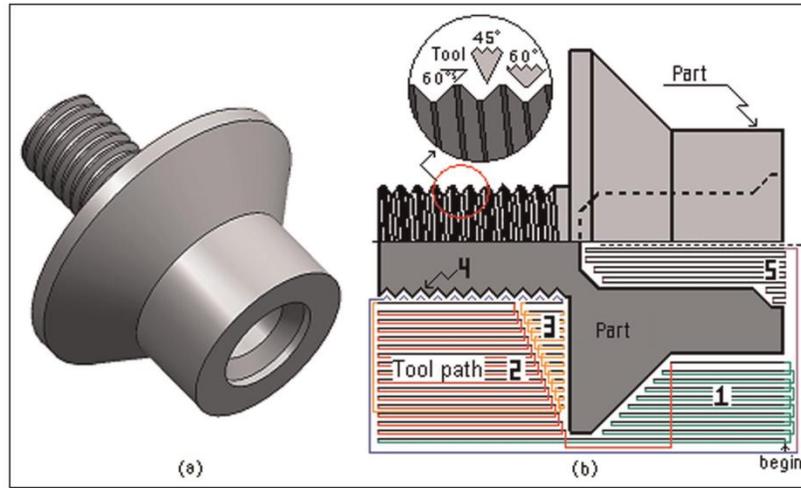


Figure 8. Tool selecting: (a) final piece, (b) thread and rough turn (zig).

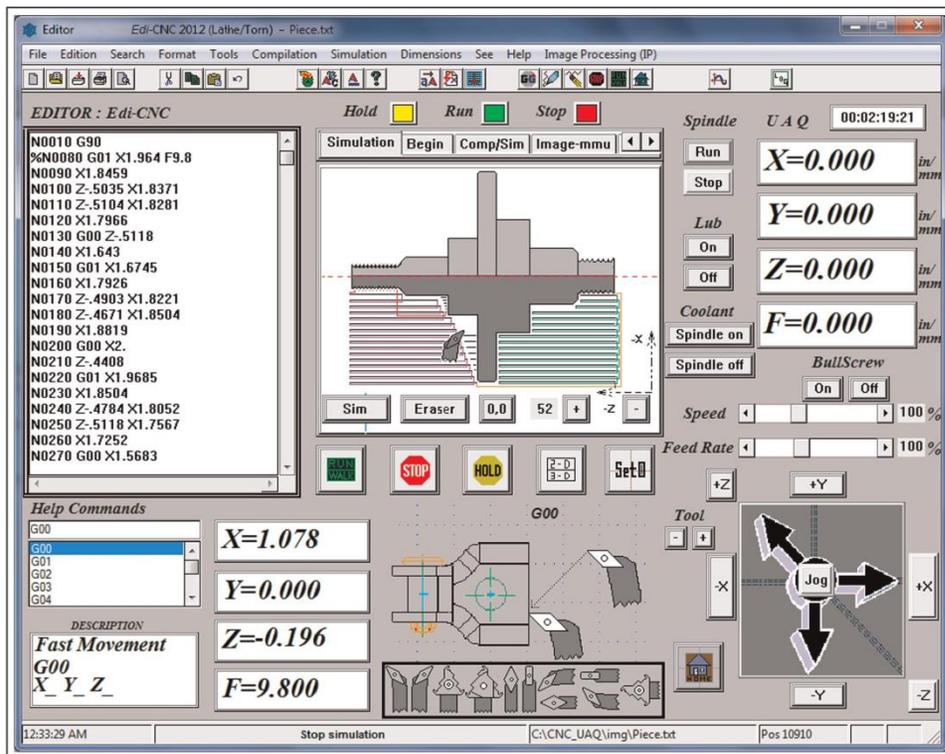


Figure 9. Final software for tool selection.

## References

1. Bouaziz Z and Zghal A. Optimization and selection of cutters for 3D pocket machining. *Int J Computer Integrated Mfg* 2008; 21: 73–88.
2. Ramaswami H, Shaw RS and Anand S. Selection of optimal set of cutting tools for machining of polygonal pockets with islands. *Int J Advd Mfg Technol* 2011; 53: 963–977.
3. You C-F, Sheen B-T and Lin T-K. Selecting optimal tools for arbitrarily shaped pockets. *Int J Adv Manuf Technol* 2007, 32: 132–138.
4. Oral A and Cemal CM. Automated cutting tool selection and cutting tool sequence optimisation for rotational parts. *Robotics and Computer-Integrated Mfg* 2004; 20: 127–141.
5. Edalew KO, Abdalla HS and Nash RJ. A computer-based intelligent system for automatic tool selection. *Materials and design*, 2001; 22: 337–351.
6. Chung C and Peng Q. The selection of tools and machines on web-based manufacturing environments. *Int J Mach Tools Mf* 2004; 44: 317–326.
7. Sarma PMMS, Karunamoorthy L and Palanikumar K. Surface roughness parameters evaluation in machining GFRP composites by PCD tool using digital image processing. *J Reinforced Plastics and Composites* 2009; 28: 1567–1585.
8. Gadelmawla ES, Eladawi AE, Abouelatta OB, et al. Application of computer vision for the prediction of cutting conditions in milling operations. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2009; 223: 791–800.
9. Eladawi AE, Gadelmawla ES, Elewa IM, et al. An application of computer vision for programming computer numerical control machines. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2003; 217: 1315–1324.
10. Astakhov VP. *Geometry of single-point turning tools and drills. Fundamentals and practical applications. Springer Series in Advanced Manufacturing* 2010. Springer.
11. Ming LC and Akul J, UNIGRAPHICS-NX5, Department of Mechanicals and Aerospace Engineering, University of Missouri, Rolla, Missouri 65409. Available from [http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5\\_tutorial.pdf](http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5_tutorial.pdf) (accessed 25 November 2011)
12. Tufoi M, Vela I, Marta C, et al. Optimization of withdrawing cylinder at vertical continuous casting of steel using CAD and CAE. *Int J Mech* 2011; 5(1): 10–18.
13. Kekre HB, Thepade S, Mukherjee P, et al. Image retrieval with shape features extracted using gradient operators and slope magnitude technique with BTC. *Int J Computer Applic* 2010; 6: 28–33.
14. Li J, Huang P, Wang X, et al. Image edge detection based on beamlet transform. *J Systems Engng Electronics* 2009; 20: 1–5.
15. Sutheebanjard P and Premchaiswadi W. Efficient scan mask techniques for connected components labeling algorithm. *EURASIP J Image Video Process* 2011; 1: 14–34.
16. Smid P. *CNC programming handbook*. 2nd ed. 2003.
17. Chen T-H, Chang W-T, Shen P-H, et al. Examining the profile accuracy of grinding wheels used for microdrill fluting by an image-based contour matching method. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2010; 224: 899–911.
18. Sharan RV and Onwubolu GC. Measurement of end-milling burr using image processing techniques. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2011; 225: 448–452.
19. Zhao Y, Ridgway K and Al-Ahmari AMA. Integration of CAD and a cutting tool selection system. *Computer Ind Engng* 2002; 42: 17–34.
20. Kindratenko V. *Development and application of image analysis techniques for identification and classification of microscopic particles*. PhD Thesis, University of Antwerp, Belgium, 1997, pp.1–6.
21. Loncaric S. A survey of shape analysis techniques. *Pattern Recognition* 1998; 31: 983–1001.
22. Carpenter ID and Maropoulos PG. Automatic tool selection for milling operation Part 2: tool sorting and variety reduction. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2000, 283–292.
23. Sun Y, Ren F, Zhu X, et al. Contour-parallel offset machining for trimmed surfaces based on conformal mapping with free boundary. *Int J Advd Mfg Technol* 2012; 60: 261–271.

# Directional morphological approaches from image processing applied to automatic tool selection in computer numerical control milling machine

Proc IMechE Part B:  
*J Engineering Manufacture*  
227(11) 1607–1619  
© IMechE 2013  
Reprints and permissions:  
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav  
DOI: 10.1177/0954405413491402  
pib.sagepub.com  


**Mario Mejia-Ugalde, Miguel Trejo-Hernandez, Aurelio Dominguez-Gonzalez, Roque A Osornio-Rios and Juan P Benitez-Rangel**

## Abstract

Automatic tool selection in milling operation has become a very important step in the manufacturing and planning processes for 2.5D piece machining. The main contribution of this article is the development of a new method based on directional morphological approaches, applied to automatic tool selection in computer numerical control milling machines for machining a 2.5D of a geometry piece provided of three-dimensional model of computer-aided design or from an image taken with other devices. First, the image is preprocessed by applying several image processing techniques. Later, mathematical morphology as erosion or dilation to create structural element with the shape of the cutting tool is used. The method displaces a structural element throughout the entire image with the values of the lengths of the piece boundary and the cutting tool to select the correct cutting tool and tool path. Besides, with the same structural element, the zig and zig-zag contour trajectories are obtained in standard computer numerical control code. Results from these experiments show that the method makes it possible to obtain good performance in automatic tool selection when several types of pieces are processed.

## Keywords

Gradient, automatic tool selection, morphology, image processing, 2.5-axis machining

Date received: 13 November 2012; accepted: 2 May 2013

## Introduction

In the manufacturing process area, the demand for better productivity with high quality has been constant. For the next generation of computer numerical control (CNC) machines, topics with the following themes should be taken into account to develop commercial computer-aided manufacturing (CAM) and the development of a system capable of recognizing complex features, among others: total error compensation, concepts of autonomous manufacturing and process condition monitoring.<sup>1</sup> Some research contributions on these themes were carried out by Rodriguez-Donate et al.<sup>2</sup> and Eladawi et al.<sup>3</sup> Otherwise, a large percentage of pieces used in the industry have a shape of contours where the base face is a plane surface denominated 2.5 axis. A 2.5D solid model can be defined as a cut with a series of two-dimensional (2D) tool paths at different Z slices of a three-dimensional (3D) solid model. Similarly, automatic tool selection in milling operation

is one of the most important steps in process planning; moreover, at present, CAM software transfers this task to the worker who does it based on its own experience, ability and knowledge. Considerable studies have reported about the variables that affect the milling process such as material piece selection,<sup>4</sup> cutting conditions,<sup>5,6</sup> tool materials,<sup>4</sup> tool sequence,<sup>7</sup> cutting fluid selection,<sup>4</sup> tool path,<sup>3</sup> control,<sup>8</sup> identification<sup>9</sup> and tool selection.<sup>10</sup>

Tool selection, a task commonly made by a human operator, is an important aspect in machining processes, since if the tool selected is incorrect, it can

Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty, San Juan of Rio, Queretaro, Mexico

### Corresponding author:

Mario Mejia-Ugalde, Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty, San Juan of Rio, Queretaro, 76806, Mexico.  
Email: mmu92@hotmail.com

produce dimensional errors in workpiece, such as possible crashes, consequently leading to rejection of the piece. In this regard, some methods have been developed for tool selection in milling processes in pockets of 2.5D as described in the work by Ahmed et al.,<sup>7</sup> in which an optimization algorithm based on analytical methods was proposed for formulation of the tool sequence selection problem, obtaining good results with the support of a computer-aided design (CAD) software. Another method is that proposed by Lim et al.<sup>11</sup> who used experimental algorithms using mathematical Boolean to determine the optimal set of tools in pockets with the integration of CAD/CAM. In this way, Ramaswami et al.<sup>10</sup> developed an algorithm for decomposing polygons into convex areas using dynamic programming. The above-mentioned research uses complex algorithms and certain human intervention is still necessary. Another approach for tool selection is based on the shape but it has not been widely studied; this method is important because it eliminates the designer subjective decisions, does not require previous knowledge, does not use complex mathematical models and is easy to implement. For such reasons, it is desirable to develop an approach to make tool selection in milling based on the shape, automatically.

On the contrary, morphology is a method that removes or adds pixels from a binary image formed by a set called structural element: the morphology applied on image processing has been widely used in applications in which an opening operation is introduced for monitoring various defects occurring on chenille yarns according to Maros et al.;<sup>12</sup> the cutting condition effects as roughness presented by Sarma et al.,<sup>5</sup> the prediction of cutting conditions by Gadelmawla et al.<sup>6</sup> and path generation are included for milling CNC machines by Eladawi et al.<sup>3</sup>

The novelty of this research is a new method based on directional morphological approaches from image processing, applied to automatic tool selection in CNC milling machine, showing an easy way to simulate pieces, eliminating the designer subjective decisions, reducing tool selection mistakes, making the selection process and design faster, and in addition, it does not require a priori knowledge in operations such as pocket, mill, mill thread, helicoidal mill, extrusion, profile and section, fillet, chamfer and mill thread.

