

# Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Facultad de Ingeniería



Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

## “GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE TRAYECTORIAS DE HERRAMIENTA PARA EL MAQUINADO DE MODELOS 3D A PARTIR DE FORMAS APROXIMADAS”

**Tesis**

Para obtener el grado de  
**Maestro en Ingeniería Mecánica**

Presenta:

**Ing. Edgar Abraham Mendoza López**

Asesor:

**Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**

San Luis Potosí, S.L.P. Febrero 2013

# Resumen

Aunque en los sistemas de manufactura rápida se han desarrollado nuevas técnicas para la fabricación de piezas o componentes, la mayoría de ellas aún presentan dos grandes limitaciones: el tipo de material que son capaces de procesar y la precisión dimensional que pueden lograr. No obstante, la mayoría de los trabajos de investigación reportados en la literatura se enfocan a mejorar dichas limitaciones, mientras que algunos otros se enfocan a la investigación de nuevas técnicas que tomen las ventajas de la manufactura rápida y la manufactura tradicional para obtener sistemas de fabricación más robustos y eficientes. Debido a las limitaciones que presenta la manufactura rápida, la principal aplicación ha sido la producción de formas aproximadas, es decir, la fabricación de piezas con forma muy cercana a la forma final. Por otro lado, estos sistemas ofrecen las ventajas de producir piezas que requieren procesos de acabado mínimos, un ahorro significativo de material, reducción del tiempo de maquinado así como de los costos de producción. El proceso de acabado comúnmente utilizado para las formas aproximadas ha sido el maquinado CNC por la gran variedad de materiales que se pueden maquinar, la calidad del acabado superficial que se puede lograr, y la precisión dimensional elevada. Aunque la principal desventaja del maquinado es el desperdicio de material, es despreciable cuando es aplicado a formas aproximadas.

En este trabajo de tesis se presenta una nueva técnica para la generación automática de trayectorias de maquinado para sistemas de tres ejes, utilizando como materia prima formas aproximadas y rectangulares. El método propuesto consta de dos módulos principales: módulo de discretización de la superficie y módulo de posicionamiento de la herramienta. En el módulo de discretización la superficie del modelo se discretiza por medio de puntos utilizando un análisis de visibilidad de las diferentes secciones del modelo. El módulo de posicionamiento de la herramienta está basado en un algoritmo nuevo el cual permite posicionar la herramienta de corte sobre la superficie del modelo; este algoritmo tiene la capacidad de posicionar diferentes tipos de herramientas con solo cambiar un parámetro. Cada posición calculada de la herramienta es analizada modelando numéricamente la herramienta y el portaherramientas para obtener de esta manera posiciones libres de colisiones e interferencias.

Para probar la factibilidad del método propuesto, se implementaron los algoritmos desarrollados y se generaron las trayectorias de maquinado para diferentes modelos con forma y complejidad variable. Los diferentes algoritmos desarrollados fueron probados y se obtuvieron resultados exitosos. Como parte de la validación, las trayectorias generadas se utilizaron para maquinar una pieza en un sistema de maquinado de tres ejes. Los resultados obtenidos muestran que las trayectorias generadas en el sistema propuesto cumplen con las condiciones de tolerancias en superficies con pendiente menores a  $60^\circ$ , sin embargo, cuando la pendiente es mayor a  $60^\circ$  el error se incrementa debido a una distribución no uniforme de la cresta.

# Agradecimientos

*Me gustaría agradecer al Dr. Hugo Iván Medellín Castillo por haber confiado en mi persona, por la paciencia, por la dirección de esta tesis y haber compartido sus conocimientos y experiencia en estos últimos seis años.*

*Al Dr. Dirk Frederik de Lange por los consejos, el apoyo y el ánimo que me brindó durante este proceso.*

*Además agradezco al M.I. Germánico González Badillo por su ayuda en temas relacionados con la programación.*

*Al Ing. Jorge Zaragoza Siqueiros y al Ing. Rodolfo Auristel López Palau por su ayuda en temas relacionados a programación y maquinado CNC.*

*Gracias también a mis amigos, colegas, técnicos y secretarías de la universidad por sus consejos, estímulo, ayuda y apoyo durante los últimos dos años.*

*A mis padres Clemente y Aurora, a mis hermanos Verónica, Claudia, Clemente y Fernando que con su apoyo y dedicación han logrado mantenerme en el camino de la superación y que en los momentos difíciles hemos estado unidos para salir adelante.*

*A ti Daniela por estar ahí durante todos estos años apoyándome y haciendo esto más sencillo, a tu familia por el apoyo recibido.*

*A la Facultad de Ingeniería y al CIEP por brindar las instalaciones y espacios necesarios.*

*Finalmente quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT, por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.*

*Edgar A. Mendoza*

# Contenido

<b>Resumen</b> .....	i
<b>Agradecimientos</b> .....	ii
<b>Contenido</b> .....	iii
<b>Lista de Figuras</b> .....	vi
<b>Lista de Tablas</b> .....	x
<b>Glosario</b> .....	xi
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
Planteamiento del proyecto de tesis .....	2
Objetivo general .....	3
Metodología .....	4
Organización de la tesis .....	4
<b>Capítulo 1. Antecedentes teóricos</b> .....	<b>5</b>
1.1 Maquinado .....	5
1.1.1 Maquinado con herramientas de múltiples filos .....	6
1.1.2 Parámetros del maquinado con herramientas de múltiples filos .....	8
1.1.3 Clasificación de las operaciones en el proceso de maquinado .....	9
1.2 Trayectorias de herramienta .....	9
1.2.1 Métodos para la generación de trayectorias de herramienta .....	10
1.2.2 Métodos para el posicionamiento de la herramienta .....	12
1.2.3 Interferencias .....	14
1.2.4 Colisiones .....	14
1.2.5 Estrategias de maquinado .....	17
1.2.6 Error en la dirección de maquinado .....	18
1.2.7 Error en dirección ortogonal a la dirección de maquinado .....	18
<b>Capítulo 2. Generación de trayectorias de herramienta</b> .....	<b>21</b>
2.1 Maquinado de modelos 3D .....	21
2.2 Modelo sólido y materia prima .....	22
2.3 Parámetros del maquinado .....	23
2.3.1 Herramientas de corte y sistema de sujeción .....	23
2.3.2 Profundidad e intervalos de corte .....	24
2.3.3 Tolerancias .....	25
2.4 Generación de trayectorias de herramienta .....	25
2.4.1 Offset del modelo CAD .....	25
2.4.2 Posicionamiento por iteración .....	28
2.4.3 Discretización de la superficie .....	35
2.4.3.1 Perfiles de intersección .....	36
2.4.3.2 Análisis de visibilidad .....	37
2.4.3.3 Posicionamiento de la herramienta .....	47
2.4.3.4 Análisis de la tolerancia en la dirección de maquinado .....	50
2.4.3.5 Análisis de colisiones .....	51
2.4.3.6 Ventajas y desventajas .....	54
2.5 Generación de trayectorias de herramienta para desbaste .....	54

2.5.1	Parámetros en el desbaste.....	55
2.5.2	Cálculo de las pasadas.....	55
2.6	Generación de trayectorias de herramienta para acabado.....	60
2.6.1	Paso en la dirección de maquinado.....	60
2.6.2	Paso entre trayectorias paralelas.....	60
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Generación de código o instrucciones de maquinado .....</b>	<b>62</b>
3.1	Control Numérico (NC) o Control numérico computarizado (CNC).....	62
3.1.1	Carácter.....	62
3.1.2	Palabra.....	63
3.1.3	Bloque.....	63
3.1.4	Programa.....	63
3.2	Estructura de los bloques de programa.....	63
3.2.1	Número de bloque (N).....	64
3.2.2	Funciones preparatorias (G).....	65
3.2.3	Avance de los ejes (F).....	69
3.2.4	Velocidad del cabezal (S).....	69
3.2.5	Número de herramienta (T).....	69
3.2.6	Funciones auxiliares (M).....	69
3.2.7	Comentario de bloques.....	71
3.3	Estructura del programa.....	71
3.4	Generación de código CNC para maquinado.....	72
3.4.1	Encabezado del programa.....	72
3.4.2	Cuerpo del programa.....	72
3.4.3	Fin del programa.....	79
3.5	Generación de código de maquinado para robot y/o propósito general.....	81
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Implementación.....</b>	<b>82</b>
4.1	HWTestBedApp.....	82
4.2	Configuración de la pieza (Part Setup).....	83
4.3	Materia prima (Raw Material).....	84
4.3.1	Forma rectangular (Rectangular Shape).....	84
4.3.2	Archivo (File).....	86
4.4	Configuración del desbaste y acabado (Rough Setting, Finish Setting).....	88
4.4.1	Sistema de herramientas (Tooling System).....	89
4.4.2	Parámetros de maquinado (Machining Parameters).....	91
4.5	Simulación (Simulation).....	94
4.6	Código (Code).....	95
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Análisis y evaluación del sistema .....</b>	<b>97</b>
5.1	Resultados del sistema.....	97
5.1.1	Modelo 1: Gehaeuse.....	97
5.1.2	Modelo 2: Molde.....	102
5.1.3	Modelo 3: Camión.....	105
5.1.4	Modelo 4: Sello.....	108
5.1.5	Modelo 5: Superficie de forma libre.....	111
5.1.6	Modelo 6: Trial.....	114
5.2	Discusión.....	123
5.2.1	Trayectorias de herramienta.....	123
5.2.2	Análisis de colisiones.....	126
5.2.3	Generación de pasadas de herramienta (desbaste).....	127

5.2.4	Código de maquinado .....	127
<b>Conclusiones</b>	.....	129
<b>Referencias</b>	.....	132
<b>Apéndices</b>	.....	136
A.	Códigos G .....	136
B.	Códigos M.....	138

# Lista de Figuras

Figura 1. Construcción automática de modelo octree. ....	3
Figura 2. Esquema general del maquinado de modelos aproximados (octree).....	3
Figura 1.1. Proceso de corte durante el maquinado: a) sección transversal del proceso de maquinado, y (b) herramienta con ángulo de ataque negativo; comparada con el ángulo positivo de a). ....	5
Figura 1.2. Tipos de operaciones de maquinado: a) torneado, b) taladrado, c) maquinado con herramientas de múltiples filos, y d) procesos con herramientas de múltiples filos. ....	6
Figura 1.3. Maquinado periférico: a) maquinado de placa, b) ranurado, c) maquinado lateral, y d) maquinado paralelo simultáneo. ....	7
Figura 1.4. Dos formas de maquinado: a) maquinado hacia arriba, y b) maquinado hacia abajo. ....	7
Figura 1.5. Maquinado frontal: a) maquinado frontal convencional, b) maquinado frontal parcial, c) maquinado terminal, d) maquinado de perfiles, e) maquinado de cavidades, y f) maquinado de contorno superficial. ....	8
Figura 1.6. Generación de trayectorias por el método iso-paramétrico.....	10
Figura 1.7. Generación de trayectorias por el método iso-planar (cartesiano). ....	11
Figura 1.8. Trayectorias adyacentes de posiciones de herramienta y cresta típica. ....	12
Figura 1.9. Posicionamiento por inversión de la herramienta: a) herramienta de punta de bola, y b) herramienta de filete. ....	12
Figura 1.10. Posicionamiento de la herramienta por desplazamiento: (a) modelo original, y (b) modelo desplazado. ....	13
Figura 1.11. Posicionamiento de la herramienta mediante rayos. ....	13
Figura 1.12. Tres tipos de interferencias: a) global, b) local, y c) con superficies vecinas. ....	14
Figura 1.13. Detección de colisiones mediante operaciones booleanas: a) colisión, b) resultado de intersección entre el modelo y el portaherramientas.....	15
Figura 1.14. Detección de colisiones en el portaherramientas. ....	16
Figura 1.15. Modelo geométrico del sistema completo para la detección de colisiones (herramienta y portaherramientas). ....	16
Figura 1.16. Estrategias de maquinado: a) zig-zag, y b) contornos. ....	18
Figura 1.17. Determinación del paso en la dirección de maquinado. ....	18
Figura 1.18. Determinación del paso lateral. ....	19
Figura 1.19. Determinación del intervalo de intersección de planos: a) $\theta$ pequeño, y b) $\theta$ grande. ....	20
Figura 2.1. Esquema general del maquinado de partes. ....	21
Figura 2.2. Diagrama de flujo para el maquinado de modelos 3D. ....	22
Figura 2.3. Modelo 3D. ....	23
Figura 2.4. Modelos de materias primas, a) rectangular, y b) aproximadas. ....	23
Figura 2.5. Herramientas de corte: a) plana, b) punta de bola, y c) de filete. ....	24
Figura 2.6. Sistemas de sujeción para herramientas de corte. ....	24
Figura 2.7. Parámetros del maquinado: a) profundidad de corte, y b) intervalo de corte. ....	25