## Background

Automatic tool selection has been a successful profitable method for reducing the machining time, errors in process, human interaction and costs; improving product quality<sup>13,14</sup> and creating new methods by the extensive use of CNC machines in the industry. In this article, the method for automatic tool selection begins by extracting the 3D model provided by either a .DXF file (drawing exchange format) or from an image taken

with other devices; the DXF file format is used because of easy availability and low cost in terms of computational work. Tufoi et al.<sup>15</sup> define DXF file format as information in an ASCII text file with .dxf extension, and Chung and Peng<sup>16</sup> show the organization section of a DXF file. After obtaining the DXF file in order to diminish the possible error in boundary, it was used to compare and correct when an image (BMP file) is used. Finally, mathematical morphology is applied to generate automatic tool selection. The image processing techniques, solid models and other systems used are given in the following:

1. *Morphological operations.* These are defined as an edge filter of the piece, satisfying properties such as translation invariance, anti-extensivity, monotonic increases and idempotence;<sup>17</sup> among the methods, more common methods of mathematical morphology on image processing are erosion and dilation. These methods remove or add pixels from a binary image according to rules that depend on the pattern of the neighboring pixels formed by the interaction of a set called structuring element with a set of pixels inside the image; the erosion operation reduces the size of an image, while the dilation operation enlarges its geometric size.<sup>18</sup>
2. *Binary image.* The value of each pixel in the image is changed to a binary logic number; thresholding is the most applied method to convert a gray-scale image  $f(i,j)$  into a binary image  $f^b(i,j)$ .
3. *Directional vectors of the piece.* The gradient of edge is very important for image analysis, and it is widely used for acquisition, registration, identification, segmentation and compression of object in scene<sup>15,19</sup> to obtain the edge; the Sobel operator is used because of its low sensitivity to noise and low cost in terms of computational work.
4. *Extracting piece.* The method of sequential algorithm and scan mask by Jing et al.<sup>20</sup> are more commonly applied and used to register images.
5. *Software CAD-CAM-CAE.* CAD, CAM and computer-aided engineering (CAE) are systems which graphic, design and simulate respectively facilities the user to do the tasks.<sup>14,15,21</sup>
6. *2D, 2.5D and 3D models.* The graphics in this article are 2D and 2.5D models, in which a 2D solid model is an X-Y shape extruded in Z, an example is a circle and a rectangle in 2D model extruded in Z, which produces a cylinder and cuboid in 3D solid, respectively, while a 2.5D solid model can be a cut with a series of 2D tool paths at different Z slices, which produce analytic shapes (lines and circles).<sup>22</sup>
7. *Structural elements.* The length of the cutting tool is created by the structural element; the tools in this research, data handbook and catalogs of tool manufacturers were used to select the proper tool for milling operations.

Otherwise, the work by Bithika and Datta<sup>17</sup> applies mathematical morphology to detect manufacturing defects. This work is an example of the application of image processing to detect manufacturing defects. Such techniques are used to measure the effect of cutting speed on the surface roughness, as in another example presented by Sarma et al.,<sup>5</sup> which provides a new strategy in manufacturing.

## Methodology

The application of mathematical morphology to solve manufacturing problems is a new approach in the literature. In this article, six steps to get the automatic tool selection using morphological operations are proposed. In this way, the original file is a 3D model taken from CAD and exported to a DXF file; then by applying a transformation<sup>16</sup> into the DXF file an image of BMP format is built. After applying several image preprocessing techniques such as binary image, registration, identification, segmentation and image compression for generating the contour of the piece, and using the boundary of it and applying image processing such as gradient and labeling perimeter of the piece for generating the longitudes of boundary as to locating and separating the image of the piece. Finally, structural element with the shape of the cutting tool is displaced through the entire image with the lengths of the piece boundary and the cutting tool, using mathematical morphology, especially erosion or dilation to generate automatic tool selection and tool path. The DXF file was used in order to diminish the possible error in obtaining the boundary, and also to compare and correct it when an image is utilized. Figure 1 shows the detailed steps for automatic tool selection based on the shape, and each step is detailed in the following.

### Step 1: acquisition and file transformation

**Acquisition of DXF file.** The original design (Figure 2(a)) is obtained from CAD or from an image taken with other devices, and then the upper profile model is converted into DXF file<sup>23</sup> (Figure 2(b)). This file contains general information about the drawing, definitions of items and the entities that make up each block.

**File transformation.** A precision analysis is performed, before and after applying image processing techniques, to find the most appropriate resolution according to the dimensions of the pieces to be machined (test pattern used 25.400 mm) and cutting tools (pattern test used 19.049 mm). The calibration value is also the resolution of this system, and it is approximately 1  $\mu\text{m}$ , using a resolution of this system for 1  $\text{mm}^2$  in  $800 \times 600$  (scale 4:3,  $15 \times 11$  pixels) and  $50,800 \times 50,800$  (scale 1:1,  $1000 \times 1000$  pixels).

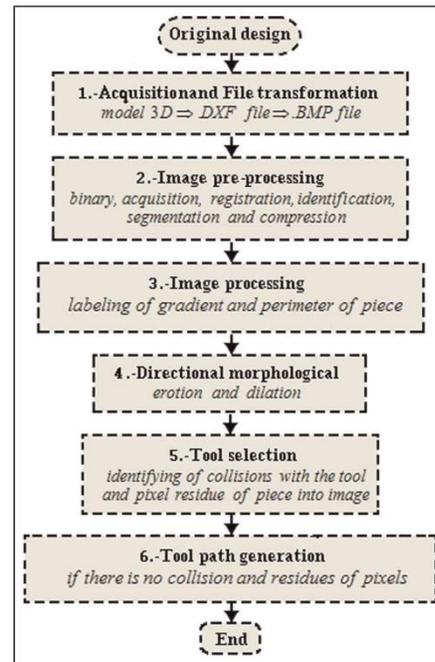


Figure 1. General diagram of the automatic cutting tool selection.

A method of data extraction<sup>16,23</sup> is applied to convert the DXF file into BMP file, as shown in Figure 3(a) and (b). The same distance is then automatically determined in pixels in the image, and a calibration value is obtained by dividing the distance in millimeters ( $distance_{mm}$ ) by the distance in pixels ( $distance_{pixel}$ ) to obtain a relation of millimeters per pixel ( $Relation_{mm\ per\ pixel}$ ). All the dimensions are known in the DXF file.

### Step 2: image preprocessing

**Binary image.** A binary image ( $\mathbf{f}^B(i, j)_n^m$ ) in 2.5D is a subset  $\chi_D$  of  $\mathbb{R}^3$  if  $\{0, 1\}^{2.5}$  represents the set of functions as  $\chi_D \subset \mathbb{R}^3$  in the set  $\{0, 1\}$ , so that any binary image can be represented by a characteristic function  $\chi_D: \mathbb{R}^3 \rightarrow \{0, 1\}$ , after starting with the image, as shown in Figure 3(b), a transformation (thresholding) is applied to convert the image of gray scale into binary using

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f}(i, j) > T(\text{object pixels}) \Rightarrow A_1 = \mathbf{f}(i, j) \\ \mathbf{f}(i, j) \leq T(\text{background pixels}) \Rightarrow A_2 = \mathbf{f}(i, j) \end{array} \right\}$$

then  $\mathbf{f}^B(i, j)$

where  $\mathbf{f}^B(i, j)$  is equal to

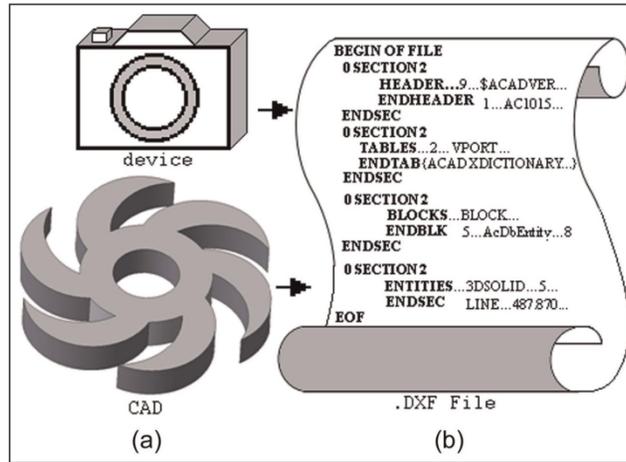


Figure 2. Original files: (a) design from CAD or camera and (b) DXF file.

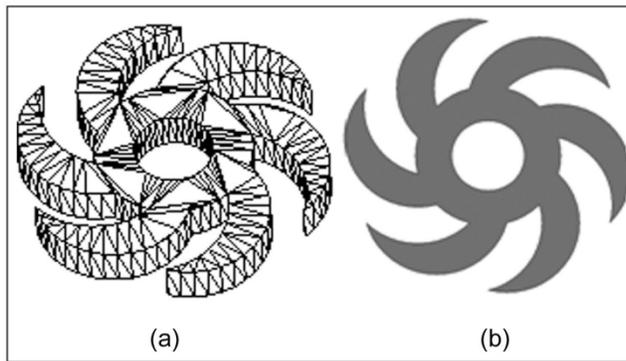


Figure 3. Files: (a) design without texture (wire file) and (b) image (BMP file).

$$\left\{ \mathbf{f}^B(i,j) = \frac{\text{Average value of } A_1 + \text{Average value of } A_2}{2} \right\} \quad (1)$$

where  $\mathbf{f}(i,j)|_n^m$  is the image in gray scale (image matrix of  $n \times m$  pixels),  $(A_1, A_2)$  are areas into image and  $\mathbf{f}^B(i,j)|_n^m$  is the result of the gray transformation to binary.

**Step 3: image processing**

*Detection and labeling of the gradient and perimeter in the edge of the piece.* The following step is the binary label, or limitation, of the piece  $\mathbf{e}(i,j)|_n^m$  (Figure 4(a)) (equation (2)). Let  $\mathbf{f}_k \subseteq \mathbf{f}(i,j)|_n^m$  be a white and black image in the binary space  $\mathbf{f}^B$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left\{ \mathbf{e}(i,j) = \begin{cases} \mathbf{f}(i,j) = 1 \Rightarrow \mathbf{f}_e(i,j) = 1 \\ \mathbf{f}(i,j) = 0 \Rightarrow \mathbf{f}_e(i,j) = 0 \end{cases} \right\} \quad (2)$$

where  $\mathbf{f}_e(i,j)|_n^m$  is the labeling image saved in the image of exit  $\mathbf{e}(i,j)|_n^m$  of equation (2). The directional classification of the edge for half of the image in the point  $p(x,y)$  is presented in Figure 4(b).

*Perimeter of the piece.* The perimeter ( $\mathbf{P}(r_{x0}, r_{y0})$ ) can be found by applying an edge ( $\mathbf{e}(x,y)$ ) in the point of edge ( $\mathbf{e}(i,j)$ ) into the image ( $\mathbf{f}(i,j)|_n^m$ ) to provide information about the shape of the object,<sup>24,25</sup> and the labeled perimeter  $S_p$  can be defined as the position vector for the edge,<sup>25,26</sup> Figure 4(b) presents the result of the trajectory of the labeled perimeter  $S_p$  represented with label “1” in the point  $p(i,j)$  of the image.

*Boundary or edge of the piece.* The boundary ( $B$ ) of the digital image ( $f$ ) can be described by a function for a

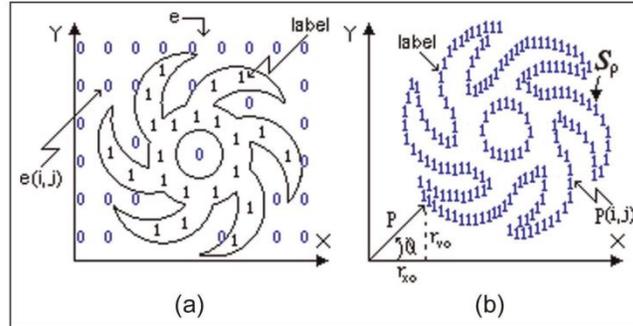


Figure 4 Labeling definition: (a) labeling of piece and (b) labeling of perimeter.

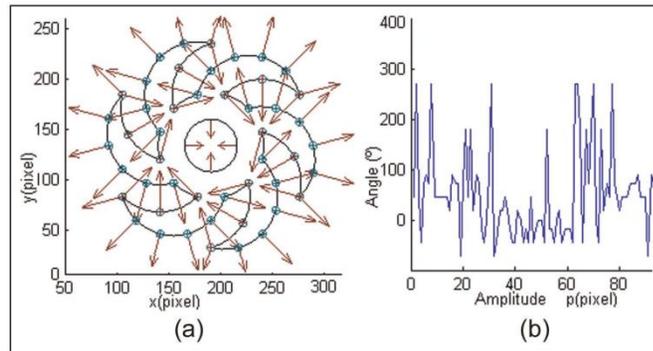


Figure 5. Vectors of piece: (a) direction vector of piece and (b) magnitude of edge direction.

point ( $h$ ), obtained by the evaluation of significant discontinuities in pixel intensity<sup>27</sup> ( $\sigma$ ) the gradient, gives position ( $x$ ), orientation ( $\theta$ ) and direction of the piece ( $\alpha$ ) (machining workspace), the contour of a figure can be symmetric and periodic with respect to a line ( $x \in B$ ) for a pulse of the Dirac ( $\delta_x(B)$ ) (equation (3)), used for image processing and otherwise more complex contour or boundary functions

$$\frac{\delta f}{\delta h}(x) = \left(\frac{\delta f}{\delta h}\right)(x) + \sigma \cos(\theta) - \alpha \delta_x(B) \quad (3)$$

A transformation ( $T$ ) that takes the image  $e(i, j) \mid_n^m$  obtained in the previous step to get the gradient where  $T$  is an operator gradient of Sobel<sup>15</sup> to find the directional vectors, and the vectorial gradient represents the maximum change of intensity for the point  $p(i, j)$ . These vectors have magnitude ( $|\nabla f|$ ) and direction ( $\angle \nabla f$ ). Figure 5(a) illustrates the vector direction of the edge of first piece example; Figure 5(b) shows the directional angles according to the trajectory of the edge, applying gradient in the piece.<sup>25</sup>

The magnitude ( $|\nabla f(i, j)$ ) and direction ( $\angle \nabla f(i, j)$ ) of the labeling and perimeter ( $\angle \nabla f(i, j)$ ) of the edge are saved in the variable  $\mathbf{Des}(i, j)$  to generate the dimension of structural element<sup>25</sup>

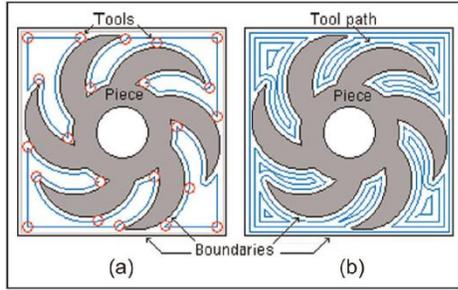
$$\left\{ \forall S_p(i, j) \in f(x, y) : \exists \left( \begin{matrix} |\nabla f(i, j) \wedge \\ \angle \nabla f(i, j) \end{matrix} \right) \subset \mathbf{Des}(i, j) \right\}$$

Therefore

$$\mathbf{Des}(i, j) = \int_{j=1}^{j=m-1} \int_{i=1}^{i=n-1} [ (|\nabla f(i, j) \wedge \angle \nabla f(i, j)) ] dx dy \quad (4)$$

#### Step 4: directional morphological approaches

Directional morphological approaches to generate size of tool. Erosion and dilation are operators to generate directional morphology in image processing, defined for binary images, to gray-scale images and to complete lattices, dilation ( $\delta$ ) and erosion ( $\varepsilon$ ) are formed by the



**Figure 6.** Directional morphology: (a) tool size dilation and (b) tool path dilation.

interaction of a set called a structuring element (with shape) with a set of pixels of interest in the image are employed as the basic elements of many algorithms.

Figure 6 shows the dilation of a gray-level image  $f(i, j)$  by a structural element  $b(i, j)$ , and it is defined as equation (5)

$$(A \oplus B)(w, q) = \max\{f(w - i, q - j) + b(i, j)\} \quad (5)$$

such that  $(w - i, q - j) \in D_A$ ,  $(i, j) \in D_B$ , where  $D_A$  and  $D_B$  are the domains of  $A$  and  $B$ , respectively.

Defined by  $A \oplus B$  where  $A$  is a set of pixels and  $B$  is a structuring element,  $B$  is the reflection of  $B$  about its origin and followed by a shift by  $s$ . Dilation also satisfies the following equations (equations (6) and (7))

$$A \oplus B = \left\{ s[(\hat{B})_s \cap A \neq \Phi] \right\} \quad (6)$$

Equivalently

$$A \oplus B = \left\{ s[(\hat{B})_s \cap A \subseteq A] \right\} \quad (7)$$

Dilation joins the translations of a picture for each pixel external to internal of an image  $B$ , called structural element as

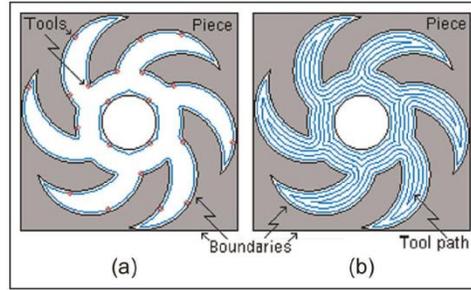
$$A \oplus B = \bigcup_{b_i \in B} A_{b_i} \quad (8)$$

Therefore

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ \left[ \text{if} \left[ \begin{array}{l} ((f(i, j) == 0)) \delta \delta ((f(i, j - 1) == 1) | f(i - 1, j) == 1 | f(i, j + 1) == 1 | f(i + 1, j) == 1) \end{array} \right] \Rightarrow f(i, j) \Leftarrow 1 \right] \right\} \quad (9)$$

Figure 7 shows the erosion of gray levels and is defined as equation (10)

$$(A \ominus B)(w, q) = \min\{f(w + i, q + j) - b(i, j)\} \quad (10)$$



**Figure 7.** Directional morphology: (a) tool size erosion and (b) tool path erosion.

such that  $(w + i, q + j) \in D_A$ ,  $(i, j) \in D_B$ , where  $D_A$  and  $D_B$  are the domains of  $A$  and  $B$ , respectively.

Or, it is also written as the following equations (equations (11) and (12))

$$(A \ominus B) = \{s|B\}_s \subseteq A \quad (11)$$

Erosion is a reverse operation to the dilation

$$(A \ominus B) = \{p|B_p \subseteq A\} \quad (12)$$

Erosion joins the translations of a picture for each pixel internal to external of an image  $B$ , called structural element as

$$A \ominus B = \bigcap_{b_i \in B} A_{b_i} \quad (13)$$

Therefore

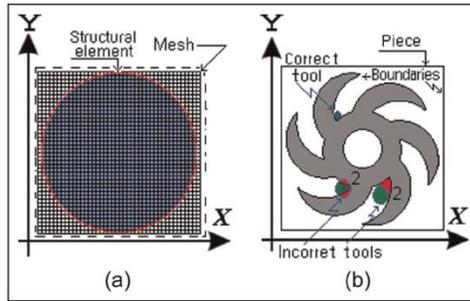
$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ \left[ \text{if} \left[ \begin{array}{l} ((f(i, j) == 1)) \delta \delta ((f(i, j - 1) == 0) | f(i - 1, j) == 0 | f(i, j + 1) == 0 | f(i + 1, j) == 0) \end{array} \right] \Rightarrow f(i, j) \Leftarrow 0 \right] \right\} \quad (14)$$

Because equations (9) and (14) of directional morphological approaches have been modified to generate the structural element of insert and tool path using the workspace boundaries, edge and the perimeter function of the piece yield equation (18) and the results are provided in Figures (7) and (8)

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ SE_1(i, j) = \sum_{a=-2}^2 (i, j + a) \right\} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ SE_2(i, j) = \sum_{b=-2}^2 (i + b, j) \right\} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ SE_{n-2}(i, j) = \sum_{c=-1}^1 \sum_{d=-1}^1 (i + c, j + d) \right\} \quad (17)$$



**Figure 8.** Tool selection: (a) structural element and (b) incorrect tool and correct tool.

$$SE = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \left\{ \{SE_1(i,j)\} \cup \{SE_2(i,j)\} \cup \dots \cup \left\{ \sum_{h=n-4}^n (SE_{n-2}(i,j)) \right\} \right\} \quad (18)$$

*if*{ $(SE_{n-2}) = ((SE_1) \text{ or } (SE_2))$  *then eliminate*  $(SE_{n-2})$

where  $SE_1$  is the first piece of structural element and it is given by

$$SE_1 = \sum_{a=-2}^2 (i,j+a) = (i,j-2) \cup (i,j-1) \cup (i,j) \cup (i,j+1) \cup (i,j+2) \quad (19)$$

**Step 5: tool selection**

During the cutting operation, it is necessary to consider possible crashes with different machine tool elements such as the spindle, tool holders in the turret, tailstock and so on. These elements limit the workspace and should be taken into account. However, in this investigation, the workpiece, the cutting tool and tool holder are only studied; since the whole workspace requires a deep study for its determination and depends on each machine structure, it will also require more processing time and screen resolution. The direction of the edge allows selecting the type, size and tool path of the insert, which is represented by structural element in the image processing piece. When a pixel of the edge crashes a pixel of the structural element (SE), an iterative method is applied using morphology, and the structural element is moved through the perimeter function to generate the tool and tool path.

Table 1 illustrates the common types of cutting tools used in milling operations: ballnose (B), endmill (E), conic corner (C), dovetail (D), chamfering (CH), counterbore (CB) and holder (H), for milling, drilling and facing operation; the tools are generated from handbooks and tools are stored in the warehouse; the data (diameter, tip diameter, major length, minor length, usable length, presetting and corner radius of the tool) are introduced into the software for converting these data into structural elements (in pixels), as shown in Figure 8(a). For example, the cutting tools have been drawn with a mesh of  $42 \times 42$  pixels, although a real insert as the drilling cutting tool with a diameter of 5.56 mm ( $D$ , 21 pixels) requires a structural element as a tool of  $\pi(20)^2$  pixels. For more details, see Figure 8(a).

**Table 1.** Common cutting tool (structural element) used.

Tool for milling			Type	Size (mm)						
Name	Letter	Shape		$D$	$d$	$L$	$l$	$Fl$	$Sd$	$\phi(^{\circ})$
Ballnose	B		Milling	0.0157	0.0157	40.1496	15.1811	20.4173	0.0158	0.0085
Endmill	E		Drilling	0.2000	0.1999	20.1496	15.1811	17.4173	0.2100	0.0999
				0.1500	0.0150	20.1496	14.1811	16.4173	0.0151	0.7499
Conic corner	C		Milling	0.0999	0.0999	25.1496	14.1811	20.4173	0.1000	0.0499
				0.0499	0.0499	15.1496	7.1811	12.4173	0.0500	0.0249
Dovetail	D			0.0099	0.0049	10.1496	5.1811	7.4173	0.0100	0.0049
Chamfering	CH		Facing	0.3499	0.3499	40.1496	15.1811	20.4173	0.3500	0.2100
Counterbore	CB			0.3999	0.3999	45.1496	10.1811	15.4173	0.3800	0.2300
Holder	H			0.5999	0.5999	25.1496	10.1811	15.4173	0.3900	0.2500

$D$ : diameter;  $d$ : tip diameter;  $L$ : major length;  $l$ : minor length;  $Fl$ : usable length;  $Sd$ : presetting;  $\phi$ : corner radius of the cutting tool.

**Table 2.** Algorithm for automatic tool selection based on residues of pixels.

```

F ←  $f(i,j) \big|_n^m$  Image input
D ←  $d_k(mm)$  Select diameter of tool cutting where  $k = 1$ 
For ( $i = 1$  to  $n$ )
  For ( $j = 1$  to  $m$ )
    Erode or Dilate → F Directional morphology
    If (Intersection or residues pixels)
       $d(mm) \leftarrow d_k(mm)$  Diameter change
       $k = k + 1$ 
    Else
       $Area_k \leftarrow k = k$  Generates areas
    End
  End
End

```

**End**

To identify the most suitable cutting tool, a structural element (see Table 1) is moved through the perimeter function by applying the morphology in the direction of edge pixel of piece to select the correct tool.

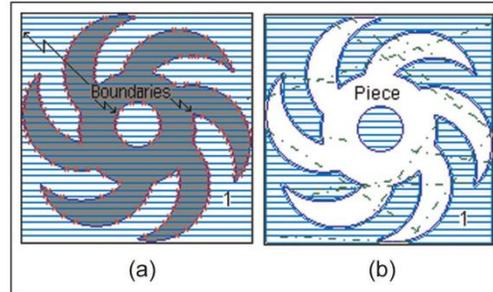
When the structural element is moved through the image and then the edge gets a value ( $\mathbf{Des}(i,j) = 1$ ), a structural element of an insert is selected according to diameter

$$\sum_{j=m}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \{ \text{if } \mathbf{Des}(i,j) = 1 \text{ then select insert } \{ \boldsymbol{\mu}(i,j) \leftarrow \text{diameter} \} \} \quad (20)$$

where  $\boldsymbol{\mu}$  are the dimensions for cutting tool; after a cutting tool is selected, following the order of Table 1, the structural element shown in Figure 8(a) is moved through the edge in a way such that the cornering structural element, which represents the tip diameter of cutting, coincides with each pixel of the diameter. If, at any pixel of the edge, there is an intersection between the piece and structural element (Figure 8(b)), the insert is not correct and another insert is tried by repeating the same process, as shown in the algorithm of Table 2.

The procedure of intersection of the cutting tool with piece is checked using image processing techniques with the own software (it was developed in Microsoft Visual C++ 2010). All pixels contained in the piece are labeled in coordinates  $(i,j)$  and a logical value (0); all pixels of the structural element of the tool with another logical value are labeled as "1," when a structural element with the shape of the cutting tool is displaced through all the images, and if the position of one or more pixels of the structural element belongs to the piece, then there is an intersection.

After the correct holders<sup>28</sup> and inserts have been selected to work in each area, many changes of cutting tools are probably required. The number of changes can be reduced by ordering the changes with the next procedure



**Figure 9.** Tool selection (final piece): (a) boundaries identification and (b) rough milling (zig).

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-2} \left\{ \text{if } \left\{ (S_p(i,j) = 1) \text{ and } \sum_{h=-1}^1 \sum_{\psi=-1}^1 \lambda[i + \psi][j + 1] = 1 \right\} \right. \\ \left. \text{then } \mathbf{Tray}(i,j) \leftarrow \lambda[i + \psi][j + 1] \right\} \quad (21)$$

where  $\lambda[i + \psi][j + 1]$  is a mesh that is applied to the edge ( $S_p$ ) with vicinity of eight pixels to identify the route.

#### Step 6: tool path generation strategy

The methods of trajectory generation are zig (one way), zig-zag (two ways), zig with contour, zig-zag with contour, follow-periphery, trochoidal and profile.<sup>29</sup> In this article, the zig and zig with contour are used because of easy generation of trajectories. Here, it is important to clarify that path generation is only for rough cutting. The first machining is presented in Figure 9; the strategy is lineal zig where the label "1" represents an area with a tool of diameter of 0.2000 mm. The tool path is obtained by an algorithm<sup>25</sup> (zig) according to; a structural element with the shape of the cutting tool with diameter  $d$  is displaced through the entire image from right to left (first only in the  $x$ -axis) and from bottom to top ( $y$ -axis) creating roughing paths for  $m$  total of pixels if this is approaching to the boundary of the piece or there is an intersection between the cutting tools with the piece or pixel residue exists; then, another cutting tool is changed. If there is no intersection between the structural element and the edge of the piece, then it is considered as piece of the path.