Figura 2.8. Superficie desplazada: a) modelo original, y b) modelo desplazado.....	26
Figura 2.9. Cálculo de posiciones de la herramienta.....	27
Figura 2.10. Trayectorias de herramienta.....	27
Figura 2.11. Esquema del proceso de obtención de puntos sobre la superficie.....	29
Figura 2.12. Posicionamiento de la herramienta mediante iteración.....	30
Figura 2.13. Diagrama de flujo del método para posicionamiento de la herramienta.....	31
Figura 2.14. Extrapolación lineal.....	31
Figura 2.15. Extrapolación circular.....	33
Figura 2.16. Trayectorias de herramienta con segmentos lineales y circulares.....	33
Figura 2.17. Diagrama de flujo para la generación de segmentos lineales y circulares.....	34
Figura 2.18. Generación de perfiles: a) modelo, b) plano de corte, y c) áreas de intersección.....	36
Figura 2.19. Clasificación de los perfiles: a) perfil con múltiples lados, y b) perfil con un solo lado.....	37
Figura 2.20. Visibilidad de lados rectos basada en su normal: a) lado inclinado, y b) lado vertical.....	38
Figura 2.21. Perfil después de la eliminación de lados rectos sin visibilidad.....	38
Figura 2.22. Visibilidad nula: a) lados del perfil, y b) resultados del análisis de visibilidad.....	39
Figura 2.23. Visibilidad parcial: a) lados del perfil, y b) resultados del análisis de visibilidad.....	40
Figura 2.24. Visibilidad indefinida: a) lados del perfil, y b) resultados del análisis de visibilidad.....	40
Figura 2.25. Análisis de visibilidad de rectángulos.....	41
Figura 2.26. Diagrama de flujo para el análisis de visibilidad basada en rectángulos.....	42
Figura 2.27. Perfil después del análisis de visibilidad por rectángulos.....	42
Figura 2.28. Descomposición de un lado en secciones: a) lado original, y b) lados generados.....	43
Figura 2.29. Comparación de secciones: a) lado A y B, b) resultado de AB y C, y c) perfil final.....	44
Figura 2.30. Resultado final después del análisis de visibilidad por discretización.....	45
Figura 2.31. Discretización de superficies de 3 diferentes modelos: a) modelo de una turbina, b) discretización de la turbina, c) modelo de un camión, d) discretización del camión, e) modelo de un molde, y f) discretización del molde.....	47
Figura 2.32. Herramientas de corte y su punto de referencia: a) plana, b) punta de bola, y c) filete.....	47
Figura 2.33. Área proyectada de la herramienta.....	48
Figura 2.34. Esquema de una herramienta de filete.....	49
Figura 2.35. Procedimiento general para posicionamiento de herramientas.....	50
Figura 2.36. Análisis del error en la dirección de maquinado.....	51
Figura 2.37. Modelo geométrico del sistema de sujeción y herramienta.....	51
Figura 2.38. Diagrama de flujo para análisis de colisiones.....	53
Figura 2.39. Recálculo de posiciones debido a colisiones.....	53
Figura 2.40. Desbaste capa por capa.....	54
Figura 2.41. Generación de trayectorias en materia prima rectangular.....	56
Figura 2.42. Método para el cálculo de las trayectorias por pasada.....	56
Figura 2.43. Generación de trayectorias por pasada: a) trayectorias sobre modelo final, b) pasadas para modelo final, c) trayectorias sobre materia prima, y d) pasadas para materia prima.....	57
Figura 2.44. Sustracción de modelos: a) sustracción de modelos, y b) sustracción de trayectorias.....	57
Figura 2.45. Generación de trayectorias para evitar interferir en el modelo final.....	58
Figura 2.46. Trayectorias finales para desbaste.....	58
Figura 2.47. Trayectorias de desbaste: a) materia prima, b) trayectorias de desbaste sobre modelo, y c) trayectorias de desbaste.....	59



Figura 2.48. Trayectorias de acabado: a) modelo y sus trayectorias, y b) trayectorias.....	61
Figura 3.1. Estructura de un bloque en programación CNC.....	64
Figura 3.2. Direcciones de giro de G02 y G03.....	66
Figura 3.3. Selección de planos del área de trabajo: a) plano XY, b) plano XZ, y c) plano YZ.....	67
Figura 3.4. Compensación del radio de la herramienta.....	68
Figura 3.5. Cotas absolutas.....	68
Figura 3.6. Cotas incrementales.....	69
Figura 3.7. Encabezado del programa.....	72
Figura 3.8. Organización de las matrices de desbaste y acabado.....	73
Figura 3.9. Encabezado y primera parte del cuerpo del programa.....	74
Figura 3.10. Cuatro trayectorias de herramientas.....	75
Figura 3.11. Matriz de trayectorias de desbaste.....	76
Figura 3.12. Trayectorias finales de desbaste.....	77
Figura 3.13. Diagrama de flujo para la escritura de la trayectorias de herramienta.....	78
Figura 3.14. Programa CNC.....	79
Figura 3.15. Programa CNC final.....	80
Figura 3.16. Código de maquinado para robot y/o propósito general.....	81
Figura 4.1. Interfaz gráfica de la plataforma HWTestBedApp.....	82
Figura 4.2. Opciones del menú de maquinado “Machining”.....	83
Figura 4.3. Diálogo de notificación.....	84
Figura 4.4. Orientación del modelo.....	84
Figura 4.5. Definición de la materia prima (forma rectangular).....	85
Figura 4.6. Origen del sistema de coordenadas.....	85
Figura 4.7. Materia prima de forma rectangular.....	86
Figura 4.8. Materia prima de forma aproximada.....	87
Figura 4.9. Materia prima desde archivo.....	87
Figura 4.10. Materia prima desde un archivo (forma aproximada).....	88
Figura 4.11. Configuración del maquinado.....	88
Figura 4.12. Definición de nueva herramienta.....	89
Figura 4.13. Opción para nuevas herramientas creadas.....	91
Figura 4.14. Parámetros del maquinado.....	92
Figura 4.15. Información de la generación de trayectorias: a) acabado, y b) desbaste.....	93
Figura 4.16. Reporte de la generación de trayectorias de herramienta.....	93
Figura 4.17. Opción “Simulation”.....	94
Figura 4.18. Modelo geométrico del portaherramientas.....	94
Figura 4.19. Simulación gráfica de las trayectorias de maquinado.....	95
Figura 4.20. Opción “Code->CNC”: a) ningún código generado (opciones inhabilitadas), y b) código generado para acabado (opción “Finishing” habilitada).....	95
Figura 4.21. Código de maquinado para desbaste.....	96
Figura 5.1. Modelo 1: Gehaeuse.....	97
Figura 5.2. Materia prima para el modelo Gehaeuse: a) forma aproximada, y b) materia prima y modelo.....	98

Figura 5.3. Trayectorias para desbaste de modelo Gehaeuse. ....	100
Figura 5.4. Descomposición de la trayectoria de desbaste para el modelo Gehaeuse. ....	100
Figura 5.5. Trayectoria de acabado para el modelo Gehaeuse. ....	102
Figura 5.6. Modelo 2: Molde. ....	102
Figura 5.7. Materia prima para el Molde: a) modelo octree, y b) materia prima y modelo. ....	103
Figura 5.8. Trayectorias de desbaste para el Molde. ....	104
Figura 5.9. Trayectorias de acabado para el Molde. ....	105
Figura 5.10. Modelo 3: Camión. ....	105
Figura 5.11. Materia prima para el Camión. ....	106
Figura 5.12. Trayectorias de desbaste para el modelo del Camión. ....	107
Figura 5.13. Trayectorias de acabado para el modelo del Camión. ....	108
Figura 5.14. Modelo 4: Sello. ....	108
Figura 5.15. Materia prima para el modelo del Sello. ....	109
Figura 5.16. Trayectorias de desbaste para el modelo del Sello. ....	110
Figura 5.17. Trayectorias de acabado para el Sello: a) vista isométrica, y b) vista lateral. ....	111
Figura 5.18. Modelo 5: Superficie de forma libre. ....	112
Figura 5.19. Materia prima para el modelo de superficie de forma libre. ....	112
Figura 5.20. Trayectorias de desbaste para el modelo de superficie de forma libre. ....	113
Figura 5.21. Trayectorias de acabado para el modelo de superficie de forma libre. ....	114
Figura 5.22. Modelo 6: Trial. ....	115
Figura 5.23. Sistema de fresado CNC utilizado para el maquinado del modelo Trial. ....	115
Figura 5.24. Materia prima para el modelo Trial: a) materia prima virtual, y b) materia prima real. ....	116
Figura 5.25. Herramientas de corte plana para desbaste, 10mm. ....	117
Figura 5.26. Trayectorias de desbaste para el modelo Trial. ....	117
Figura 5.27. Maquinado de desbaste: a) materia prima, b) después de 3 capas de maquinado, c) después de 4 capas de maquinado, d) después de penúltima capa de acabado, e) y f) después de la remoción del efecto escalera, última capa de maquinado. ....	118
Figura 5.28. Herramienta de punta de bola para acabado, 6.35mm. ....	119
Figura 5.29. Trayectorias de acabado para el modelo Trial. ....	120
Figura 5.30. Etapas durante el maquinado de acabado: a) y b) después de un cuarto de modelo maquinado, c) y d) después de la mitad del modelo maquinado, e) y f) después de tres cuarto de modelo maquinado, g) y h) modelo completamente maquinado. ....	121
Figura 5.31. Máquina de medición por coordenadas. ....	121
Figura 5.32. Características medidas en el modelo Trial. ....	122
Figura 5.33. Registro de datos en la máquina de medición por coordenadas (MMC). ....	123
Figura 5.34. Máximo error de discretización. ....	125
Figura 5.35. Distribución no uniforme de la cresta en el maquinado de acabado. ....	126

# Lista de Tablas

Tabla 1. Técnicas RP actuales. ....	1
Tabla 2. Principales limitaciones de las técnicas RP. ....	2
Tabla 3.1. Ejemplos de números de bloque. ....	64
Tabla 4.1. Avances de herramienta para aluminio, utilizando herramientas de carburo. ....	90
Tabla 5.1. Información para modelo Gehaeuse: a) parámetros del desbaste, y b) resultados de la generación de trayectorias. ....	99
Tabla 5.2. Información de modelo Gehaeuse: a) parámetros del acabado, b) resultados de la generación de trayectorias. ....	101
Tabla 5.3. Información para el modelo del Molde: a) parámetros del desbaste, b) resultados de la generación de trayectorias. ....	103
Tabla 5.4. Información para el modelo del Molde: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias. ....	104
Tabla 5.5. Información para el modelo del Camión: a) parámetros de las trayectorias de maquinado, b) resultados de la generación de las trayectorias para desbaste. ....	106
Tabla 5.6. Información para el modelo del Camión: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias. ....	107
Tabla 5.7. Información para el modelo del Sello: a) parámetros del desbaste, b) resultados de la generación de trayectorias. ....	109
Tabla 5.8. Información para el modelo del Sello: a) parámetros del maquinado, b) resultados de la generación de trayectorias. ....	110
Tabla 5.9. Información para el modelo de superficie de forma libre: a) parámetros del desbaste, y b) resultados de la generación de trayectorias. ....	113
Tabla 5.10. Información para el modelo de superficie de forma libre: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias. ....	114
Tabla 5.11. Información para el modelo Trial: a) parámetros del desbaste, b) resultados de la generación de trayectorias. ....	116
Tabla 5.12. Información para el modelo Trial: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias. ....	119
Tabla 5.13. Análisis de dimensiones medidas y reales. ....	122
Tabla 5.14. Resumen de resultados obtenidos de las pruebas. ....	124

# Glosario

NNS	Forma Casi Neta (Near Net Shape)
RP	Prototipado Rápido (Rapid Prototyping )
CAD	Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)
SLA	Estereolitografía (Stereolithography)
JP	Chorro de Fotopolímero (Photosolidification)
FDM	Modelado por Deposición Líquida (Fused Deposition Modelling)
SLS	Sinterizado Selectivo por Laser (Selective Laser Sintering)
3DP	Impresión Tridimensional (Three Dimensional Printing)
LENS	Formado Final en Ingeniería por Laser (Laser Engineering Net Shaping)
DLMS	Sinterizado Directo de Metal por Laser (Direct Metal Laser Sintering)
DMD	Deposición Directa de Metal (Direct Metal Deposition)
LOM	Manufactura de Objetos Laminados (Laminated Onject Manufacturing)
DM	Maquinado de Escritorio (Desktop Machining)
CNC	Control Numérico Computarizado (Computer Numerical Control)
CC	Puntos de Contacto de la Herramienta (Cutter Contacts Points)
CAM	Manufactura Asistida por Computadora (Computer-Aided Manufacturing)

# Introducción

---

La manufactura de formas aproximadas (Near Net Shape, NNS, por sus siglas en inglés) se refiere a la fabricación de productos donde el objetivo principal es producir partes tan cercanas como sea posible a su forma final. Los beneficios de la manufactura NNS incluyen una reducción en el trabajo de acabado requerido, un ahorro significativo de material, y una reducción en los costos y tiempos de producción. Los sistemas tradicionales de manufactura NNS son:

- **Fundición:** proceso de manufactura en el que un material en estado líquido es vertido dentro de un molde que contiene cavidades de la forma deseada, y luego es solidificado.
- **Forja:** proceso de fabricación en el cual la forma es obtenida mediante el formado de un metal utilizando fuerzas de compresión en lugares específicos.
- **Moldeo por inyección:** proceso de manufactura para la producción de partes de plástico (termoplásticos y termoestables). El material es alimentado hacia un contenedor caliente, en donde se mezcla y fuerza a entrar en una cavidad (molde) para su posterior enfriamiento y endurecido, manteniendo la forma del molde.