On any image, if a fix  $j$  allows  $i$  movements from 0 as far as  $i \in \mathbf{Tray}(i,j) \big|_n^m$ , then this pixel is piece of the edge and the insert and must go back and start the process again at the pixel ( $j = 0, i = i + 1$ ). In this way, the total trajectories are obtained by equation (22) and shown in Figure 9, where Figure 9(a) depicts the boundaries identification and Figure 9(b) shows the rough milling (zig) applied after correct tool selection

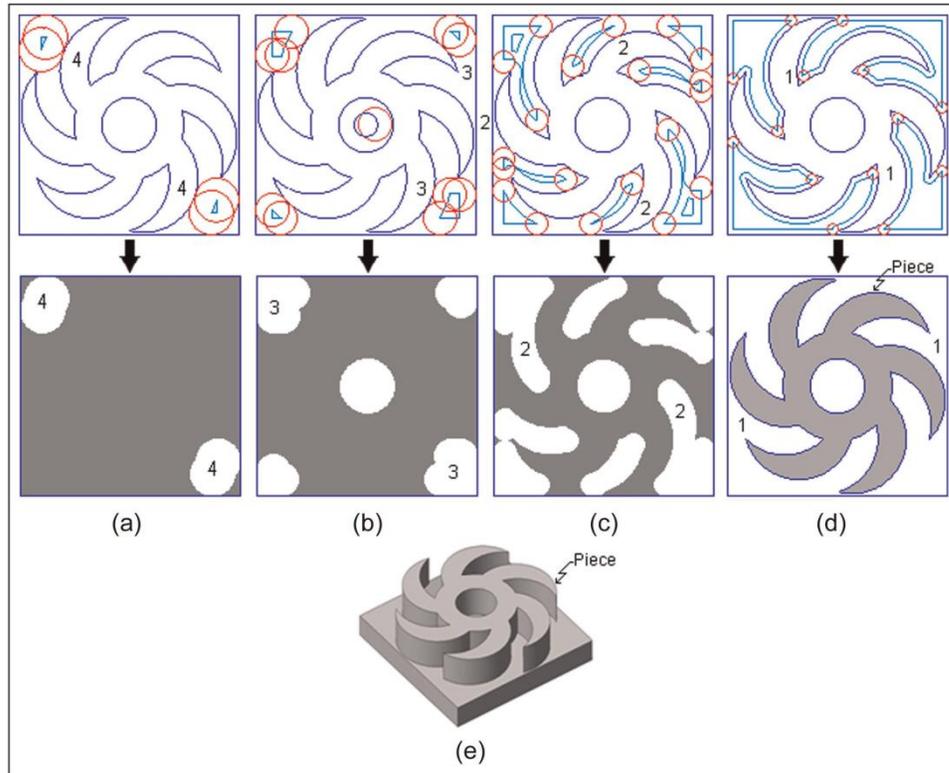


Figure 10. Tool selection for first piece based on residues of pixels.

$$\sum_{j=m_i-1}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} \{Des(i,j) \Leftarrow f(i,j); \{if f(i,j) = Tray(i,j) = 1 then j = j + 1\}\} \tag{22}$$

**Results and discussion**

With the aim to validate the proposed methodology, three different pieces were processed to automatically select the correct tool for its machining, including operations such as pocket, mill, mill thread, helicoidal mill, extrusion, profile and section, fillet, chamfer and mill thread, and for rough mill and finish mill.

Aiming at improving accuracy, the dimensions obtained from image processing are compared with the dimensions obtained from the DXF file. With the proposed method, an image can be directly taken from a photograph camera or some other device for automatic tool selection.

First, Figure 10 shows four different stages that automatically generate the proposed method (four different tools were selected) to obtain the piece of a pocket in zig-zag with contour. The dilation is used in

Table 3. Selected tools for the first example.

Rough milling			Finish milling
Area	Type	D (mm)	D (mm)
1	B	-	0.0157
2	C	0.1500	-
3	C	0.3499	-
4	CB	0.3999	-

this piece because the surface to remove is external to the desired geometry. Figure 10(a) depicts a contour of the piece and its respective machining approximation using a CB tool whose machined area is marked with label “4.” Figure 10(b) shows the contour and a machining approximation with a C tool, whose machined area is marked with label “3.” Figure 10(c) shows the machined area marked with label “2.” In this way, the piece finally machined with a B tool is shown in Figure 10(d). Figure 10(e) depicts the final workpiece obtained. In Table 3, parameters of cutting tool selected by the proposed method can be seen.

The second piece is shown in Figure 11. In this case, the piece is machined using zig-zag with contour and

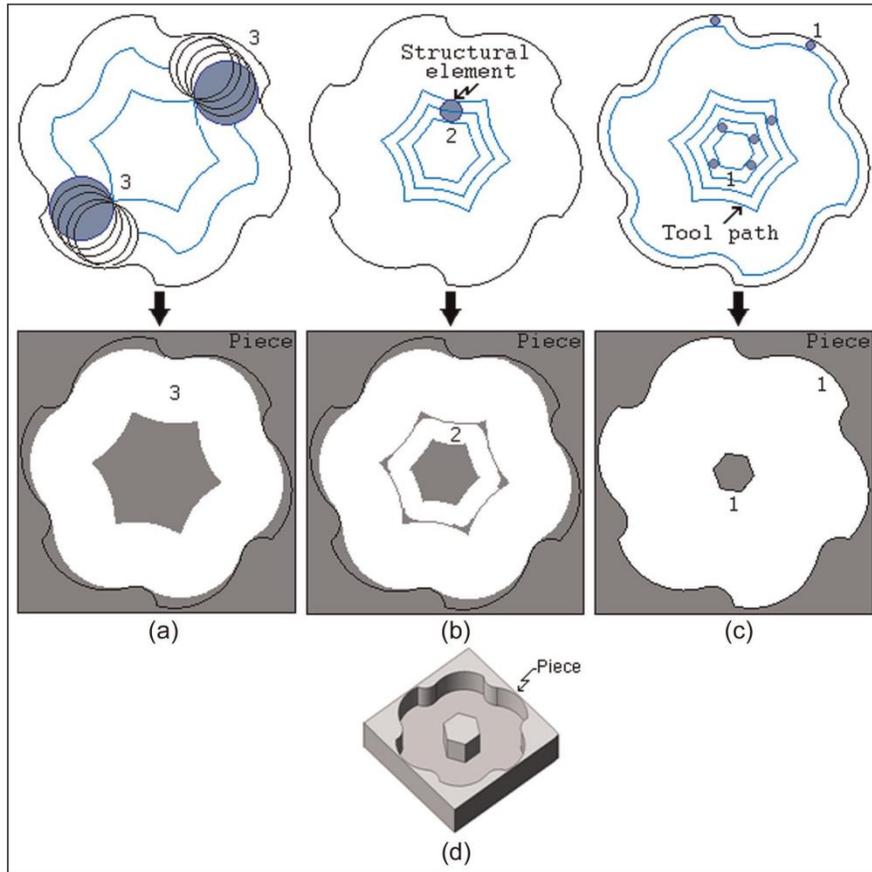


Figure 11. Tool selection for second piece using zig-zag with contour.

Table 4. Selected tools for second example.

Rough milling			Finish milling
Area	Type	D (mm)	D (mm)
1	B	–	0.0157
2	C	0.2000	–
3	C	0.3999	–

Table 5. Selected tools for third example.

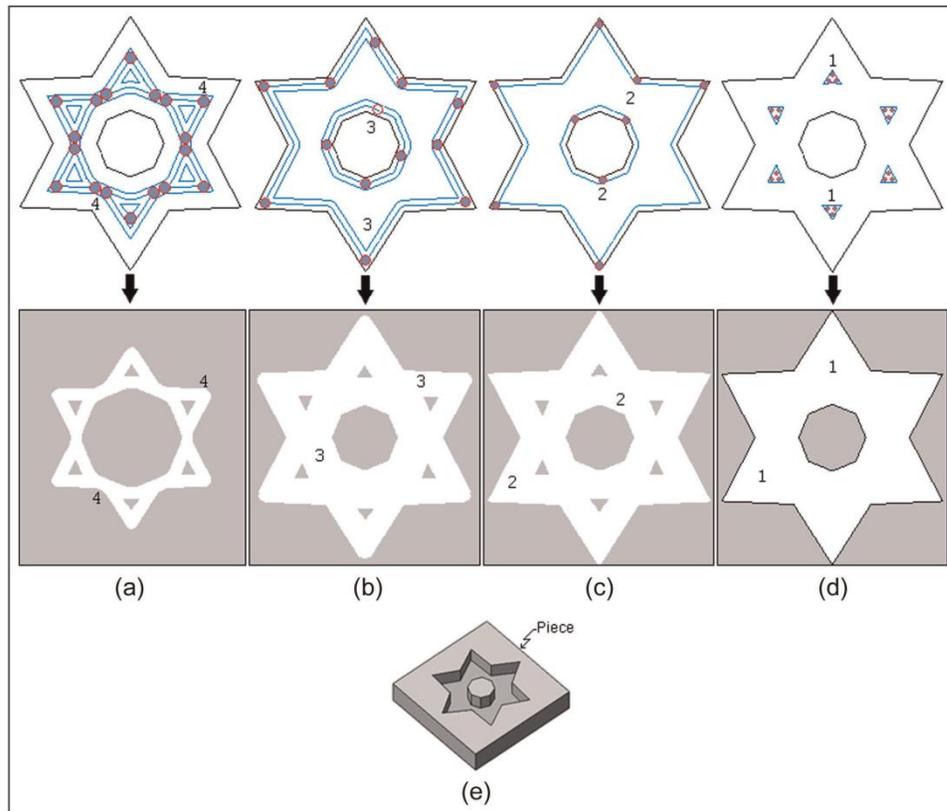
Rough milling			Finish milling
Area	Type	D (mm)	D (mm)
1	B	–	0.0157
2	C	0.0499	–
3	C	0.1500	–
4	D	0.5999	–

boundaries. An erosion operation, to select the tool automatically, is applied because the surface to remove the pixels is internal to the desired geometry. The three contours and approximations of machining with different tools marked with labels “3,” “2” and “1” are depicted in Figure 11(a)–(c), respectively. Finally, Figure 11(d) depicts the machined piece. Table 4 shows the parameters of the three different tools selected by the method.

Finally, Figure 12 describes the third example, machined with rough mill using zig with contour. For

automatically selecting the tool, erosion is used according to the geometry of the piece. As Table 5 shows, the rough milling uses tools C, C and D with areas marked with labels “2,” “3” and “4,” respectively. The finish milling uses a B tool with area marked with label “1.” The rough milling is made in Figure 12(a)–(c) with respective tools selected. Figure 12(d) shows the finish milling and Figure 12(e) shows the final piece.

The developed software is shown in Figure 13. It was developed in Microsoft Visual C++ 2010 and tested



**Figure 12.** Tool selection for third piece (rough mill using zig with contour).

with 2D and 2.5D images generated in any CAD software and exported to DXF file.

### Conclusion

In this article, a new method for automatic tool selection based on the shape, using special image processing techniques of directional morphological approaches for CNC milling machines, has been developed. The main contribution of this work is the new methodology for automatic tool selection, which consists of obtaining and converting a DXF file (in order to diminish errors) into a gray-scale BMP file, after the image is converted into a binary image, aiming at detecting and labeling the gradient and perimeter of the piece. Afterward, the tool size is taken from a database, selecting the more useful tool to machine the piece, utilizing an algorithm based on residues of pixel. Finally, mathematical morphologies for tool path generation strategy are carried out. The application of the proposed

method implies advantages such as reduction of complex mathematical models, error reduction in cutting tool selection process, no necessity of a priori knowledge, speed and ease of use, and it also represents a practical way to simulate the process. Moreover, it can be suitable for other machining processes. In order to show the effectiveness of the proposed methodology, three pieces including common and important machining operations were evaluated. The calibrated system achieves a resolution of  $1\ \mu\text{m}$ , and according to the results, each piece can be processed in less than 1 s with an error of approximately 0.2%. In this sense, feasibility and reliability of the proposed method have been demonstrated. Furthermore, it can be applied in real processes, since it is based on standardized information (DXF file) available in most CAD/CAM commercial software.

### Declaration of conflicting interests

The authors declare that there is no conflict of interest.