Además de estos sistemas, desde hace más de dos décadas se han desarrollado nuevas tecnologías para la fabricación de partes. Una de estas tecnologías es el Prototipado Rápido (RP, por sus siglas en inglés) que se describe como una tecnología para producir partes directamente de modelos digitales generados en sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés), y con muy poca necesidad de intervención humana [1]. La mayoría de las técnicas RP actuales están basadas en procesos de construcción “capa por capa”, en donde una serie de secciones o capas se obtienen de un modelo CAD. Este tipo de procesos también son conocidos como procesos de adición de material, esto debido a que en lugar de remover material, se añade material hasta obtener la pieza final. Existen diferentes métodos de RP, siendo la mayor diferencia entre ellas la técnica utilizada para la adición de material, así como el tipo de material que se utiliza. Algunas de las técnicas RP más comunes se muestran en la Tabla 1, [2].

Material	Técnica
Líquido	Esterolitografía (SLA)
	Chorro de fotopolímero (JP)
	Fotosolidificación
	Modelado por deposición líquida (FDM)
	Inyección múltiple de tinta
	Inyección simple de tinta
Polvo	Sinterizado selectivo por láser (SLS)
	Impresión tridimensional (3DP)
	Formado final en ingeniería por láser (LENS)
	Sinterizado directo de metal por láser (DLMS)
	Deposición directa de metal (DMD)
Sólido	Manufactura de objetos laminados (LOM)
	Maquinado de escritorio (DM)

Tabla 1. Técnicas RP actuales.

Una de las limitaciones más importante que afecta a todas estas técnicas RP es la precisión y el acabado superficial de los componentes [2], Tabla 2. Debido a esto, la principal aplicación de las técnicas RP ha sido en la producción de prototipos de forma aproximada (NNS), que requieren una operación de acabado para lograr las tolerancias requeridas. Algunos productos fabricados con técnicas RP pueden utilizarse directamente, sin embargo, la mayoría requieren un post-procesamiento considerable.

Precisión y acabado superficial del componente	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Resolución limitada a lo largo de los ejes de construcción.</li> <li>➤ Aproximación en facetas y efecto escalera.</li> <li>➤ La precisión dimensional y la calidad de la superficie es menor que el maquinado CNC y procesos de moldeo por inyección.</li> <li>➤ Contracción y distorsión.</li> </ul>
--	--

Tabla 2. Principales limitaciones de las técnicas RP.

Las técnicas de manufactura de formas aproximadas, incluyendo las técnicas modernas de RP, requieren de un post-procesamiento para lograr la precisión dimensional y el acabado superficial deseado. Una opción viable de post-procesamiento es el maquinado CNC, el cual es un proceso de fabricación basado en la remoción de material y mediante el cual se pueden producir una gran cantidad de productos metálicos y otros materiales como la madera y los plásticos. A diferencia de las técnicas RP, las ventajas del maquinado CNC son: la gran variedad de materiales que se pueden maquinar, el acabado superficial de gran calidad y la precisión dimensional elevada. Sin embargo, al ser un proceso de remoción de material, su principal desventaja es el desperdicio de material [3], que aplicado a formas aproximadas tiene un impacto mucho menor volviéndose una opción viable en cuanto al ahorro de material y tiempo de maquinado, lo cual se traduce en la reducción de costos de fabricación.

### Planteamiento del proyecto de tesis

Recientemente se propuso una nueva técnica RP la cual está basada en la fabricación de prototipos a partir del ensamble automático de material en forma de cubos [4]. La técnica propuesta incluye la aproximación del modelo CAD de la pieza por medio de la descomposición octree. El procedimiento general consiste en delimitar el modelo por el mínimo cubo posible (bounding cube), después este es subdividido en más y más cubos de distintos tamaños hasta que se alcance el tamaño mínimo definido. En la descomposición habrá cubos que no formen parte del modelo (cubos vacíos) y se eliminarán quedando solo los que formen parte de él. Estos cubos son fabricados y pegados con adhesivo de acuerdo a la secuencia del ensamble generada, obteniéndose así una forma aproximada del modelo CAD (Figura 1). En este sistema, al igual que en los sistemas tradicionales de manufactura de formas aproximadas y los sistemas RP, es necesario un proceso adicional para lograr la precisión dimensional y el acabado superficial de la pieza final.

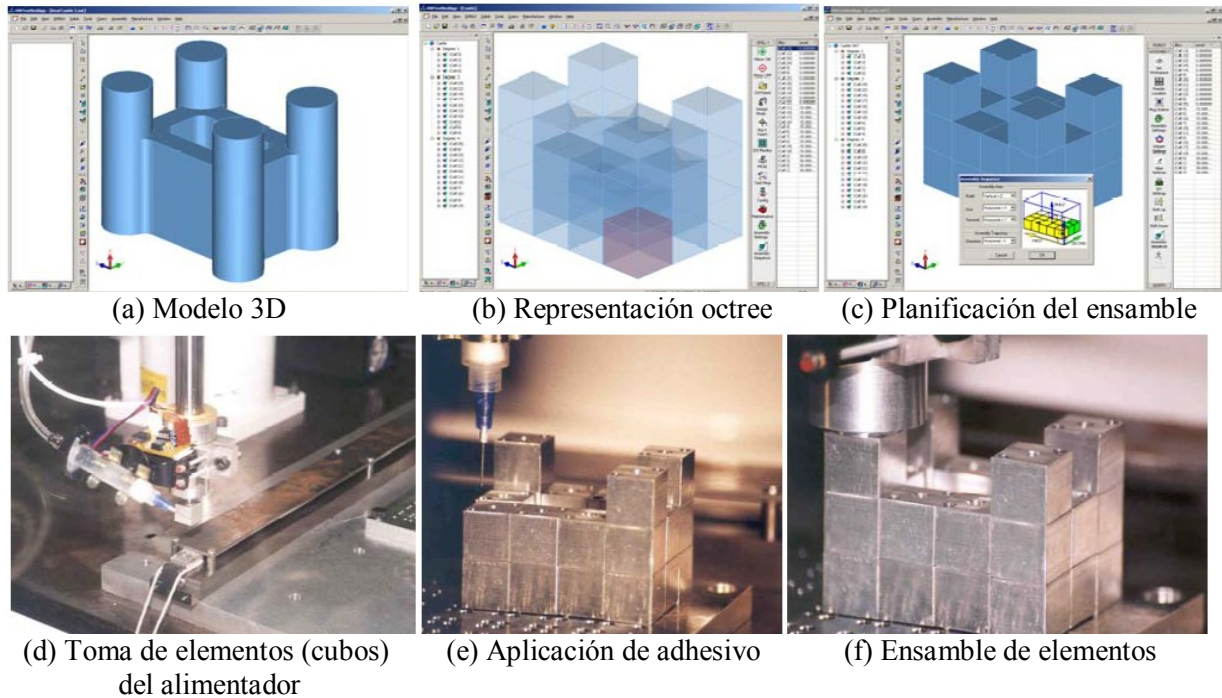


Figura 1. Construcción automática de modelo octree.

Por lo anterior se propone el desarrollo de algoritmos para la generación de trayectorias de maquinado a partir de modelos aproximados y/o materia prima de formas regular (rectangular). El propósito es que las piezas fabricadas por los distintos métodos de manufactura de formas aproximadas se puedan maquinar para obtener piezas que cumplan con la precisión dimensional y el acabado superficial especificados.

### Objetivo general

El objetivo principal del proyecto de tesis es el desarrollo de un sistema para la generación automática de trayectorias de herramienta para el maquinado de modelos 3D a partir de formas aproximadas. Para ello se considera el maquinado CNC de tres ejes, esto como parte del trabajo desarrollado en [4], ver Figura 2.



Figura 2. Esquema general del maquinado de modelos aproximados (octree).

## Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo del trabajo de tesis es la siguiente:

- Revisión bibliográfica de algoritmos y técnicas para la generación de trayectorias de herramienta para maquinado.
- Desarrollo de un algoritmo nuevo o existente para la obtención de volúmenes de maquinado.
- Desarrollo de un algoritmo nuevo o existente para la generación de trayectorias de herramienta para maquinado de desbaste y acabado.
- Análisis de manufacturabilidad (accesibilidad, grados de libertad, trayectorias, interferencias, colisiones, cavidades, etc.).
- Desarrollo e implementación de algoritmos en un programa computacional.
- Generación de código o instrucciones para un sistema CNC.
- Pruebas y evaluación del sistema.

Se considera que siguiendo la metodología anterior es posible cumplir el objetivo general de la tesis, contribuyendo de esta manera al desarrollo de técnicas para el maquinado de modelos 3D a partir de formas aproximadas.

## Organización de la tesis

La tesis está organizada de la siguiente manera. En el Capítulo 1 se presenta un resumen de los conceptos básicos sobre el maquinado, así como una revisión detallada de los métodos existentes para la generación automática de trayectorias de herramienta. En el Capítulo 2 se presenta el desarrollo de los algoritmos para la generación de trayectorias de herramienta para el maquinado de modelos 3D a partir de formas aproximadas, así como de formas rectangulares. Los fundamentos teóricos de la programación de sistemas CNC, así como el desarrollo de los algoritmos para la generación de código CNC a partir de las trayectorias de herramienta, se presentan en el Capítulo 3. La implementación de los algoritmos para la generación de trayectorias de herramienta y la generación de código CNC o instrucciones de maquinado se presenta y describe en el Capítulo 4. En el Capítulo 5 se realiza la evaluación, análisis y discusión de los resultados obtenidos de la fabricación de algunas piezas planeadas en el sistema desarrollado y utilizando un sistema CNC de tres ejes. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas con el desarrollo del presente proyecto así como la propuesta de trabajo futuro.



# Capítulo 1

## Antecedentes teóricos

---

Este Capítulo presenta una revisión de los diferentes tipos de maquinado convencional existentes, así como un análisis de los parámetros fundamentales en el maquinado CNC de tres ejes. Posteriormente se presenta una revisión de los trabajos previos de investigación en el área de maquinado y generación de trayectorias de herramienta.

### 1.1 Maquinado

El maquinado es el término general para describir el proceso de remoción de material de una pieza [5]. Tiene como objetivo generar la forma de la pieza deseada partiendo de un cuerpo sólido, o mejorar las tolerancias y el acabado superficial de una pieza de trabajo previamente formada, al retirar el material excedente en forma de pequeños elementos (virutas) [6]. Los procesos de remoción de material se dividen en tres grupos principales: maquinado tradicional, procesos abrasivos y maquinado no tradicional. En el maquinado tradicional se utilizan máquinas-herramienta (tornos, taladros, fresadoras, etc.) junto con herramientas afiladas para cortar el material mecánicamente. La acción de corte predominante comprende la deformación cortante del material para formar la viruta, la cual se desprende dejando una nueva superficie [3]. El esquema del proceso de corte se muestra en la Figura 1.1.

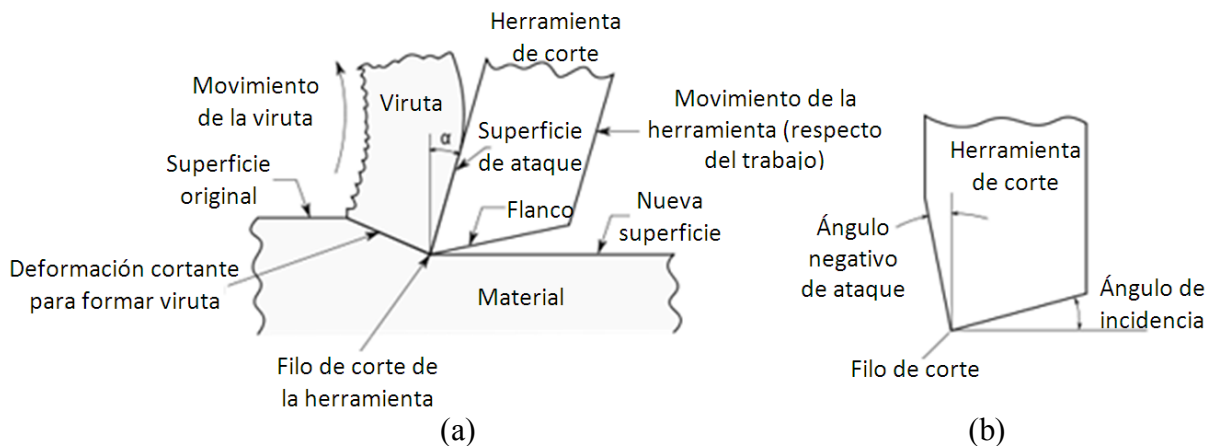


Figura 1.1. Proceso de corte durante el maquinado: a) sección transversal del proceso de maquinado, y (b) herramienta con ángulo de ataque negativo; comparada con el ángulo positivo de a).

El maquinado comprende una familia de operaciones y cada una capaz de generar geometrías y texturas superficiales específicas. Las operaciones de maquinado más importantes son: torneado, taladrado y el maquinado con herramientas de múltiples filos (también conocido como fresado) [3], [5]-[8].

**Torneado.** Consiste en la remoción de material mediante una herramienta de corte con un solo filo mientras la pieza de trabajo está sometida a rotación. La herramienta de corte se mueve en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo para desprender el material excedente (Figura 1.2a). Algunos ejemplos de piezas fabricadas por este proceso son: ejes, casquillos, poleas, tornillos, etc.