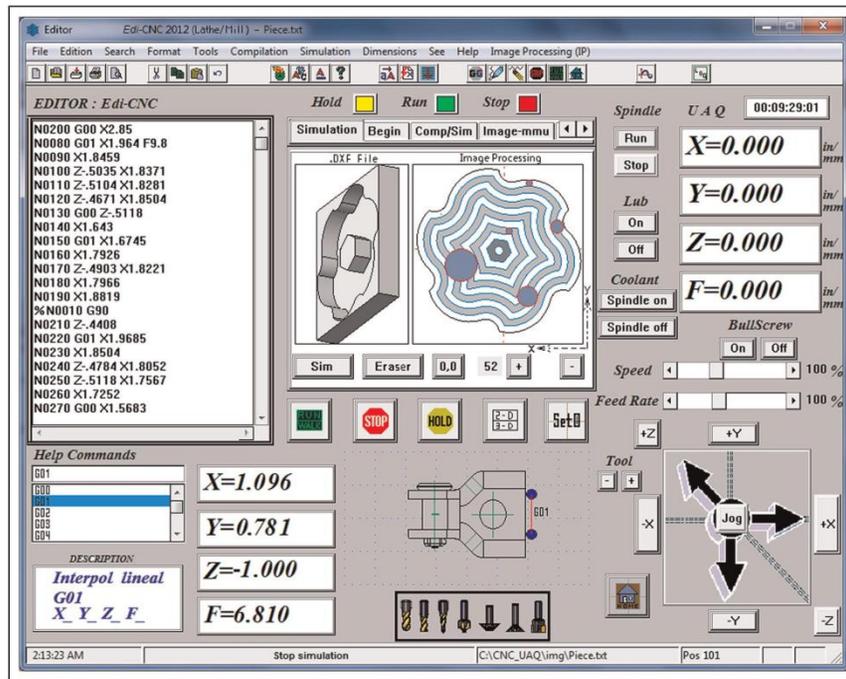


Figure 13. Final software for automatic tool selection.

### Funding

This article was financially supported by UAQ and financially by CONACYT (grant number 209333).

### References

- Mekid S, Pruschek P and Hernandez J. Beyond intelligent manufacturing: a new generation of flexible intelligent NC machines. *Mech Mach Theory* 2009; 44: 466–476.
- Rodriguez-Donate C, Romero-Troncoso RJ, Garcia-Perez A, et al. FPGA based embedded system for induction motor failure monitoring at the start-up transient vibrations with wavelets. In: *Proceedings of the IEEE 3rd international symposium on industrial embedded systems (SIES'08)*, Le Grande Motte, France, 11–13 June 2008, pp.208–214.
- Eladawi AE, Gadelmawla ES, Elewa IM, et al. An application of computer vision for programming computer numerical control machines. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 2003; 217: 1315–1324.
- Siller HR, Vila C, Rodriguez CA, et al. Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools. *Int J Adv Manuf Tech* 2009; 40: 12–25.
- Sarma PMMS, Karunamoorthy L and Palanikumar K. Surface roughness parameters evaluation in machining GFRP composites by PCD tool using digital image processing. *J Reinf Plast Comp* 2009; 28: 1567–1585.
- Gadelmawla ES, Eladawi AE, Abouelatta OB, et al. Application of computer vision for the prediction of cutting conditions in milling operations. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 2009; 223: 791–800.
- Ahmad Z, Rahmani K and D'Souza RM. Applications of genetic algorithms in process planning: tool sequence selection for 2.5-axis pocket machining. *J Intell Manuf* 2010; 21: 461–470.
- Osornio-Rios RA, Romero-Troncoso RJ, Herrera-Ruiz G, et al. Computationally efficient parametric analysis of discrete-time polynomial based acceleration–deceleration profile generation for industrial robotics and CNC machinery. *Mechatronics* 2007; 17: 511–523.
- Morales-Velazquez L, Romero-Troncoso RJ, Osornio-Rios RA, et al. Open-architecture system based on a reconfigurable hardware–software multi-agent platform for CNC machines. *J Syst Architect* 2010; 56: 407–418.
- Ramaswami H, Shaw RS and Anand S. Selection of optimal set of cutting tools for machining of polygonal pockets with islands. *Int J Adv Manuf Tech* 2011; 53: 963–977.
- Lim T, Corney J, Ritchie JM, et al. Optimizing tool selection. *Int J Prod Res* 2001; 39: 1239–1256.
- Maros T, Vladimir B and Caner TM. Monitoring chenille yarn defects using image processing with control charts. *Text Res J* 2011; 81: 1344–1353.
- Astakhov VP. *Geometry of single-point turning tools and drills: fundamentals and practical applications*. 1st ed. Springer, 2010, 565: 1.
- Smid P. *CNC programming handbook*. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 2003, 304: 1.
- Tufoi M, Vela I, Marta C, et al. Optimization of withdrawing cylinder at vertical continuous casting of steel using CAD and CAE. *Int J Mech* 2011; 5: 10–18.

16. Chung C and Peng Q. The selection of tools and machines on web-based manufacturing environments. *Int J Mach Tool Manu* 2004; 44: 317–326.
17. Bithika MG and Datta AK. Detecting defects in fabric with laser-based morphological image processing. *Text Res J* 2000; 70: 758–762.
18. Barone S, Berghini M and Bertini L. Grid pattern for in-plane strain measurements by digital image processing. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 2001; 36: 51–59.
19. Kekre HB, Thepade S, Mukherjee P, et al. Image retrieval with shape features extracted using gradient operators and slope magnitude technique with BTC. *Int J Comput Appl T* 2010; 6: 28–33.
20. Jing L, Peikang H, Xiaohu W, et al. Image edge detection based on beamlet transform. *J Syst Eng Electron* 2009; 20: 1–5.
21. Ming LC and Akul J. *UNIGRAPHICS-NX5*. Rolla, MO: University of Missouri, [http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5\\_tutorial.pdf](http://www-cad.fnal.gov/UG-NX5_tutorial.pdf) (accessed 25 November 2011).
22. Gibbs and Associates. A Cimatron company 2.5D Solids GibbsCAM 2009. April 2009, rev. 1.2, <http://www.wilyguy.net/portfolio/pdfs/docs/2.5D%20Solids.pdf>
23. Zhao Y, Ridgway K and Al-Ahmari AMA. Integration of CAD and a cutting tool selection system. *Comput Ind Eng* 2002; 42: 17–34.
24. Kindratenko V. *Development and application of image analysis techniques for identification and classification of microscopic particles*. PhD Thesis, University of Antwerp, Belgium, 1997, pp.1–6.
25. Mejia-Ugalde M, Dominguez-Gonzalez A, Trejo-Hernandez M, et al. New approach for automatic tool selection in computer numerically controlled lathe by applying image processing. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 2012; 226: 1298–1308.
26. Loncaric S. A survey of shape analysis techniques. *Pattern Recogn* 1998; 31: 983–1001.
27. Chen T-H, Chang W-T, Shen P-H, et al. Examining the profile accuracy of grinding wheels used for microdrill fluting by an image-based contour matching method. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 2010; 224: 899–911.
28. Carpenter ID and Maropoulos PG. Automatic tool selection for milling operation, part 2: tool sorting and variety reduction. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 2000; 214: 283–292.
29. Yuwen S, Fei R, Xinghua Z, et al. Contour-parallel offset machining for trimmed surfaces based on conformal mapping with free boundary. *Int J Adv Manuf Tech* 2012; 60: 261–271.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA



Ref. 872

**M. I. Mario Mejia-Ugalde**  
Universidad Autónoma de Queretaro  
**PRESENTE**

Estimado M. I. Mejia-Ugalde

La evaluación del artículo "Teclado con protocolo de comunicación universal aplicado a máquina de CNC " cuyo autor es usted, ha concluido.

Tenemos el agrado de informarle que dicho artículo ha sido aceptado en su forma actual para su publicación en la Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología.

Una vez que se tenga definido el volumen y número en el cual se publicará su artículo, le informaremos vía correo electrónico para iniciar el proceso de publicación (pruebas de galera, revisiones, correcciones y firma y cesión de derechos).

Agradecemos su colaboración con la Revista Ingeniería Investigación y Tecnología y esperamos publicar algún otro de sus artículos en el futuro.

Atentamente:  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Ciudad Universitaria, 5 de abril de 2013.

**M. C. MARCIA A. GONZÁLEZ OSUNA**  
Directora Técnica y Editora

## Teclado con protocolo de comunicación universal aplicado a máquina de CNC

### *Keyboard with Universal Communication Protocol Applied to CNC Machine*

Mejía-Ugalde Mario  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro  
Correo: mmu92@hotmail.com

Información del artículo: recibido: noviembre de 2012, reevaluado: febrero de 2013, aceptado: abril de 2013

#### Resumen

Este artículo, describe el uso de un protocolo de comunicación universal para teclado industrial basado en un microcontrolador aplicado a una máquina de *control numérico por computadora* (CNC). La diferencia principal entre los fabricantes de teclados es que cada fabricante tiene su propia programación de código fuente, produciendo un protocolo de comunicación diferente, generando una interpretación inadecuada de las funciones establecidas. Lo anterior crea que los teclados comerciales industriales sean costosos e incompatibles en su conexión con diferentes máquinas. En el presente trabajo el protocolo permite conectar el teclado universal diseñado y un teclado normal de la PC al mismo tiempo, este es compatible con todas las computadoras a través de la comunicación USB, AT o PS/2, para emplearse en máquinas de CNC, con extensión a otras máquinas como robots, soplado, máquinas de inyección, entre otras. Entre las ventajas de este diseño se encuentran: la fácil reprogramación, disminución de costos, manipulación de diversas funciones de máquina y facilidad de expandir las señales de entrada y salida. Los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento fueron satisfactorios, debido a que cada tecla tiene la facilidad de programarse y reprogramarse de diferentes maneras, generando distintas funciones de códigos, dependiendo de la aplicación donde se requiera utilizar.

#### Descriptores:

- microcontrolador
- teclado
- USB
- AT
- PS/2
- protocolo

### Abstract

*This article describes the use of a universal communication protocol for industrial keyboard based microcontroller applied to computer numerically controlled (CNC) machine. The main difference among the keyboard manufacturers is that each manufacturer has its own programming of source code, producing a different communication protocol, generating an improper interpretation of the function established. The above results in commercial industrial keyboards which are expensive and incompatible in their connection with different machines. In the present work the protocol allows to connect the designed universal keyboard and the standard keyboard of the PC at the same time, it is compatible with all the computers through the communications USB, AT or PS/2, to use in CNC machines, with extension to other machines such as robots, blowing, injection molding machines and others. The advantages of this design include its easy reprogramming, decreased costs, manipulation of various machine functions and easy expansion of entry and exit signals. The results obtained of performance tests were satisfactory, because each key has the programmed and reprogrammed facility in different ways, generating codes for different functions, depending on the application where it is required to be used.*

#### Keywords:

- microcontroller
- keyboard
- USB
- AT
- PS/2
- protocol

### Introducción

El teclado es uno de los elementos más importantes dentro de la automatización de maquinaria, por medio de este, el operador introduce las órdenes de trabajo que la máquina debe realizar o el usuario puede editar el programa general que controla la máquina. Sin embargo, en el mercado existe una gran variedad de fabricantes de teclados industriales, y cada uno tiene una forma diferente de comunicar sus teclados a las máquinas, en algunos casos se tienen que instalar controladores especiales al ordenador para que pueda admitirlo o reconocerlo al conectarlo y muchas veces estos teclados no son compatibles entre sí, es decir, en caso de que un teclado ya instalado falle, no se podrá reemplazar por otro de diferente fabricante, ya que no suelen tener la misma configuración del protocolo de comunicación (García, 2009).

De acuerdo con los avances tecnológicos, la industria de procesos requiere sistemas con mayor cantidad de elementos o mecanismos que puedan controlarse de una forma más fácil, confiable y eficaz; por esta razón, se pensó en dispositivos más autónomos como es el uso de microcontroladores y la PC para el control. En el mercado encontramos diferentes fabricantes de teclados como son: Rafi, Schurter, Click Touch, Storm, Beltronic, Indukey, Siemens, Devlink, Ikey, Hitra, Hid y Cti; sin embargo, aunque existen algunas innovaciones y diseños nuevos de teclados en el mercado, es difícil

encontrar el específico para un proceso u automatización.

### Estado del arte

La evolución de los teclados a lo largo de la historia ha cambiado notablemente en las áreas didácticas e industriales (Li, 2006).

Dentro de los trabajos realizados con respecto a los teclados, encontramos algunos artículos como el caso de Varela (2002), quien realiza un teclado matricial de 70 casillas, lo que significa que superó el tamaño estándar de 64 casillas (102 teclas) con la intención de obtener teclas adicionales con funciones específicas; en su trabajo el microcontrolador PIC16F84A fue insuficiente por el número reducido de pines (Manual, 2001) según el manual del microcontrolador y decidió utilizar el microcontrolador PIC16F873A. Domínguez *et al.* (1991) determinaron que la forma más común para reducir el número de líneas necesarias para la conexión en un teclado es una matriz. En cuanto a protocolos de comunicación encontramos el artículo de Suárez *et al.* (2005) quienes desarrollaron una interfaz de comunicación con la computadora a través del puerto USB con la alternativa de hacerlo a través del puerto serie RS232 basados en el Microprocesador MSP430F155.

Por otra parte Li (2006), presentó la realización de un teclado móvil inalámbrico aplicado a la industria, muestra que se puede llevar a cabo un dispositivo mó-

Nombre del teclado	Aplicación	Fabricante	Precio + Conexiones
FlexOhm flexible keyboards (teclado flexible a la resistencia)	Máquinas electrostáticas y generación de energía	Click Touch	\$ 4,700
Vandal-proof keypads (teclado de banda)	Máquinas transportadoras	Schurter	\$ 5,000
Electroluminescent lamps keyboards (teclado equipado con lámparas electro-luminiscentes)	Estudios de revelado	Devlink	\$ 6,200
Touch Screens keyboards (teclado táctil en pantalla)	Fabricación de productos tóxicos	Indukey	\$ 6,500
Industrial plastic keyboards (teclado industrial para plásticos)	Máquinas de inyección y soplado	Click Touch	\$ 4,400
Force sensors keyboards (CFSK) (teclado de sensor de fuerza)	Siderurgia y fundición	Siemens	\$ 5,200
Contact layers keyboards (teclado de contacto en capa)	Fabricación de cristales	Hid	\$ 3,800

Tabla 1. Características de los teclados comerciales

vil usando solamente una mano o un indicador como entrada de datos, pero la única desventaja es que utilizó un emisor y un receptor, por lo que su protocolo de comunicación puede funcionar solo para algunas máquinas. Navabi (2004), presenta comunicación serial de un núcleo de código (CORE) del teclado sobre el chip de Altera MAX 700 series EPM7128S PLD en VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*, lenguaje de descripción de hardware para circuitos de alta velocidad). Dogan (2006), mediante la integración de los PLD's (*Programmable Logic Device*, dispositivo lógico programable) en micro, presentó la realización de un decodificador para el código ASCII realizado en display alfanumérico y elaborado para visualizar los caracteres o números ingresados por el teclado, que opera como dispositivo de entrada para un CORE (decodificador de ASCII a display alfanumérico); Peng y En-Ping (2011), desarrollaron un teclado reuniendo varias letras o código de ellas en una sola tecla con el método llamado CyberSwarm.

La tabla 1 muestra una lista de fabricantes que ofrecen diferentes tipos de teclados para aplicaciones específicas, ocasionando que algunas industrias cambien su sistema de control para adecuarse a ese teclado y conexiones; generando con esto un incremento en el costo. A pesar de la diversidad de los teclados, la desventaja que se tiene radica en el requerimiento de accesorios adicionales y la interconectividad con todos los equipos. Por esta razón se desarrolla la siguiente investigación.

### Propuesta general

Lo novedoso de este proyecto es que ofrece un teclado con ciertas características o ventajas respecto a los

comerciales en dos partes: interfaz con el usuario y funciones adicionales. La primera, permite la conexión directa mediante el protocolo de comunicación USB, AT o PS/2 en todos los ordenadores, sin la necesidad de instalar controladores y software especiales. La segunda, se adapta al tipo de proceso que se requiere automatizar usando funciones adicionales; esto quiere decir que si cambia o aumenta el número de herramientas o componentes en la máquina solo se necesita una sencilla reprogramación en el protocolo, logrando con esto su fácil control.

Teniendo un teclado universal se podrá aplicar en cualquier máquina automatizada, lo único que se necesita cambiar serán las funciones específicas de algunos caracteres para las diferentes actividades de cada máquina; y para su fabricación se utilizarán circuitos integrados programables (PIC) que no son costosos (entre \$80 y \$100) de fácil programación.

Dentro de las funciones adicionales de este proyecto se pueden programar y reprogramar las teclas para realizar movimientos especiales y generar caracteres aplicados a diferentes actividades en cada máquina. Este nuevo diseño cuenta con funciones especiales que son útiles en los procesos de maquinado para evitar que cada vez que se reemplaza un teclado comercial por otro, se tenga que cambiar la configuración de los códigos que la máquina tiene programada.

### Desarrollo

La figura 1 muestra el diagrama general de protocolo de comunicación universal para teclado industrial basado en microcontrolador, el microcontrolador permite la comunicación entre el teclado de la PC y el teclado industrial hacia la computadora mediante el puerto

USB o PS/2 (Chung y Chih, 2007), el conector PS/2 se muestra en la figura 2 con los conectores típicos de teclados: el conector de 5-pines (AT) y el mini-dinamero de 6-pines (PS/2). Ambos conectores transmiten en forma serial los datos y son por completo (eléctricamente) similares, la única diferencia práctica entre los dos es el arreglo de pines y el tamaño; esto significa que los dos tipos de conectores se pueden cambiar fácilmente con los adaptadores hard-wired simples.

En la figura 2 se presenta el protocolo típico para transmisión de datos en teclados, donde la frecuencia del reloj es de 10 a 16.7 KHz. La transmisión de un bit se realiza en la transición positiva del reloj y el dato es enviado dentro de 11 transiciones del reloj. La información se envía desde el teclado de forma serial usando 11 bits sobre la línea de datos bi-direccional, la línea de datos permanece inactiva (nivel bajo) cuando ni el teclado ni el computador envían datos. El tiempo de transición de un pulso positivo a negativo de los datos debe ser por lo menos  $5\mu s$  (García, 2009), el tiempo de una transición de datos que baja, debe ser por lo menos  $5\mu s$  y no mayor que  $25\mu s$ . El tiempo de

datos de transmisión puede inhibir la comunicación en cualquier momento usando la línea hacia abajo del reloj, por lo menos  $100\mu s$ . Si una transmisión se inhibe antes de 11 pulsos del reloj, el dispositivo debe abortar la transmisión actual y prepararse para retransmitir el dato actual. Por ejemplo, si se interrumpe un teclado mientras envía el segundo paquete de 8 de un código de dos bits, necesitará retransmitir ambos octetos de ese código.

El protocolo de comunicación implementado sigue las reglas que permiten llevar a cabo la comunicación según Chung y Chih, (2007) para este dispositivo mediante el puerto físico USB, AT o PS/2 mostrado en la figura 2.

El diagrama a bloques de la figura 3 muestra el protocolo de comunicación que se realizó modificando los protocolos de comunicación existentes para teclado (estructura matricial), pero manteniendo las mismas conexiones y conectores mostrados en la figura 1. El protocolo se genera en las siguientes etapas: *escaneo de teclas y convertidores serie-paralelo* que se logra por medio de una señal de activación mandada desde el microcon-



Figura 1. Diagrama general de protocolo de comunicación universal

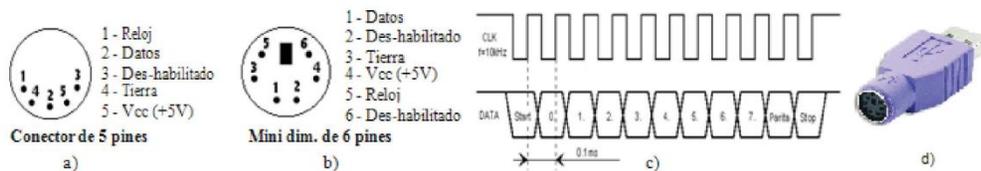


Figura 2. Conectores a) AT, b) PS/2, c) transmisión de datos y d) adaptador PS/2 a USB

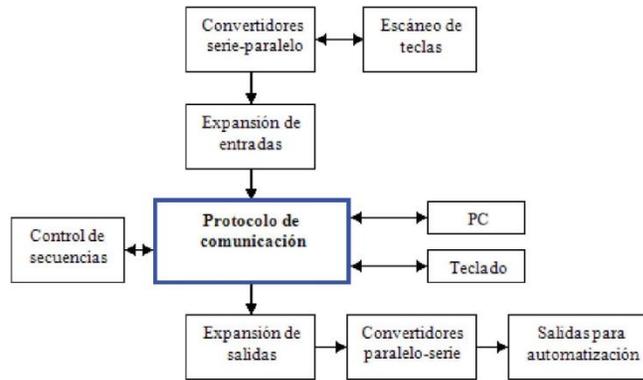


Figura 3. Diagrama a bloques del protocolo de comunicación

trolador cada 20 ms activando todos los circuitos integrados 74LS166 (convertidores serie-paralelo en donde las entradas son de 8 bits y el corrimiento de 1 bit), adquiriendo cada circuito las señales de 8 bits provenientes de las teclas que posteriormente con una señal de reactivación pasan los datos uno a uno en forma serial. El bloque de *expansión de entradas* realiza un corrimiento de forma serial sincrónico hacia el microcontrolador y hacia el protocolo de comunicación.

El módulo *protocolo de comunicación* permite la comunicación bi-direccional del teclado con la computadora. Este a su vez, puede estar conectado al ordenador (PC) que al mismo tiempo está conectado a un teclado normal. En el bloque *control de secuencias* se encuentra el microcontrolador, el cual realiza ciertas funciones de secuencia y control. *Expansión de salida*, este bloque se realizó por medio de los circuitos integrados 74LS199 (convertidores paralelo-serial, el corrimiento de entradas es de 1 bit y las salidas de 8 bits) en donde las salida puede ser desde 8 hasta n salidas (García, 2009). *Salidas para automatización* (Ramírez et al., 2011), es la última etapa digital para la automatización o para fines deseados, aquí es donde se requiere de un opto-acoplamiento si la aplicación necesita que la información sea transmitida entre dos circuitos eléctricamente aislados uno de otro. Este aislamiento se puede conseguir mediante relevadores, transformadores de aislamiento y receptores de línea. No obstante, otro dispositivo que se utiliza de manera igualmente efectiva para resolver estos problemas (Kangbin, 2008; Ramírez, 2011) es el opto-acoplador, su empleo es muy importante en aplicaciones en las que el aislamiento de ruido, alta tensión y el tamaño son características determinantes.

En la figura 4 se presenta de manera más detallada la funcionalidad del teclado implementado que consta

de tres módulos de registros serie-paralelo, cada uno de 8 entradas digitales, la conexión directa bidireccional del ordenador al microcontrolador y de éste al teclado normal; un módulo para expandir entradas, otro para las salidas, y el último módulo usado industrialmente para la automatización y control.

La figura 5 muestra las diferentes estructuras digitales programadas en el microcontrolador como son: *un contador módulo 3*, encargado de activar las líneas de selección de los multiplexores, *dos multiplexores de 7 a 1* usados para dirigir los bits uno a uno hacia la base de datos, para su posterior almacenamiento, *una compuerta xor* que es una segunda selección de datos antes de llegar a la base de las teclas y códigos, *una base de datos y código de teclas* donde se unen los 8 bits en 20 ms y se da el formato y código de la tecla oprimida, *un búfer circular* (Kangbin, 2008) donde se realiza la comparación de los paquetes de 8 bits en tres columnas, como lo muestra la tabla 2; si uno de estos paquetes cambia con relación al que se encuentra en el búfer, este entrará al búfer reemplazando el anterior y se sincroniza el microcontrolador mediante *máquinas de estado*.

Una compuerta XOR es un arreglo de tres compuertas básicas AND, OR y NOT que produce una salida '1' lógico si sus entradas son diferentes, se emplea un bloque digital XOR asíncrono para verificar qué tecla(s) se ha(n) activado, para llevar este proceso se toman los valores que contienen los estados actuales y anteriores de las teclas, proporcionados por los registros Q1 y Q2, al aplicar la operación XOR se genera una bandera de activación de la *tecla presionada* (TPS), cabe mencionar que los datos para cada tecla son transmitidos por la línea con etiquetas Q1 y M1 generando la *tecla de los datos internos* (TDI).

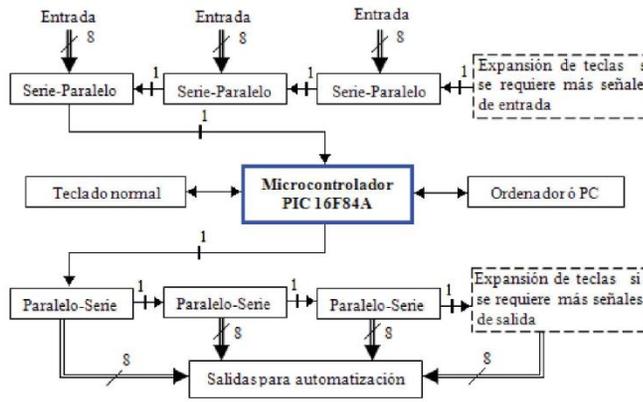


Figura 4. Diagrama funcional del protocolo de comunicación

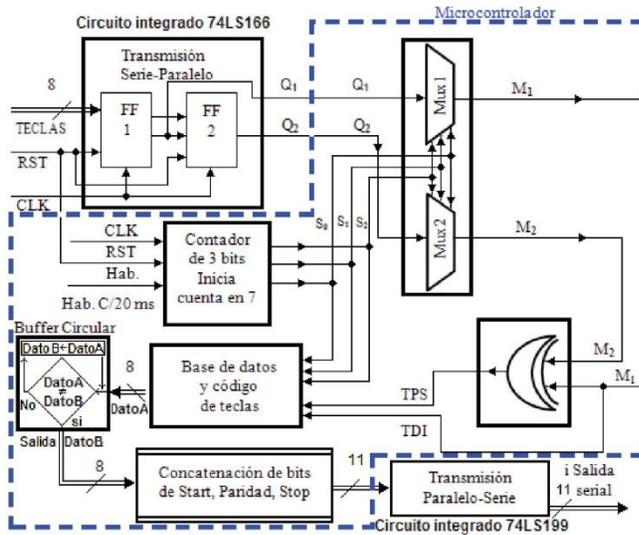


Figura 5. Estructuras digitales programadas en el microcontrolador

Dato A	Dato B	Condición	Salida
Dato A[0]=dato 0	Dato B[0]=dato 0	Si, dato A =dato B entonces	No
Dato A[1]=dato 9	Dato B[1]=dato 7	Si, dato A ≠ dato B entonces	Dato B
Dato A[2]=dato 2	Dato B[2]=dato 2	Si, dato A = dato B entonces	No
Dato A[3]=dato 3	Dato B[3]=dato 3	Si, dato A = dato B entonces	No
Dato A[4]=dato 9	Dato B[4]=dato 8	Si, dato A ≠ dato B entonces	Dato B
Dato A[5]=dato 4	Dato B[5]=dato 4	Si, dato A = dato B entonces	No
Dato A[6]=dato 5	Dato B[6]=dato 5	Si, dato A = dato B entonces	No
Dato A[7]=dato 6	Dato B[7]=dato 6	Si, dato A = dato B entonces	No
Dato A[8]=dato 8	Dato B[8]=dato 8	Si, dato A = dato B entonces	No

Tabla 2. Búfer circular

La tabla 3 muestra el programa principal que comienza escalando el reloj para estar sincronizados los datos al realizar la transmisión o recepción de datos con una velocidad de 12 a 20khz, el arranque o reinicio de la máquina, la presencia de datos con el escáner de teclas que identifica qué tecla presiona y genera el método de envío, recepción o almacenamiento de los datos detectados.