**Taladrado.** Se le llama taladrado a la operación de hacer agujeros cilíndricos. Utiliza una herramienta de corte en rotación que típicamente tiene dos filos. La herramienta es alimentada en una dirección paralela al eje de rotación dentro de la pieza de trabajo para formar el agujero (Figura 1.2b).

**Maquinado con herramientas de múltiples filos (fresado).** En este tipo de maquinado se utiliza una herramienta rotativa de múltiples filos (conocida como fresa), la cual se mueve a velocidades relativamente bajas hacia el material de trabajo y en casi cualquier dirección de los ejes coordenados. En la Figura 1.2c y Figura 1.2d se muestra el esquema de dicho proceso y algunos ejemplos de las herramientas utilizadas. Debido a su gran flexibilidad, la operación de maquinado con herramienta de múltiples filos es una de las de mayor aplicación en los procesos de fabricación industriales.

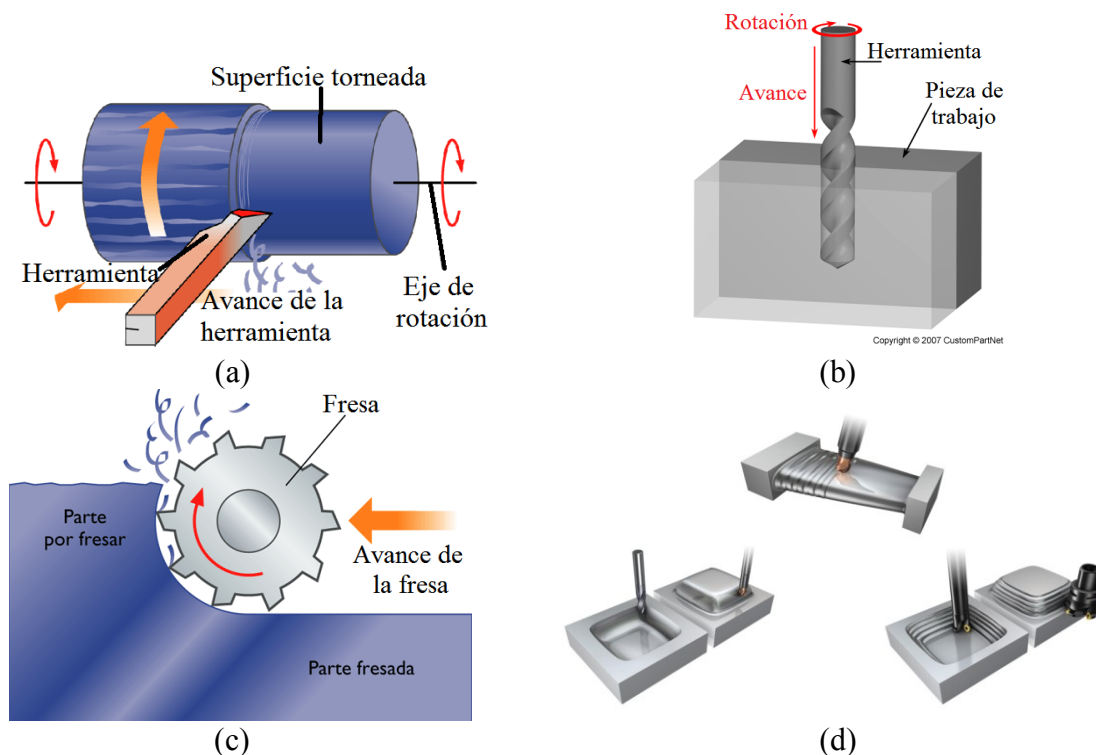


Figura 1.2. Tipos de operaciones de maquinado: a) torneado, b) taladrado, c) maquinado con herramientas de múltiples filos, y d) procesos con herramientas de múltiples filos.

### 1.1.1 Maquinado con herramientas de múltiples filos

La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección de avance es una de las características que distinguen este tipo de maquinado del taladrado. Los elementos de corte de la herramienta comúnmente se les llaman filos o dientes. Las herramientas pueden ser de una sola pieza

(herramienta sólida) o filos individuales (insertos) que son ensamblados en un núcleo. Este conjunto forma la herramienta de corte de múltiples filos. En el maquinado con herramientas de múltiples filos se pueden distinguir dos tipos básicos [7]:

**a) Maquinado periférico o maquinado horizontal**

En el maquinado periférico o maquinado horizontal el eje de la herramienta es paralelo a la superficie a ser maquinada. La herramienta de corte tiene filos en la periferia exterior del cortador. En la Figura 1.3 se muestran las formas básicas del maquinado periférico.

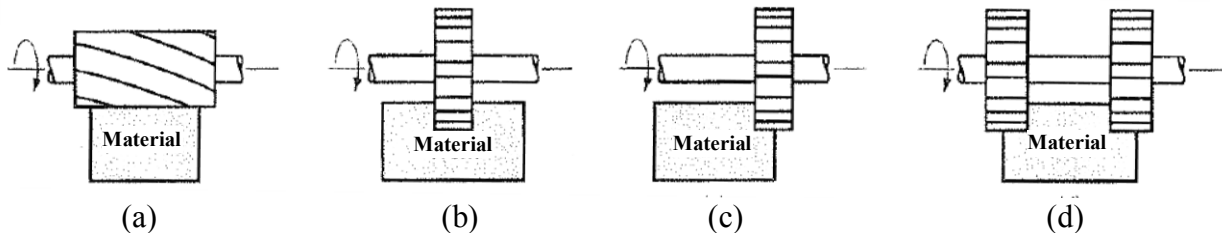


Figura 1.3. Maquinado periférico: a) maquinado de placa, b) ranurado, c) maquinado lateral, y d) maquinado paralelo simultáneo.

Además, en el maquinado periférico se distinguen dos formas de proceder: el maquinado hacia arriba y el maquinado hacia abajo, Figura 1.4. En el **maquinado hacia arriba o contra avance** (también llamado maquinado convencional) el espesor máximo de la viruta está al final del corte. Sus ventajas son: el agarre del diente no es función de las características superficiales de la pieza, y la contaminación y/o cascarilla no afectan la vida de la herramienta. En **el maquinado hacia abajo o concurrente** (el giro de la herramienta es en la misma dirección que el avance de la pieza), el corte comienza en la superficie de la pieza, y la viruta es más gruesa en esta zona. Una ventaja de este proceso es que la componente hacia abajo de la fuerza de corte mantiene a la pieza en su posición, en especial en piezas delgadas. Sin embargo, las fuerzas grandes de impacto que se producen cuando los dientes entran a la pieza requieren un soporte rígido y un mecanismo de avance de la mesa sin juego.

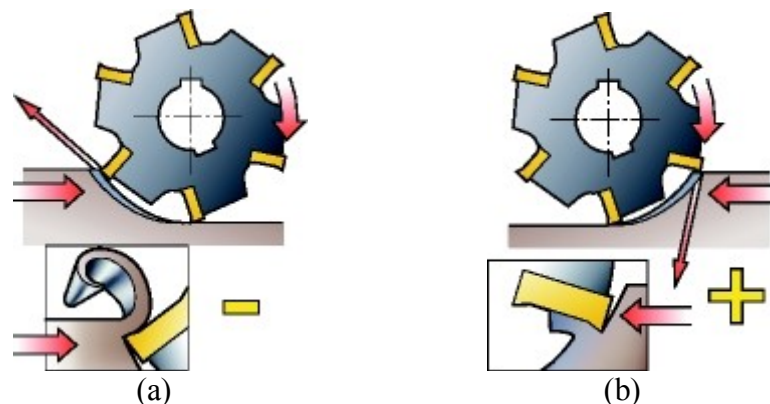


Figura 1.4. Dos formas de maquinado: a) maquinado hacia arriba, y b) maquinado hacia abajo.

**b) Maquinado frontal o maquinado vertical**

El maquinado frontal o maquinado vertical es la operación que controla la altura de la pieza a ser maquinada y en donde el eje de rotación de la herramienta es perpendicular a la superficie de

trabajo. La herramienta para este tipo de operaciones es una herramienta frontal. Al igual que en el maquinado periférico, en el maquinado frontal también existen variantes como se muestra en la Figura 1.5.

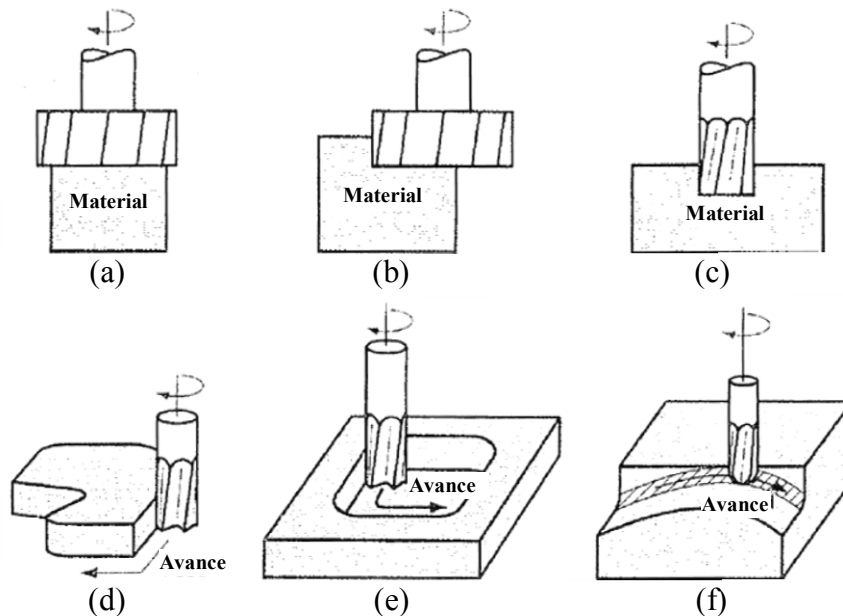


Figura 1.5. Maquinado frontal: a) maquinado frontal convencional, b) maquinado frontal parcial, c) maquinado terminal, d) maquinado de perfiles, e) maquinado de cavidades, y f) maquinado de contorno superficial.

### 1.1.2 Parámetros del maquinado con herramientas de múltiples filos

En los siguientes párrafos se detallan los principales parámetros de maquinado con herramientas de múltiples filos [5]-[8].

La velocidad de corte ( $v$ ) es determinada por el diámetro exterior de la herramienta, y se convierte a la velocidad de rotación del husillo utilizando la siguiente ecuación,

$$N = \frac{v}{\pi \times D} \quad (1.1)$$

donde  $D$  es el diámetro de la herramienta y  $N$  es la velocidad de rotación del husillo.

En el maquinado periférico el grosor de la viruta varía en su longitud, esto debido al movimiento longitudinal relativo entre la herramienta y la pieza. Para una herramienta de dientes rectos se puede calcular el espesor aproximado de viruta no deformada (profundidad de corte de viruta),  $t_c$ , mediante,

$$t_c = \frac{2 \times f \times d}{D} \quad (1.2)$$

donde  $f$  es el avance por diente de la herramienta medido a lo largo de la superficie del cortador, esto es, la distancia que recorre la pieza por cada diente, en mm/diente o pulg/diente, y  $d$  es la

profundidad de corte. Conforme  $t_c$  aumenta, la fuerza sobre el diente de la herramienta se incrementa.

El avance por diente se calcula como,

$$f = \frac{v}{N \times n} \quad (1.3)$$

donde  $n$  es el número de dientes o filos en la periferia del cortador.

El tiempo de corte  $t$  se puede calcular utilizando la siguiente ecuación,

$$t = \frac{(l + l_c)}{v} \quad (1.4)$$

donde  $l$  es la longitud de la pieza y  $l_c$  es la extensión del primer contacto de la herramienta con la pieza. Si se supone que  $l_c \ll 1$  (que en general no es el caso), la rapidez de remoción del material ( $RRM$ ) es,

$$RRM = \frac{l \times w \times d}{t} = w \times d \times v \quad (1.5)$$

donde  $w$  es el ancho del corte (que para una pieza más angosta que la longitud de la herramienta es igual al ancho de la pieza).

### 1.1.3 Clasificación de las operaciones en el proceso de maquinado

El maquinado de una pieza generalmente se realiza en dos etapas: desbaste y acabado, aunque en algunos casos se utiliza una tercera etapa llamada maquinado de limpieza.

**Desbaste.** Es el proceso de remoción de materia prima con una alta tasa de remoción para obtener la pieza deseada en forma casi neta. Típicamente se realiza con herramientas de corte planas y comúnmente se remueve un 70% del material excedente. Aproximadamente entre el 50% y 90% del tiempo de maquinado es utilizado en esta operación [9]-[10].

**Acabado.** En esta operación se remueve el material excedente de la pieza obtenida en la operación de desbaste, logrando el acabado superficial y la precisión dimensional finales de la pieza, aunque algunas requieren una tercera operación llamada “maquinado de limpieza”. Generalmente se utilizan herramientas de punta de bola.

**Maquinado de limpieza.** El propósito del maquinado de limpieza es remover los volúmenes no cortados dejados en las regiones cóncavas después de la operación de acabado. Se utilizan herramientas de punta de bola del mismo tamaño o menor que en la operación de acabado [12]-[13].