La tabla 4 muestra el programa de escaneo de teclas la cual identifica qué tipo de proceso se está llevando a cabo, recepción, transmisión o almacenamiento y gene-

rar las banderas necesarias para saber qué tipo de función se realiza, si la PC baja el reloj (cero lógico) la PC transmite y el teclado recibe, si el teclado baja el reloj (cero lógico) entonces el teclado transmite y la PC recibe los datos.

La tabla 5 muestra la identificación y concatenación de la tecla que está presionada, la concatenación es el almacenamiento y el orden de los bits.

El control de tecla se muestra en la tabla 6, y esta permite saber los tiempos que una tecla se está presionando y a su vez saber si se está enviando o recibiendo datos.

```

Programa principal (recep , star_stop, ban_r, aux, cont, clk2, estado_proximo, rst)
reducción (clk, b, rst) %genera la velocidad de transmisión de datos
If presencia (ack, recep, sal2, clk0, tecla_auxiliar, star_stop, ban_r) then
    escaneo_de_teclas (in_micro_clk, cuenta, in_micro_dato, start )
    if ACK_contestacion (clk2, ack_recepcion, ack_cuenta, star_ack) then
        swich (ack_recepcion)
        caso 0 is %Transición
        Control_de_transmision (Inicio_de_trasmision, Fin_de_trasmision)
        Envio de datos (clk_Pc_bi, dato_Pc_bi, dato0, dato1, dato2, dato3... dato9)
        Caso 1 is %Recepción
        condiciones_d_recepcion (tecla, dato_0, dato_1 , dato_2, dato_3, dato_4,
        dato_5,
        Envio de datos (clk_Pc_bi, dato_Pc_bi, dato0, dato1, dato2, dato3... dato9)
        Caso 2 is %Envío
        condiciones_d_envio (tecla_auxiliar)
        Envio de datos (clk_Pc_bi, dato_Pc_bi, dato0, dato1, dato2, dato3... dato9)
        End swich;
    End if;
End if;

```

Tabla 3. Programa principal

```

escaneo_de_teclas (in_micro_clk, cuenta, in_micro_dato, start )
begin
  if (falling_edge(in_micro_clk)) then % Inicializa
    if cuenta=="00000" and in_micro_dato=="0" then %Espera bit start
      start='1'; Inicio_de_trasmision = '1';%inicia todo%Habilitador1 del 74245
      star_stop = '0';
    end if; if start=='1' then
      Inicio_de_trasmision='1'; %Habilitador1 del 74245
      registro = in_micro_dato & registro(8 downto 1); %guarda datos(letra) en
      registro
      if cuenta=="01000" then %límite de datos 11
        star_stop='1'; dato_out=registro(8 downto 1);%manda el dato a la
        salida
      end if;
    end if;
  end if;
end;

```

Tabla 4. Identificación de la tecla presionada

```

%concatenación de la tecla escaneada (formato)
%D10=1 D9 D8 D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0=0
% stop paridad D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 star
concat_comercial(0) = '0'; %bit de star
concat_comercial(8 downto 1) = dato_out(7 downto 0); %bits de datos
concat_comercial(9) = not(dato_out(0) xor dato_out(1) xor dato_out(2) xor dato_out(3) xor dato_out(4) xor
dato_out(5) xor
dato_out(6) xor dato_out(7)); %bit de paridad
concat_comercial(10) = '1'; %bit de stop
tecla_presionada_dato(tecla_auxiliar3, ack, recep, si_ban, sal, ban_r, star_stop, concat_comercial, teclaF,
tecla1)
begin %identificación de tecla (teclado fabricado) % Bandera de recepción,
  if tecla1=='1' then sal = "10000101100"; % número 1
    aux = '1'; Led="11111001"; end if;
  if teclaF=='1' then sal = "11001010110"; aux = '1'; % tecla F
  if (si_ban == '1') then aux = '1'; else % espera para imprimir el primer carácter
    aux = '0'; % resetea el búfer de datos a enviar
  end if; end if;
end;

```

Tabla 5. Detección de tecla presionada

```

presencia (ack, recep, sal2, clk0, tecla_auxiliar, star_stop, ban_r)
begin %tecla presionada fabricado
  if ((sal2 /= "1111111111") and (clk0 == '1')) then
    tecla_auxiliar = sal2; if (star_stop == '1') then rst = '0'; end if; %teclado comercial
  if (ban_r == '1') then rst = '0'; end if; %teclado fabricado
  if (recep == '1') then rst = '0'; end if; %teclado fabricado
  if (ack == '1') then rst = '0'; end if;
  else tecla_auxiliar = tecla_auxiliar; rst = '1'; end if; %retiene el dato a enviar
end;

```

Tabla 6. Control de la tecla

La tabla 7 permite enviar los datos de manera serial por el puerto PS/2 en tiempos iguales cuando la bandera `tecla_auxiliar` esta activada.

La tabla 8 envía los datos, pero aquí se reconoce qué dato se envía, por medio de un contador de 11 bits y banderas activadas.

La tabla 9 recibe el dato que transmite la computadora al teclado, si la computadora envía un error o está ocupada haciendo otro proceso, el teclado industrial le pide al búfer circular que reenvíe los datos.

Cuando una computadora inicia el proceso de arranque o de reinicio, esta envía datos de reconocimiento a todos los periféricos (teclado, mouse, escáner, pantalla, entre otros); estos periféricos deben recibir los datos almacenarlos e identificarlos para después con-

testarle a la computadora (PC). En la tabla 10 se muestra este proceso.

La tabla 11 identifica qué dispositivo está transmitiendo o recibiendo datos mediante un detector o bandera.

La transmisión de datos de la computadora al teclado y viceversa se realiza a una velocidad de reloj de 1 a 12 khz, si no se envían estos datos a esa velocidad la computadora no podrá almacenarlos, ocasionando un error o que no reconozca el dispositivo (teclado); para esto existe un código fuente mostrado en la tabla 12 para bajar o incrementar la frecuencia de reloj dependiendo del cristal de cuarzo o la velocidad de envío del microcontrolador.

```
condiciones_d_envio (tecla_auxiliar)
begin    %cambio de variable par enviar
    dato0= tecla_auxiliar(0); dato1= tecla_auxiliar(1); ...dato10= tecla_auxiliar(10);
end;
```

Tabla 7. Control de envío

```
%contador de 11 bits iguales (22 diferentes) para enviar 11 datos
Envío de datos (clk_Pc_bi, dato_Pc_bi, dato0, dato1... , dato10 )
begin    swich (ban='1') %existe dato para enviarse
    case 0 is
        clk_Pc_bi='Z';    %alta impedancia dato_Pc_bi='Z'; %bit de star
        clk0='0'; %habilitación Fin_de_transmicion='1'; Recepcion='0';
        case 0 is %envía dato0, dato1...
end;
```

Tabla 8. Envío de datos

Tabla 9. Recepción de datos

```
condiciones_d_recepcion (tecla, dato_0, dato_1, dato_2, dato_3, dato_4, dato_5, dato_6, dato_7, dato_8, dato_9,
dato_10)
begin %cambio de variable par enviar %ACK Stop P D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0
    tecla(0)=dato_0; tecla(1)=dato_1; tecla(2)=dato_2; tecla(3)=dato_3; tecla(4)=dato_4; tecla(5)= dato_5;
    tecla(6)=dato_6; tecla(7)=dato_7; tecla(8)=dato_8; tecla(9)=dato_9; tecla(10)=dato_10;
    if (tecla="01111101101") then tecla_aux="1111110100"; end if;%( ACK)
end;
```

```
ACK_contestacion (clk2, ack_recepcion, ack_cuenta, star_ack)
begin
    if (rising_edge(clk2)) then;%ACK bandera contestación
        if ack_cuenta="00000" and ack_recepcion='1' then star_ack='1' end if;
        if (star_ack='1') then if ack_cuenta="00010" then ack='1'; end if;
        if ack_cuenta="00011" then ack_cuenta="00000";star_ack='0'; ack='0';

        else ack_cuenta= ack_cuenta + 1; end if;
    end if;
end if;
end;
```

Tabla 10. Contesta los datos a la PC

Tabla 11. Determina quién está transmitiendo o recibiendo

```

Control_de_trasmision (Inicio_de_trasmision, Fin_de_trasmision)
begin
  if (Inicio_de_trasmision='1' or Fin_de_trasmision='1') then out_ban_detector_clk= '1';
  else out_ban_detector_clk = '0'; end if;
end;

```

Tabla 12. Baja la frecuencia de 50 Mhz a 12khz

```

reduccion (clk, b, rst)
Begin
  if (rst='0') then   clk2='1';
  elsif (rising_edge(clk)) then  b=b+1;
    if b=1 then clk2='0'; end if;
    if b=2000 then clk2='1'; end if;
    if b=4000 then b=0; end if;
  end if;
end;

```

### Experimentación

La implementación física del prototipo de comunicación se muestra en la figura 6 y la conexión directa entre los dos teclados al mismo tiempo. Algunas pruebas se realizan con la finalidad de identificar el funcionamiento del nuevo diseño, entre las pruebas experimentales se encuentran el arranque y reinicio del ordenador para su detección y reconocimiento de los dos teclados. Por razones de seguridad hacia el proceso la prioridad total la tiene el teclado industrial; entre las funciones del teclado industrial están la de cambiar parámetros como puntos de ajuste, rangos de operación en tiempo, límites de variables, permisivos, protecciones y otras.

Las funciones principales del teclado PC son la puesta en marcha y el registro al programa (código G y M), y algunas pruebas de tecleo de botones al mismo tiempo y de forma consecutiva, como resultado se tiene un teclado universal industrial nuevo en perfectas condiciones y con pruebas satisfactorias.

### Discusiones y análisis

En la figura 7 se muestran las señales obtenidas del protocolo de comunicación del teclado normal y el implementado (industrial). Las dos primeras líneas de la parte superior muestran los datos del teclado normal y las dos líneas de la parte inferior muestran los datos del teclado implementado, ambos envían el mismo dato al mismo tiempo, donde la prioridad es el teclado industrial por el botón de stop de máquina si es que hubiera un error en la máquina o humano, finalmente el teclado normal transmite su señal y esta es guardada en un búfer circular de datos y para terminar se transmite.

En la figura 7a se envía el dato 00010001011 que corresponde a la palabra "o" (código: cuando se presiona una tecla es 0x44 y cuando se libera la tecla es 0xF0, 0x44), donde la señal se envía desde el teclado normal pasando primero por el teclado implementado hacia el ordenador.

En la figura 7a y b se transmite el dato 00010101011 que corresponde al número "0", siguiendo la caracterís-

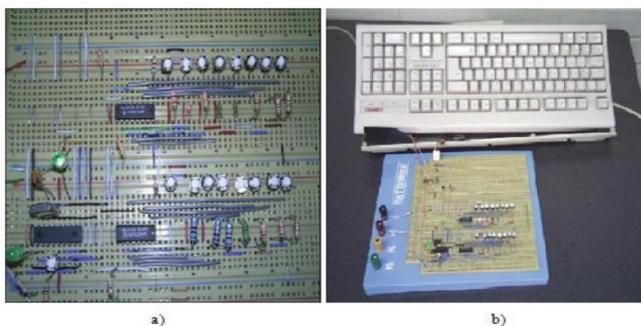


Figura 6. Implementación física del prototipo de comunicación, a) prototipo de implementación de 16 teclas, b) conexión directa entre los dos teclados hacia el ordenador

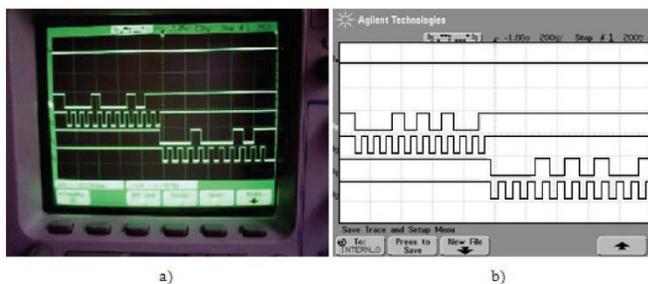


Figura 7. Señales seriales del protocolo de comunicación (teclado normal y el implementado), a) enviando la letra "o" al ordenador, b) se envía el número "0" al ordenador

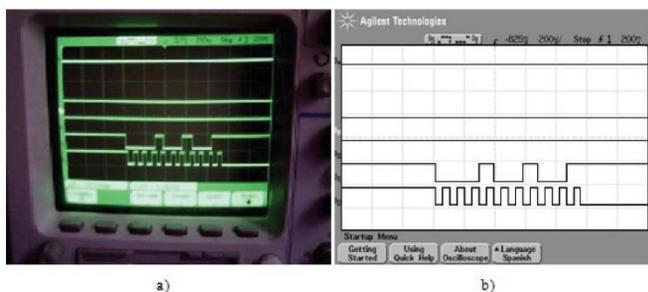


Figura 8. Señales seriales del protocolo de comunicación (sólo el teclado implementado), a) y b), muestran el mismo dato enviado al ordenador (letra "K")

tica de transmisión de los 11 bits de comunicación; el primero es el bit de inicio, los 8 siguientes son los datos, el penúltimo es el de paridad (indica si se están enviando o recibiendo datos), y el último es el bit del paro (stop).