## 1.2 Trayectorias de herramienta

La generación de trayectorias de herramienta o de maquinado es un proceso mediante el cual se determinan las rutas o trayectorias adecuadas de la herramienta para convertir una forma inicial (materia prima o NNS) a su forma final (pieza final) definida por lo general mediante un modelo

CAD tridimensional. Para lograr lo anterior se utiliza un procedimiento basado en la aproximación de la pieza mediante curvas que comúnmente pueden ser segmentos lineales o circulares. Idealmente cada punto en la superficie de diseño debe ser un punto de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo; sin embargo, esto es computacionalmente costoso por lo que se recurre a distintos métodos de generación de trayectorias y estrategias de maquinado para reducir el tiempo de cálculo [14].

### 1.2.1 Métodos para la generación de trayectorias de herramienta

Los métodos convencionales para la generación automática de trayectorias tienen como objetivo la determinación de los puntos de contacto (CC) entre la herramienta y la pieza de trabajo. Estos métodos se pueden clasificar en tres grupos:

#### a) Método iso-paramétrico

Las trayectorias iso-paramétricas fueron introducidas por primera vez por Loney and Ozoy [15]. En ellas se mantiene uno de los dos parámetros de una superficie paramétrica  $S(u,v)$  constante (Figura 1.6), mientras los puntos de contacto son generados a lo largo del otro parámetro [16]. Los puntos de contacto son tomados como trayectorias de la herramienta. El método iso-paramétrico es popular en el maquinado de superficies libres ya que los datos de la superficie son directamente utilizados en la generación de las trayectorias de la herramienta [17]. Aunque el intervalo entre trayectorias es controlado por la restricción de la altura de la cresta, las trayectorias generadas por este método generalmente son más densas en algunas regiones de la superficie debido a la transformación no-uniforme entre el espacio paramétrico y el euclidiano [18]. Esto lleva a una distribución no-uniforme de la cresta a lo largo de la superficie, afectando la eficiencia del maquinado. Además, es difícil generar las trayectorias de herramienta por este método en superficies que constan de varias superficies cortadas [19].

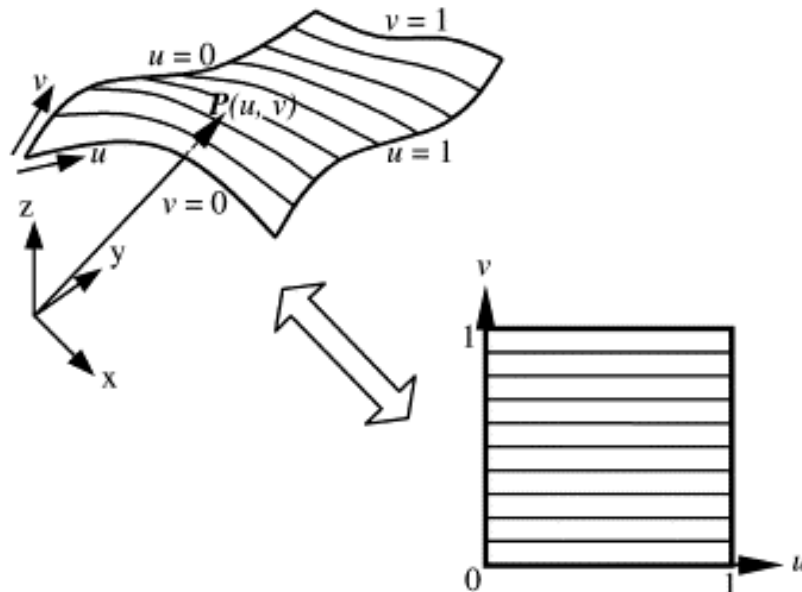


Figura 1.6. Generación de trayectorias por el método iso-paramétrico.

#### b) Método iso-planar

En el método iso-planar las trayectorias de la herramienta son calculadas interceptando la superficie de diseño con una serie de planos paralelos en el espacio cartesiano (Figura 1.7). Las

curvas obtenidas de la intersección son tomadas como trayectorias de la herramienta [20]-[22]. Típicamente los planos de corte son verticales [23]-[24] (método cartesiano) o planos horizontales [25]-[27] (método de contornos). El paso lateral (distancia entre planos paralelos) es seleccionado con base en la restricción de la altura de la cresta, aunque el método se caracteriza por el intervalo uniforme entre las trayectorias de la herramienta. Este método es muy robusto y ampliamente utilizado en sistemas CAM comerciales [28]. A diferencia del método iso-paramétrico, el método iso-planar puede ser utilizado para superficies cortadas y compuestas, y modelos de mallas triangulares. Sin embargo, la selección de los planos de intersección afecta grandemente a la longitud de la trayectoria y el tiempo de maquinado. La simplicidad del método radica en que las curvas de intersección representan los puntos de contacto de la herramienta (CC).

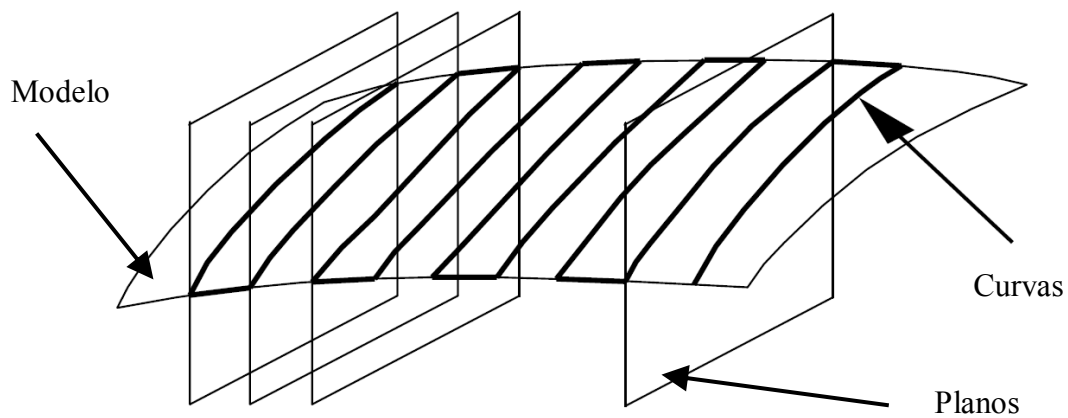


Figura 1.7. Generación de trayectorias por el método iso-planar (cartesiano).

### c) Método iso-cresta

En el método iso-cresta se selecciona una trayectoria maestra de una de las fronteras de una superficie y a partir de ella se generan las siguientes trayectorias, Figura 1.8. Cada punto de contacto en la siguiente trayectoria de la herramienta es calculado a partir de la trayectoria actual de tal modo que la cresta sea igual o menor a la máxima desviación permitida a lo largo de la superficie, [29]-[30]. El método iso-cresta está diseñado para que la cresta permanezca constante. Dada una trayectoria de corte, en [31] la curva iso-cresta es generada utilizando el método de búsqueda de bisección, el cual es reemplazado por el algoritmo iterativo de Newton en [32]. El maquinado redundante en los métodos iso-paramétrico y en el iso-planar es minimizado al mantener la altura de la cresta constante. Aunque la longitud general de la trayectoria se reduce significativamente en el método iso-cresta, comparada con los otros dos métodos, éste sufre de la inexactitud en la determinación de la curvatura en la dirección de la trayectoria de corte, además también se tiene el problema de la transformación no-uniforme de las trayectorias entre el espacio cartesiano y el paramétrico.

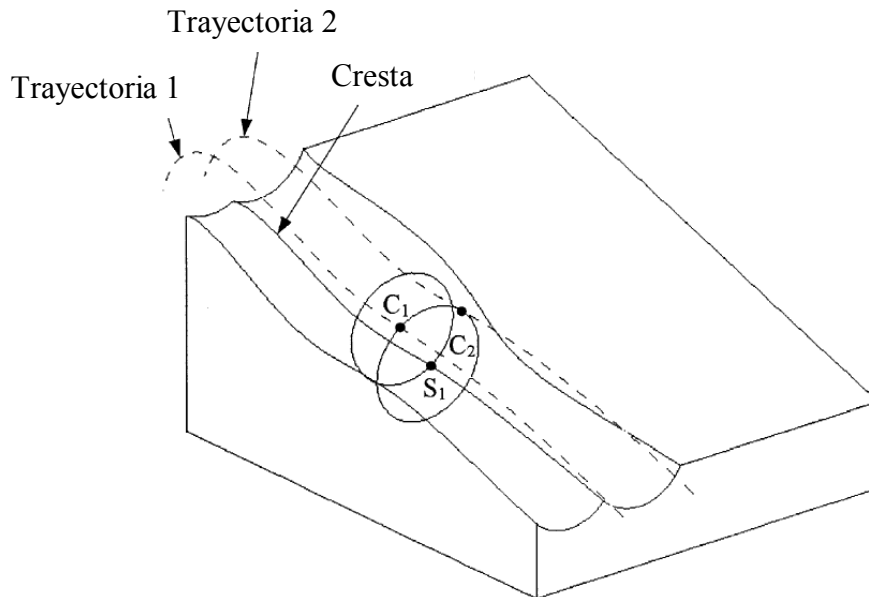


Figura 1.8. Trayectorias adyacentes de posiciones de herramienta y cresta típica.

### 1.2.2 Métodos para el posicionamiento de la herramienta

Las superficies de los modelos a maquinar son aproximadas por medio de segmentos generalmente lineales definidos por una posición inicial y una posición final. El cálculo apropiado de las posiciones de dichos segmentos es muy importante ya que afecta directamente la calidad de la aproximación. Para ello existen diferentes métodos, los cuales se presentan a continuación:

#### a) Inversión de la herramienta

El método de inversión de la herramienta es utilizado para generar superficies desplazadas (offset). Dicha superficie es obtenida a partir de cada punto de contacto tomándolo como centro de la herramienta y con posición invertida en la dirección Z. El punto de la superficie desplazada toma lugar en dirección normal a la superficie en el punto de contacto, [33][36]. La superficie completa es generada moviendo la herramienta a cada punto de contacto definido en la superficie original, Figura 1.9.

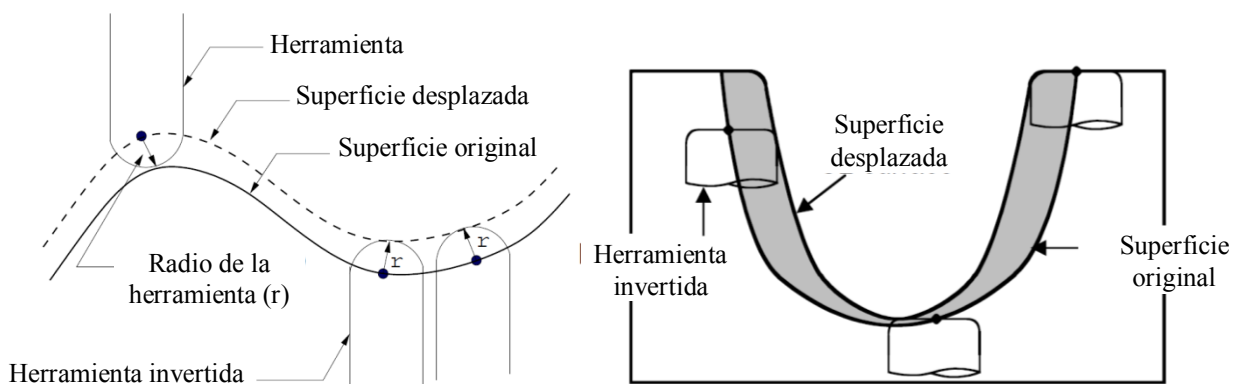


Figura 1.9. Posicionamiento por inversión de la herramienta: a) herramienta de punta de bola, y b) herramienta de filete.



**b) Superficie desplazada basada en mallas triangulares**

Un método comúnmente utilizado para modelos basados en mallas es la generación de superficies desplazadas a partir de los triángulos que los forman. Cada triángulo es desplazado en dirección normal a la superficie a partir de sus vértices, Figura 1.10. Las posiciones de la herramienta se obtienen interceptando la superficie desplazada mediante una serie de planos de corte [9][34]-[35]. La limitación del método es que solo funciona para posicionamiento de herramienta de punta de bola, donde la superficie desplazada se realiza a un valor constante.

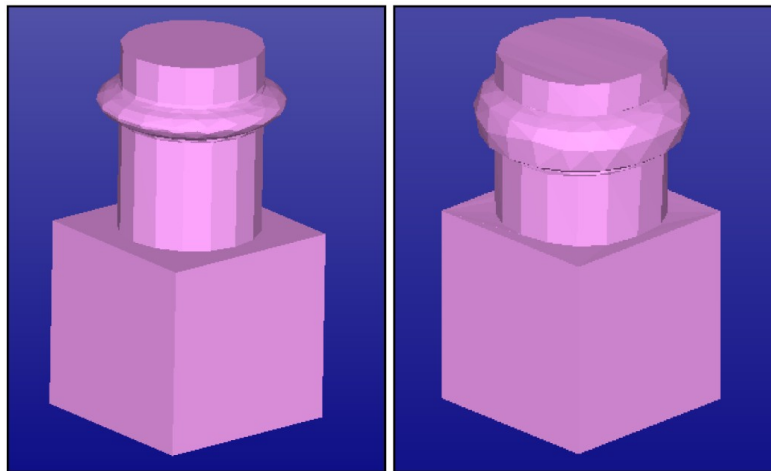


Figura 1.10. Posicionamiento de la herramienta por desplazamiento: a) modelo original, y b) modelo desplazado.

**c) Posicionamiento por rayos**

Este método es utilizado para modelos basados en mallas triangulares; tanto el modelo de la pieza como la herramienta constan de triángulos y a su vez de vértices. En cada posición de la herramienta, y a partir de cada vértice ubicado dentro de la sección de corte de la herramienta, se lanza un rayo en dirección del modelo de la pieza, Figura 1.11. El rayo interceptado con menor distancia determina la altura que debe tener en esa posición la herramienta [37]. Para generar las siguientes posiciones se mueve la herramienta a la siguiente ubicación deseada y se repite el procedimiento hasta terminar la pieza.

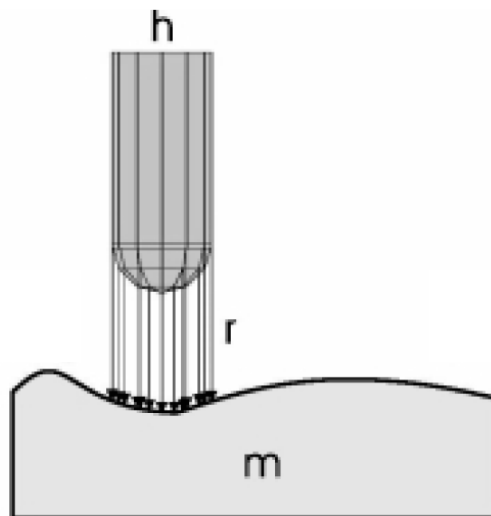


Figura 1.11. Posicionamiento de la herramienta mediante rayos.

### 1.2.3 Interferencias

Cuando se está removiendo material en un punto en particular, la herramienta puede penetrar en uno o más puntos sobre la misma superficie o sobre superficies vecinas. Si la penetración es más grande que la tolerancia especificada, entonces se le llama interferencia. Las interferencias dañan las superficie de diseño por lo que su detección y remoción durante la generación de trayectorias es muy importante.

Las interferencias más típicas utilizando una herramienta de punta de bola son: interferencia global, interferencia local e interferencia con superficies vecinas, Figura 1.12, [20][38]-[39]. Las interferencias globales, Figura 1.12a, ocurren si cualquier ángulo  $\theta$  entre la normal a la superficie  $\vec{n}$  y el eje Z es mayor a  $90^\circ$ , ocasionando que el cuerpo de la herramienta interferirá en esa región. Las interferencias locales, Figura 1.12b, ocurren cuando el radio de curvatura local en la superficie es menor al radio de la herramienta, ocasionando que el fondo de la herramienta interferirá con la superficie en esa región. Este tipo de interferencias se pueden eliminar seleccionando una herramienta con menor diámetro. Finalmente, si dos o más superficies están conectadas de tal manera que la accesibilidad a un punto de contacto en una superficie está restringido por superficies a su alrededor, entonces el maquinado de ese punto interferirá con otras superficies, Figura 1.12c.

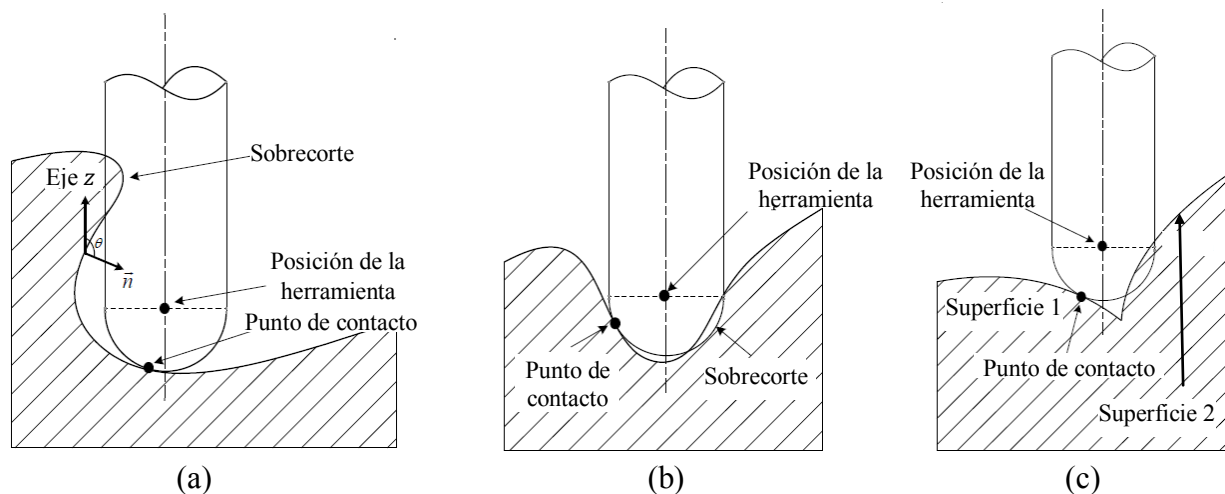


Figura 1.12. Tres tipos de interferencias: a) global, b) local, y c) con superficies vecinas.

Aunque las interferencias se refieren a un sobremaquinado debido a la herramienta, también existe el caso contrario cuando se deja un volumen sin maquinar debido a una trayectoria ineficiente causada por las burdas aproximaciones de la superficie. Esto se puede solucionar al incrementar la resolución de la aproximación de la superficie, manteniendo el error de la superficie maquinada dentro de la tolerancia especificada.

### 1.2.4 Colisiones

La mayoría de los trabajos reportados en la literatura realizan la generación de trayectorias de maquinado considerando solamente la sección de corte de la herramienta, es decir, no consideran el portaherramientas o sistema de sujeción. Sin embargo, para obtener trayectorias confiables es necesario la detección y eliminación de colisiones considerando, además de la herramienta, el portaherramientas y la pieza de trabajo.

Existen diferentes técnicas para la detección de colisiones, como aquellas basadas en operaciones booleanas donde se modela completamente el sistema de sujeción y se posiciona en cada punto de la trayectoria. Posteriormente se realiza una prueba de intersección entre el modelo y el portaherramientas, si  $modelo \cap portaherramientas \neq 0$ , (Figura 1.13), la posición de la herramienta es inválida debido a que se presenta una colisión. En caso contrario, el punto es válido debido a que la posición está libre de colisiones.

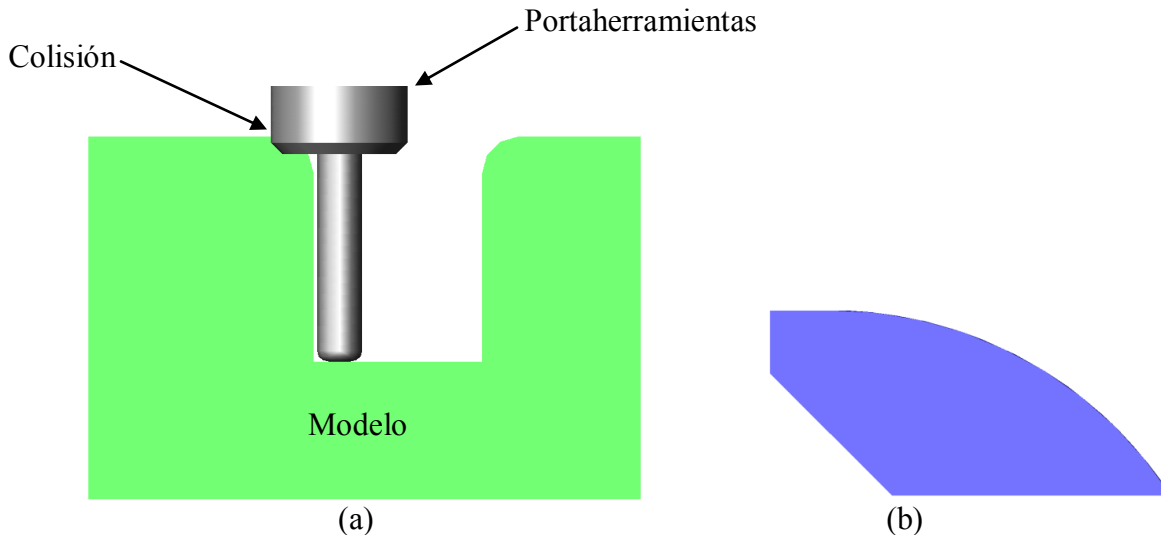


Figura 1.13. Detección de colisiones mediante operaciones booleanas: a) colisión, y b) resultado de intersección entre el modelo y el portaherramientas.

Aunque las mayores ventajas del método son la confiabilidad y su facilidad de implementación, su principal desventaja es el gran tiempo de cómputo para la detección de colisiones, convirtiéndolo en un método ineficiente. Para evitar el uso de operaciones booleanas, se han desarrollado técnicas alternativas basadas en evaluaciones geométricas simples. Una de estas técnicas se presenta en [40], en donde la detección de colisiones para un punto de análisis dado  $(x_0, y_0, z_0)$  y radio de herramienta  $r$ , Figura 1.14, consiste en determinar si existen puntos  $(x_i, y_i, z_i)$ , sobre la superficie discretizada, que se encuentren dentro del espacio geométrico de la herramienta o portaherramientas. Si al menos un punto cumple esta condición, entonces la posición de la herramienta no es válida. La ecuación (1.6) describe un conjunto de ecuaciones para verificar las posibles colisiones en las distintas secciones del modelo geométrico de la herramienta y el portaherramientas, los cuales se modelan como una serie de cilindros apilados con una esfera en la parte más baja.

$$\begin{aligned}
 (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 &< r^2 && \text{para } z_i < z_0 \\
 (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 &< r^2 && \text{para } z_0 \leq z_i < z_0 + L \\
 (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 &< r_1^2 && \text{para } z_0 + L \leq z_i < z_0 + L_1 \\
 (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 &< r_2^2 && \text{para } z_0 + L_1 \leq z_i < z_0 + L_2
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

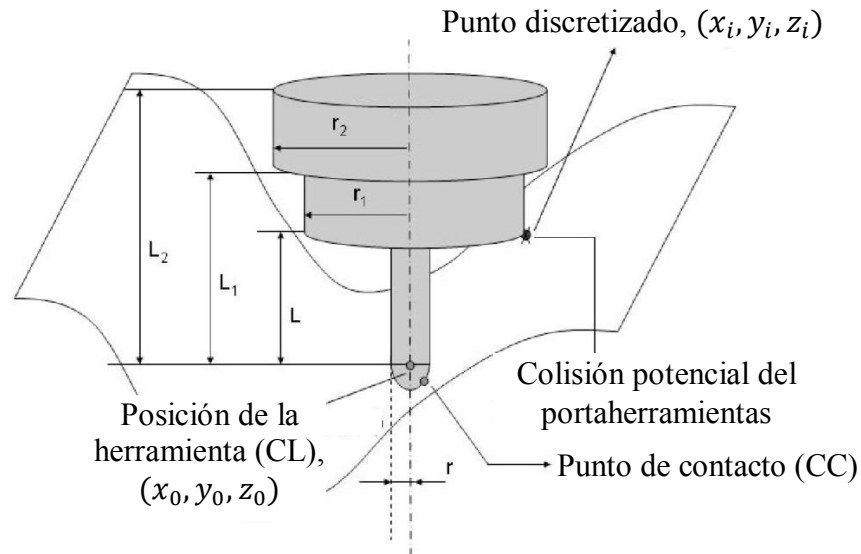


Figura 1.14. Detección de colisiones en el portaherramientas.

La técnica mostrada tiene la ventaja de trabajar de manera numérica lo que hace al algoritmo más rápido para la detección de las colisiones, aunque la precisión del cálculo depende de la densidad de puntos generados sobre la superficie. Existe otra técnica similar pero cuya formulación permite mayor flexibilidad en cuanto a la representación geométrica del portaherramientas así como el análisis de interferencias y colisiones para tres tipos de herramientas de corte, planas, filete y de punta de bola [38]. La Figura 1.15 muestra el esquema propuesto para detección de colisiones. El perfil está constituido por seis segmentos, AB (fondo del filo), BC (filete), CD (filo lateral), DE (filo lateral y cuerpo de la herramienta), EF (portaherramientas) y FG (portaherramientas), con parámetros  $\alpha, \beta, \gamma, R_F, R_T, R_H, L_T, L_S$  y  $L_H$ , y origen en  $r - o - h$ . La ecuación (1.7) describe un conjunto de ecuaciones para verificar las posibles colisiones de acuerdo a la distancia del punto de inspección al eje de la herramienta en el eje  $o - r$ .