En la figura 8 se presenta la señal de datos enviada al ordenador desde el teclado implementado (00010010011 correspondiente a la palabra "K", 0x42), se puede observar que las señales transmitidas desde el microcontrolador van directamente al ordenador de la computadora sin pasar por el teclado de la PC, que tiene un protocolo de comunicación matricial, las señales enviadas son las últimas dos líneas.

Las figuras 7 y 8 muestran que la comunicación es satisfactoria e idéntica tanto del protocolo de comunicación implementado como del comercial, logrando la obtención de un teclado multifuncional y con teclas para funciones específicas.

### Conclusiones

Se diseñó e implementó un protocolo de bajo costo para el control de máquinas automatizadas, logrando todos los objetivos propuestos desde el prototipo de un teclado estándar con protocolo y tecnología propia (eléctrica, control y diseño físico) mostrado en la figura

6, aplicado a máquinas de control numérico y a la automatización de maquinaria, permitiendo la compatibilidad en cualquier computadora, con la finalidad de que los códigos programados en una máquina de control numérico no se vean afectados si se reemplaza un teclado por otro cuando falle.

La arquitectura diseñada queda abierta a nuevas aplicaciones e innovaciones, sin necesidad de cambiar el hardware.

### Agradecimientos

Este artículo contó con el apoyo financiero de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) (número de concesión 209333).

### Referencias

- Chung-Chen S. y Chih H. KVM Switch Cable for PS/2 and USB Signaling 2007: Patent. US 7, 281, 067, B2.
- Varela Á. Alternative and Augmentative Communication Based Support Technology 2002, 7-8 [en línea] [fecha de consulta agosto de 2012]. Disponible en: <http://www.iberchip.net/iberchip2004/articles/39-3-AL-VAREL-ALVAROVARELA.PDF>

- Dogan H. *Pic Basic Projects: 30 Projects Using Pic Basic and Pic Basic Pro*, 1a ed., Londres UK, Newnes MPG Books, 2006, pp. 9-71.
- Domínguez F.R., Palacios-Municio E., López-J. L. *Desarrollo de proyectos microcontrolador PIC16F84A*, México, editorial Alfaomega, 1991, pp. 289-294.
- García-Breijo E. *Compilador C CCS y Simulador proteus para microcontroladores pic*, 2a ed., Barcelona, Marcombo, 2009, pp. 167-190.
- Kangbin Y. A Fix to the HCI Specification to Evade ID and Password Exposure by USB Sniff. *Proceedings of APIC-IST 2008*, volumen 12, 2008: 191-194.
- Li Y. A Heuristic-Based Approach to Optimize Keyboard Design for Single-Finger Keying Applications. *International Journal of Industrial Ergonomics*, volumen 36, 2006: 695-704.
- Manual PIC16F84A, Data Sheet, Microchip Technology Inc 2001, [en línea] [fecha de consulta: febrero de 2012]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/5007b.pdf>
- Navabi Z. *Digital Design and Implementation with Field Programmable Devices*, Information Technology: Transmission, Processing and Storage, Springer, 2004 [en línea]. Disponible en: <http://books.google.com.mx/books?id=cPv4fHOxcVoC&pg=PA260&dq=design+and++implementation+of+keyboard&hl=es&sa=X&ei=a7efUPeVMYXrrQGNyYCwBA&ved=0CDAQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false>
- Peng-Yeng Y. y En-Ping S. Cyber Swarm Optimization for General Keyboard Arrangement Problem. *International Journal of Industrial Ergonomics*, volumen 41, 2011: 43-52.
- Ramírez-Cortés J.M., Gómez-Gil P., Martínez-Carballido J., López-Larios F. A LabVIEW-Based Autonomous Vehicle Navigation System using Robot Vision and Fuzzy Control. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen 12 (número 2), 2011: 129-136.
- Suárez-Domínguez E., González-Marrero F.A. Diseño y desarrollo de la interfaz de comunicación del sistema diramic. *Revista CENIC*, volumen 36, 2005: 1-10.

**Este artículo se cita:****Citación estilo Chicago**

Mejía-Ugalde, Mario. Teclado con protocolo de comunicación universal aplicado a máquina de CNC. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XV, 02 (2014): 209-220.

**Citación estilo ISO 690**

Mejía-Ugalde M. Teclado con protocolo de comunicación universal aplicado a máquina de CNC. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XV (número 2), abril-junio 2014: 209-220.

**Semblanza del autor**

*Mario Mejía-Ugalde*. Es estudiante de doctorado y profesor en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Recibió la licenciatura como ingeniero electromecánico y la maestría en instrumentación y control automático por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro. Sus intereses de investigación actuales son diseño implementación y optimización mediante software para la automatización de máquina-herramienta de fabricación.

**Mario Mejía Ugalde  
Presente.**

**CONSEJO DIRECTIVO**

**DR. HÉCTOR PLASCENCIA MORA**  
Presidente

**DR. JOSÉ MANUEL RIERDO AVILA**  
Vicepresidente de Toluca

**DR. ELIÚ RODRÍGUEZ LOZANUA AZCUDO**  
Vicepresidente de México

**DR. ENRIQUE SANTIAGO GUTIERREZ**  
Vicepresidente de Toluca

**DR. MASCARÓN TRINIDAD VILLANAR**  
Vicepresidente de Morelia

**DR. ANDRÉS CORREA MORALES**  
Secretario

**DR. LEOPOLDO GONZÁLEZ MORALES**  
Tesorero

**DR. PEDRO ALBERTO PÉREZ CERVANTES**  
Vicepresidente de Asesoría

A la vez de saludarlo sirva este medio para informar a usted que el Comité Evaluador del 20 Congreso Internacional Anual de la SOMIM ha decidido aceptar para su presentación y publicación el trabajo titulado:

**TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN MÁQUINA-HERRAMIENTA DE CNC**

Con clave de registro: A3\_46

Asimismo confirmamos el cumplimiento de todos los lineamientos para incorporar su ponencia en la publicación de las memorias del Congreso de la SOMIM y presentación dentro del Congreso que se llevará a cabo los días 24, 25 y 26 de septiembre de 2014 en Juriquilla, Querétaro, México.

En breve le enviaremos la información turística, ubicación de la sede, y en semanas próximas al evento el Programa General con la fecha, hora y lugar de la presentación de su artículo durante el Congreso.

A nombre de la SOMIM lo felicito por haber enviado un trabajo digno de ser publicado en las memorias del 20 Congreso Internacional Anual de la SOMIM.

En espera de que en el futuro podamos seguir contando con su decidida participación, reciba un cordial saludo.

Para cualquier duda que pudiera surgir me pongo a sus órdenes en la siguiente dirección de correo electrónico [webmaster@somim.org.mx](mailto:webmaster@somim.org.mx).

Reciba un cordial saludo.

Atentamente,



**Dr. Héctor Plascencia Mora**

**PRESIDENTE DE LA SOMIM**

México D.F. a 4 de Agosto del 2014

## 7 Anexo 2 Artículo enviado a revista indizada

Journal of Engineering Manufacture



### Triangulation intersection approach from Poisson's equation applied to the automatic selection of the tool CNC mill-turn

Journal:	<i>Part B: Journal of Engineering Manufacture</i>
Manuscript ID:	JEM-14-0453
Manuscript Type:	Original article
Date Submitted by the Author:	13-Jun-2014
Complete List of Authors:	Uqalde, Mario; Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty; Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty Gonzalez, Aurelio; Autonomous University of Queretaro Hernandez, Miguel; Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty Hernandez, Luis Alberto; Autonomous University of Queretaro; Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty Osorio-Rios, Roque; Universidad Autonoma de Queretaro, ; Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty Rangel, Juan Primo; Autonomous University of Queretaro (UAQ) in Mexico; Autonomous University of Queretaro, Engineering Faculty
Keywords:	Cutting, Manufacturing Management < Optimisation, Forming, Rapid Prototyping < Optimisation, Production Machines
Abstract:	The present paper presents a new method for automatic tool selection using discrete techniques based in Poisson's equations for Computer Numerical Control (CNC) lathe-mill machines operations, using Rapid Tooling (RT). This method proposes to generate linear triangulation in the boundary of the piece and tool, after creating moves of tool around of the piece for detect intersection; thus, this creates directional field through mesh allowing selecting the type of insert in agreement with the size, magnitude and direction of tool. The proposed methodology has been implemented in CAM software, for different types of 2D, 2.5D and 3D pieces CAD, showing correct selection of the cutting tools. The novelty of this article is the use of discrete technique applying the Poisson's equation, the piece thus checks the intersection between the piece and tool when the tool is moving.

## 8 Anexo 3 Derechos de autos registrados

<b>CERTIFICADO</b> <b>Registro Público del Derecho de Autor</b>		
<p>Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la <b>OBRA</b> cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:</p>		<b>GOBIERNO FEDERAL</b>
		<b>SEP</b>
<b>AUTORES:</b>	MEJIA UGALDE MARIO MENDOZA TOVAR JUAN CARLOS	
<b>TITULO:</b>	TEORIA Y EJERCICIOS DE MATEMATICAS PARA BACHILLERES	
<b>RAMA:</b>	LITERARIA	
<b>TITULARES:</b>	MEJIA UGALDE MARIO MENDOZA TOVAR JUAN CARLOS	
<p>Con fundamento en lo establecido por el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original literaria.</p>		
<p>Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I y VI de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; los simples formatos o formularios en blanco para ser llenados con cualquier tipo de información, así como sus instructivos.</p>		
<p>L.F.D.A.- Artículo 168.- Las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.</p>		
<b>Número de Registro:</b>	03-2012-030811450400-01	
<p>México D.F., a 27 de marzo de 2012</p>		
<p>EL SUBDIRECTOR DE REGISTRO DE OBRAS Y CONTRATOS</p>		
 <b>ARTURO NOE CALDERON AGUILAR</b>	 SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR REGISTRO PÚBLICO	
		
 INDAUTOR Instituto Nacional del Derecho de Autor	SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA	<b>MÉXICO</b>

# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor



**GOBIERNO  
FEDERAL**

**SEP**

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO  
DOMINGUEZ GONZALEZ AURELIO  
MEJIA UGALDE MARIO  
TREJO HERNANDEZ MIGUEL

**TITULO:** DESARROLLO DE UN COMPILADOR PARA CNC BAJO EL  
LENGUAJE DE C++ PARA TORNO Y FRESA CON  
EJERCICIOS Y CON EJEMPLOS DE PROGRAMACION  
LITERARIA

**RAMA:**

**TITULARES:** BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO  
DOMINGUEZ GONZALEZ AURELIO  
MEJIA UGALDE MARIO  
TREJO HERNANDEZ MIGUEL

Con fundamento en lo establecido por el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I y II de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras.

L.F.D.A.- Artículo 168.- Las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

---

**Número de Registro:** 03-2012-030811480000-01

---



03-2012-030811480000-01

Página 1 de 2



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

**MÉXICO**

# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor



GOBIERNO  
FEDERAL

SEP

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO  
DOMINGUEZ GONZALEZ AURELIO  
MEJIA UGALDE MARIO  
MORALES HERNANDEZ LUIS ALBERTO

**TITULO:** CNC\_FRESA\_MARIO\_MU\_VER1.04

**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION

**TITULARES:** BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO  
DOMINGUEZ GONZALEZ AURELIO  
MEJIA UGALDE MARIO  
MORALES HERNANDEZ LUIS ALBERTO

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracción II de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara: el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras.

L.F.D.A.- Artículo 168.- Las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Número de Registro: 03-2012-030811435200-01

México D.F., a 27 de marzo de 2012

EL SUBDIRECTOR DE REGISTRO DE OBRAS Y CONTRATOS

ARTURO NOE CALDERON AGUILAR



INDAUTOR  
Instituto Nacional del Derecho de Autor

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

MÉXICO

# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor



**GOBIERNO  
FEDERAL**

**SEP**

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO  
MEJIA UGALDE MARIO  
MORALES HERNANDEZ LUIS ALBERTO  
TREJO HERNANDEZ MIGUEL

**TITULO:** CNC\_TORNO\_ADQ1

**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION

**TITULARES:** BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO  
MEJIA UGALDE MARIO  
MORALES HERNANDEZ LUIS ALBERTO  
TREJO HERNANDEZ MIGUEL

**Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracción II de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara: el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras.**

L.F.D.A.- Artículo 168.- Las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

**Número de Registro:** 03-2012-030811421700-01

México D.F., a 27 de marzo de 2012

**EL SUBDIRECTOR DE REGISTRO DE OBRAS Y CONTRATOS**

  
**ARTURO NOÉ CALDERÓN AGUILAR**



**INDAUTOR**  
Instituto Nacional del Derecho de Autor

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

**MÉXICO**