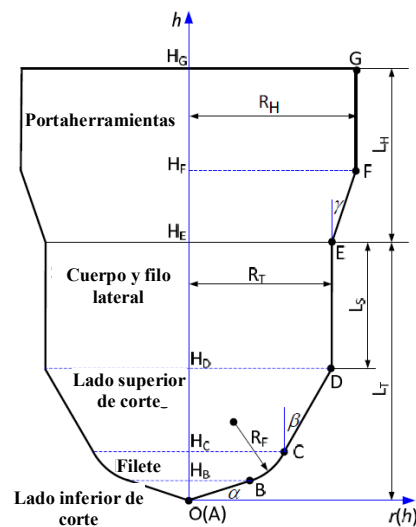


Figura 1.15. Modelo geométrico del sistema completo para la detección de colisiones (herramienta y portaherramientas).

$$r(h) = \begin{cases} 0, & (h < 0) \\ \frac{h}{\tan \alpha}, & (0 \leq h < H_B) \\ AB \cdot \cos \alpha - R_F \cdot \sin \alpha + \sqrt{R_F^2 - (R_F \cdot \cos \alpha - h + AB \cdot \sin \alpha)^2}, & (H_B \leq h < H_C) \\ R_T - (L_T - L_S - h) \cdot \tan \beta, & (H_C \leq h < H_D) \\ R_T, & (H_D \leq h < H_E) \\ (h - L_T) \cdot \tan \gamma + R_T, & (H_E \leq h < H_F) \\ R_H, & (H_F \leq h \leq H_G) \end{cases}, \quad (1.7)$$

Las relaciones geométricas (1.7) son utilizadas para detectar si un punto de inspección  $(x_i, y_i, z_i)$  está o no dentro del espacio geométrico de la herramienta y/o portaherramientas. Geométricamente, cuando la herramienta presenta interferencias o colisiones con la superficie de diseño, al menos un punto está dentro de la superficie de revolución del perfil de la Figura 1.15. En otras palabras, la distancia entre este punto y el eje de la herramienta es menor que el radio del perfil a la altura del punto que está siendo evaluado.

### 1.2.5 Estrategias de maquinado

El objetivo de las estrategias de maquinado es unir las posiciones de la herramienta mediante un patrón de secuencia claramente definido de acuerdo a la técnica seleccionada. La técnica mediante la cual son unidas las posiciones de la herramienta afecta directamente al tiempo de maquinado [41]. Una estrategia apropiada puede resultar en la mínima longitud de trayectoria, el mínimo número de retracciones y la flexibilidad de ser localmente refinada para alcanzar las propiedades geométricas de la superficie. Las estrategias de maquinado comúnmente utilizadas son [14][42]: Zigzag y contornos.

#### Zigzag

Esta estrategia consiste en generar líneas paralelas en todo el dominio a maquinar alternando la dirección entre trayectorias adyacentes dado que el corte principal se considera en ambas direcciones. Esta técnica permite el contacto continuo de la herramienta sin que esta tenga que perder tiempo en establecer una nueva posición de corte, esto hasta que el dominio completo ha sido recorrido. La implementación de esta estrategia es la más simple, Figura 1.16a.

#### Contornos

La técnica de maquinado de contornos utiliza trayectorias derivadas de los desplazamientos (offsets) sucesivos de los fronteras a maquinar, ya sea desde el centro hacia los límites externos, o desde ellos hacia el centro, Figura 1.16b. Los contornos pueden ser construidos mediante el cálculo del diagrama de Voronoi, pair-wise offseting, y enfoques basados en píxeles. Estos métodos pueden ser computacionalmente costosos.

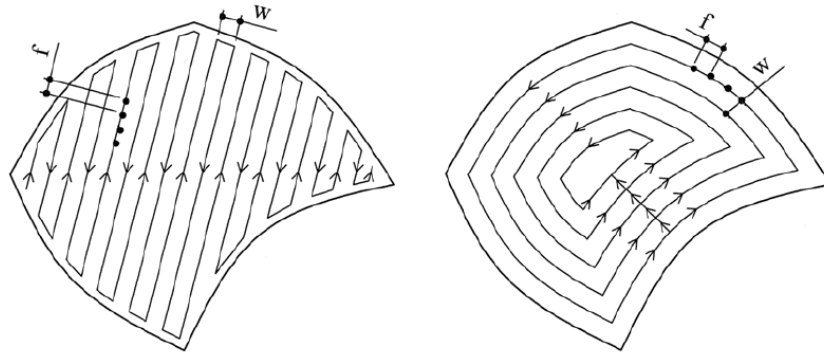


Figura 1.16. Estrategias de maquinado: a) zigzag, y b) contornos.

### 1.2.6 Error en la dirección de maquinado

Cuando el maquinado se realiza utilizando una estrategia de maquinado en zigzag, es decir, la herramienta se mueve en línea recta entre dos puntos de contacto sucesivos, el error entre las trayectorias de maquinado y la superficie de diseño debe ser menor a la tolerancia especificada. A partir de la Figura 1.17 se puede calcular la máxima distancia entre dos posiciones de herramienta consecutivas que garanticen la tolerancia requerida [33]:

$$\delta_{cl} = 2[2\tau(r + \rho_f) - \tau^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1.8)$$

donde:

$\delta_{cl}$  = Distancia entre dos posiciones de herramienta consecutivas en la dirección de maquinado

$r$  = Radio de la herramienta

$\rho_f$  = Curvatura en los puntos de contacto en la dirección de maquinado

$\tau$  = Desviación de la trayectoria de herramienta calculada respecto de la superficie de diseño

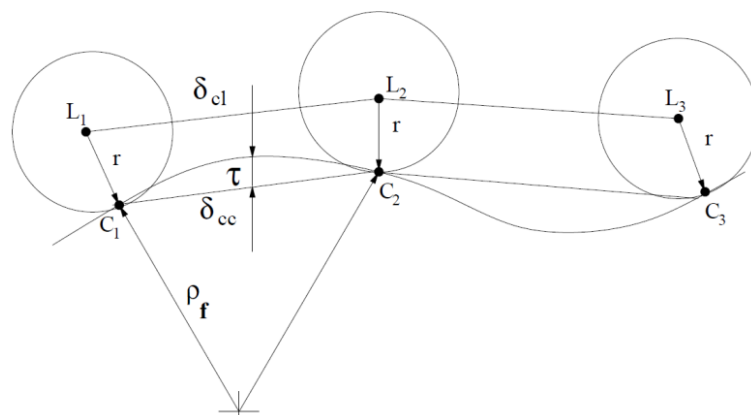


Figura 1.17. Determinación del paso en la dirección de maquinado.

### 1.2.7 Error en dirección ortogonal a la dirección de maquinado

La longitud de las trayectorias de herramienta se ve claramente afectada por la distancia entre trayectorias laterales, conocida como “paso lateral”. Este parámetro en cierta medida determina la longitud de la trayectoria total, entre más pequeño sea el paso lateral mayor es la cantidad de

planos de corte y por consiguiente la longitud de la trayectoria total de la herramienta se incrementa. Por esta razón se debe seleccionar un paso lateral lo más grande posible sin que el error entre la superficie de diseño y la superficie maquinada sea mayor a la tolerancia especificada. El paso lateral ( $l$ ) es una función de la altura de la cresta ( $h$ ) que se refiere al material no maquinado entre trayectorias adyacentes, el radio de la herramienta ( $r$ ), y del radio de curvatura local ( $\rho$ ). Debido a que en general la superficie de diseño varía a lo largo del dominio, se debe adaptar el paso lateral de acuerdo con la geometría en esa región y no un paso constante como si se tratara de una superficie plana en todo el dominio. En la Figura 1.18 se muestra un caso general para la determinación del paso lateral para una superficie no-plana. El primer paso es aproximar la superficie entre las trayectorias mediante un arco circular con extremos en los puntos de contacto A y B, del cual se obtiene la curvatura ( $\rho$ ) en esa región [43]-[44].

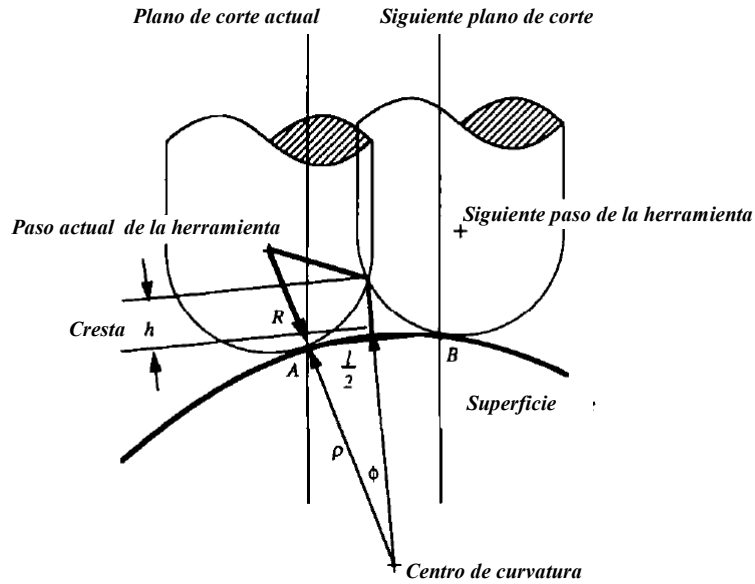


Figura 1.18. Determinación del paso lateral.

Del triángulo mostrado en la Figura 1.18 con lados  $R$ ,  $(\rho + R)$  y  $(\rho + h)$ , se puede escribir la ley de cosenos como [21]:

$$(\rho + R)^2 + (\rho + h)^2 - R^2 = 2(\rho + R)(\rho + h)\cos\phi \quad (1.9)$$

y calculando el  $\cos\phi$  en función de  $l$  a partir de la identidad trigonométrica  $\text{sen}^2\phi + \cos^2\phi = 1$ , se obtiene,

$$\text{sen}\phi = \frac{l}{2\rho} \quad (1.10)$$

$$\cos\phi = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{l}{2\rho}\right)^2\right]} \quad (1.11)$$

sustituyendo (1.11) en (1.9) y resolviendo para  $l$ ,

$$l = \frac{|\rho| \sqrt{\{4(\rho + R)^2(\rho + h)^2 - [\rho^2 + 2Rh + (\rho + h)^2]^2\}}}{(\rho + R)(\rho + h)} \quad (1.12)$$

Esta ecuación es válida para cualquier curvatura, sin embargo para  $\rho \gg R$ , la superficie entre dos trayectorias adyacentes puede ser aproximada por un plano sin pérdida de precisión, reduciendo la ecuación (1.12) a:

$$l = 2\sqrt{2Rh - h^2} \quad (1.13)$$

donde  $l$  está dado en la dirección del vector que une dos trayectorias adyacentes de la herramienta. Sin embargo, para determinar el intervalo en el plano horizontal es necesario proyectar  $l$  en dicho plano. En la Figura 1.19 se muestran dos casos en donde el ángulo  $\theta$  o pendientes del vector varían. Para el caso de la Figura 1.19a donde  $\theta$  es pequeño, la cresta está formada por las caras de la esfera del cortador. El intervalo de intersección de los planos está dado por [45]:

$$\delta = l \cos \theta = 2\sqrt{2rh - h^2} \cos \theta \quad (1.14)$$

Cuando  $\theta$  es grande (Figura 1.19b), una de las caras está formada por la parte cilíndrica o cuerpo de la herramienta y la otra cara está formada por la esfera de la herramienta. En este caso el intervalo para los planos de intersección se convierte en [46]:

$$\delta = r - (r - h) \sin \theta + \sqrt{2rh - h^2} \cos \theta \quad (1.15)$$

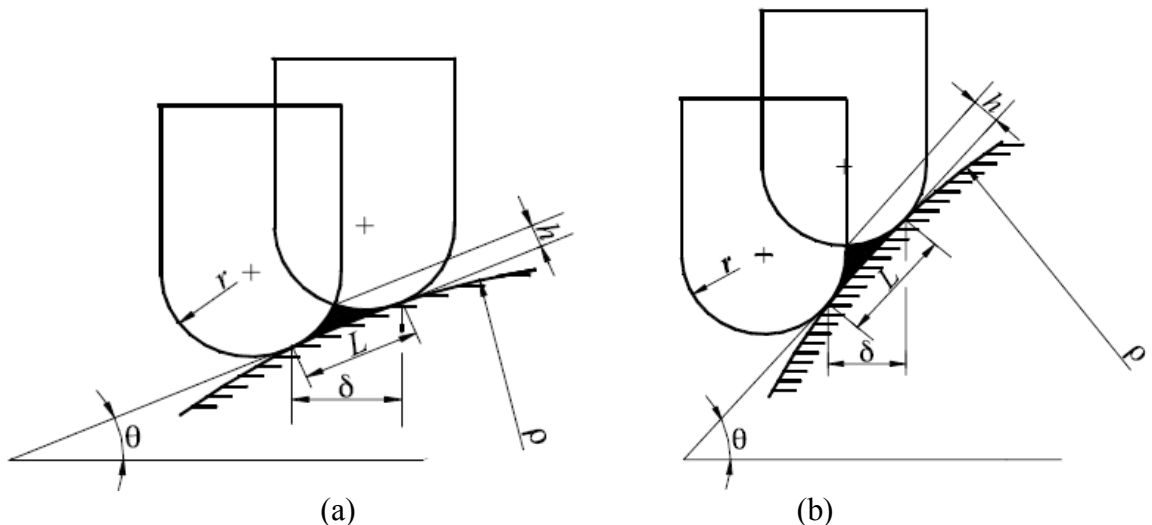


Figura 1.19. Determinación del intervalo de intersección de planos: a)  $\theta$  pequeño, y b)  $\theta$  grande.

Generalmente la selección del intervalo de los planos de intersección se obtiene del menor intervalo calculado en la dirección de maquinado de la trayectoria inmediata anterior.



# Capítulo 2

## Generación de trayectorias de herramienta

En este Capítulo se presentan distintas técnicas para la generación de trayectorias de herramienta para el maquinado de modelos 3D a partir de formas aproximadas y formas rectangulares. En la primera parte se presenta el desarrollo de técnicas generales para la generación de trayectorias, y en la segunda parte se analizan y desarrollan las particularidades involucradas en las trayectorias de herramienta para desbaste y acabado.

### 2.1 Maquinado de modelos 3D

El maquinado de partes generalmente consta de dos operaciones: desbaste y acabado. En el desbaste se remueve la mayor cantidad de material de la materia prima para aproximar la pieza deseada, y en la operación de acabado se le dan las dimensiones y acabado superficial finales. La operación de desbaste se realiza a partir de productos semielaborados como lingotes, tochos u otras piezas previamente conformadas por otros procesos como moldeo, forja etc. Por otro lado, en la operación de acabado la entrada puede ser un modelo proveniente directamente de la operación de desbaste o de algún proceso anterior, es decir, que no se le aplicó un maquinado de desbaste. La característica principal de la forma que se recibe en esta operación es que solo tiene una pequeña capa de material innecesario, que es removida en este proceso creando el acabado superficial y características dimensionales apropiadas.

La Figura 2.1 muestra un esquema general del maquinado. El proceso tiene como entrada una materia prima, después pasa a un post-procesamiento (maquinado de desbaste y/o acabado) del que se obtiene la pieza final. Un esquema más detallado del maquinado de partes se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.2, en el cual se tiene como entrada un modelo digital 3D de la pieza final, la materia prima (3D) y los parámetros del proceso.

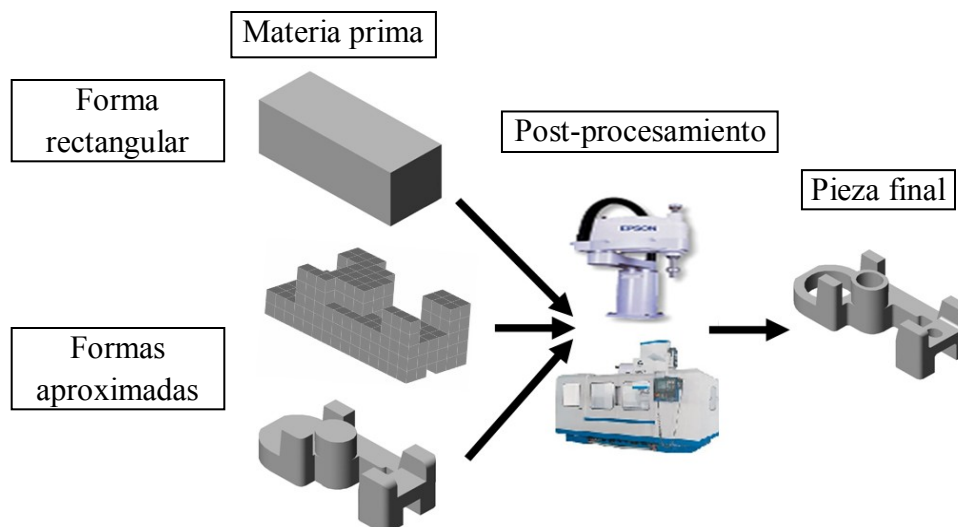


Figura 2.1. Esquema general del maquinado de partes.

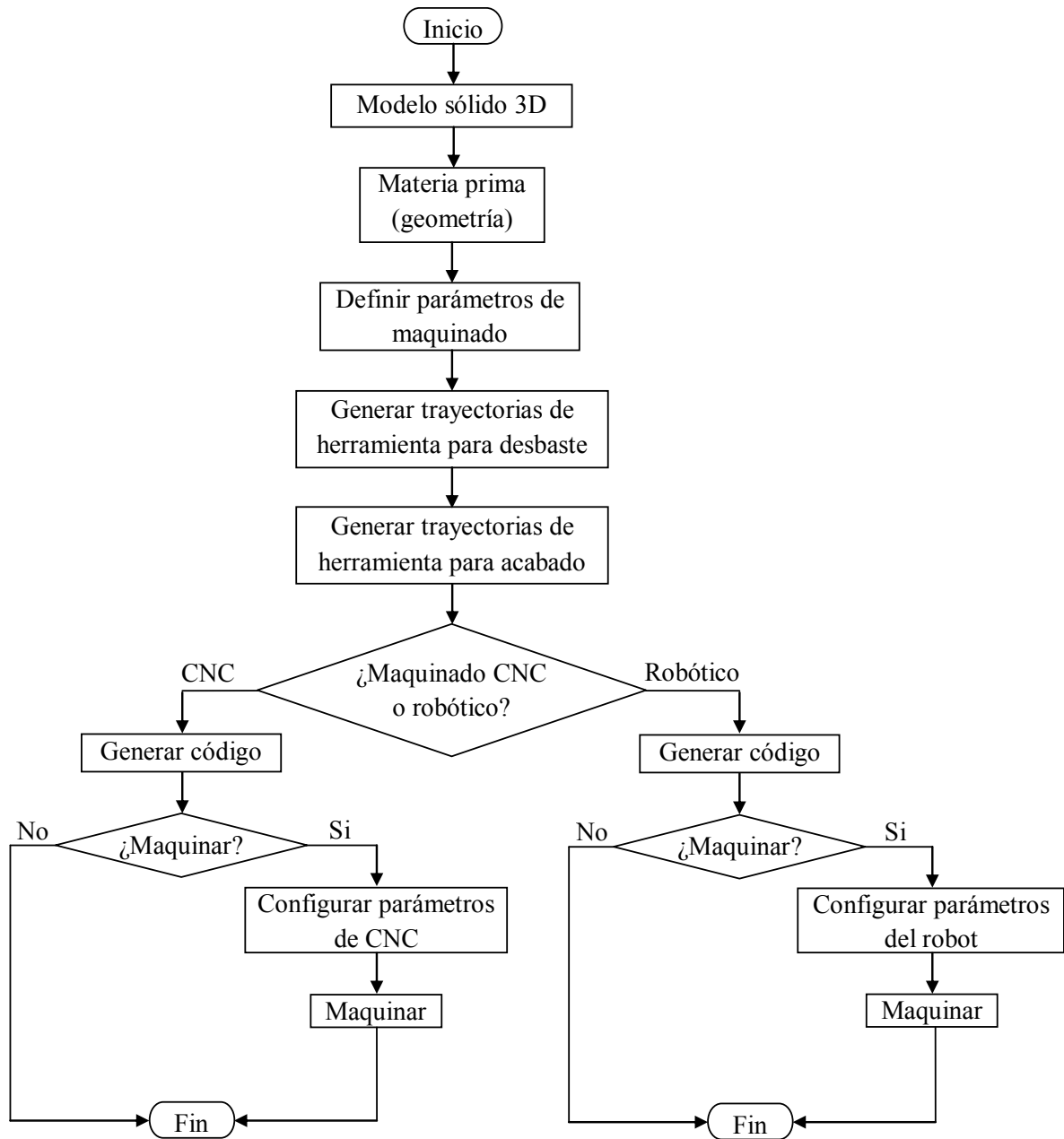


Figura 2.2. Diagrama de flujo para el maquinado de modelos 3D.

## 2.2 Modelo sólido y materia prima

El modelo sólido 3D de la pieza final representa la forma final a la que se desea llegar a partir de la remoción del material excedente de la materia prima (Figura 2.3). La materia prima se puede clasificar en dos grupos principales de acuerdo a su forma: formas rectangulares y formas aproximadas. En las formas rectangulares la materia prima es un bloque a partir del cual se desea obtener la pieza final y en las formas aproximadas no se tiene restricción en cuanto a la forma que pueda tener. Dichas formas pueden provenir de procesos anteriores como, la forja, fundición, moldeo por inyección, prototipado rápido o bien de cualquier forma que se pueda representar mediante un modelo CAD. Dependiendo del nivel de aproximación, las materias primas de forma aproximada no siempre requerirán de un desbaste. Sin embargo, sea cual sea la forma de la

materia prima, ésta debe contener el suficiente material para obtener la pieza final. La Figura 2.4 muestra diferentes opciones para la materia prima del modelo de la Figura 2.3.

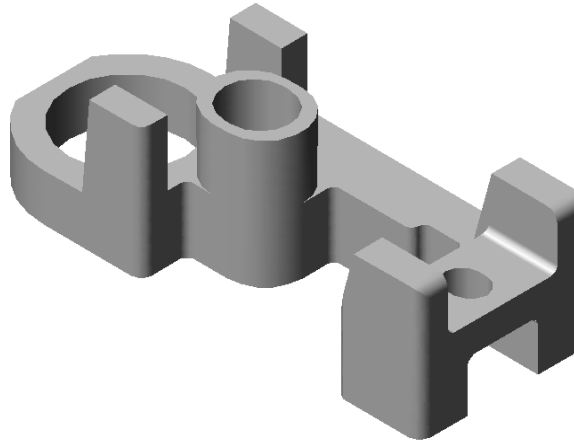


Figura 2.3. Modelo 3D.

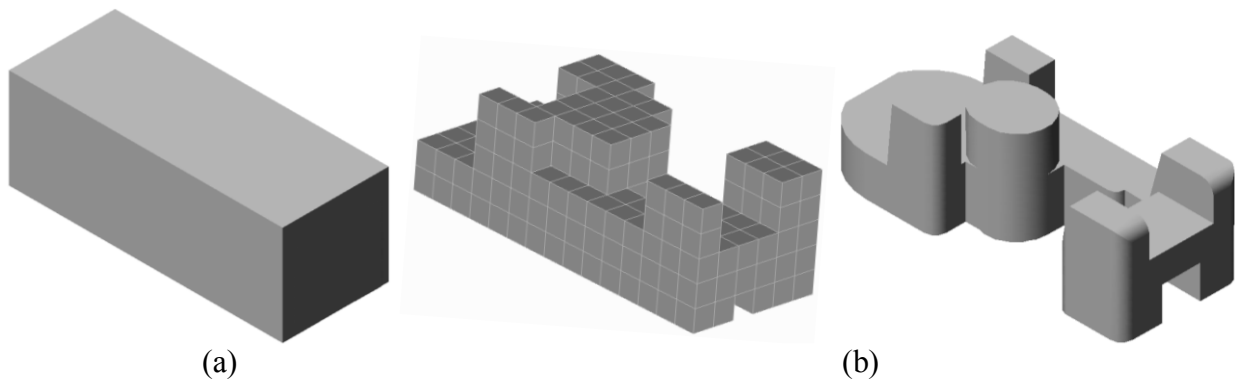


Figura 2.4. Modelos de materias primas, a) rectangular, y b) aproximadas.

### 2.3 Parámetros del maquinado

Los parámetros en el maquinado definen la manera en que se generarán las trayectorias. Entre los parámetros más importantes se encuentran los siguientes:

#### 2.3.1 Herramientas de corte y sistema de sujeción

Para realizar el maquinado se utilizan diferentes herramientas de corte de acuerdo al proceso a desarrollar. Los tres tipos de herramientas comúnmente utilizadas en el maquinado son: herramientas de corte planas, de puntas de bola y de filete, Figura 2.5. Aunque estas herramientas se pueden utilizar en cualquier operación (desbaste y acabado), generalmente las herramientas de corte planas y de filete son utilizadas para desbaste debido a su alta tasa de remoción de material, mientras que las de punta de bola son utilizadas para operaciones de acabado.

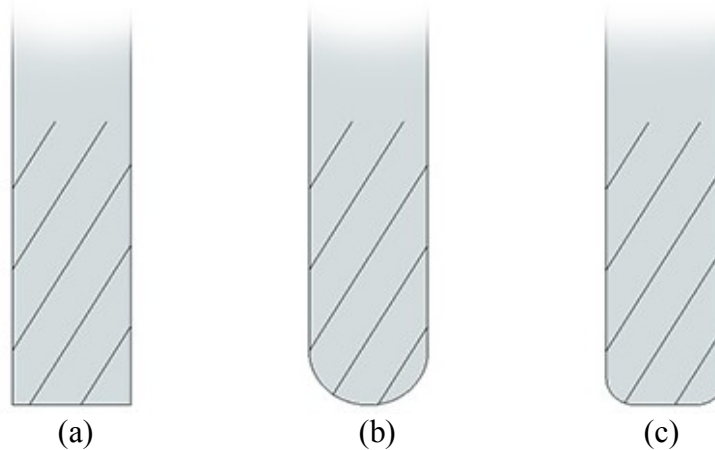


Figura 2.5. Herramientas de corte: a) plana, b) punta de bola, y c) de filete.

Para la generación de trayectorias eficientes y confiables se requiere que todos los parámetros involucrados en el proceso real sean considerados, por esta razón el sistema de sujeción de la herramienta (holder) también debe ser incluido en el análisis para evitar colisiones durante el proceso. En la imagen de la Figura 2.6 se muestran distintos sistemas de sujeción o portaherramientas.



Figura 2.6. Sistemas de sujeción para herramientas de corte.

### 2.3.2 Profundidad e intervalos de corte

La profundidad de corte representa la distancia que bajará la herramienta en cada pasada de desbaste en la dirección  $Z$ , Figura 2.7a, y el intervalo de corte se refiere a la distancia que habrá entre trayectorias paralelas de la herramienta, Figura 2.7b. En el desbaste ambas se pueden calcular en función del diámetro de la herramienta, sin embargo, en el acabado estos parámetros son función de la superficie a maquinarse y de la tolerancia especificada (sección 1.2.6 y 1.2.7).

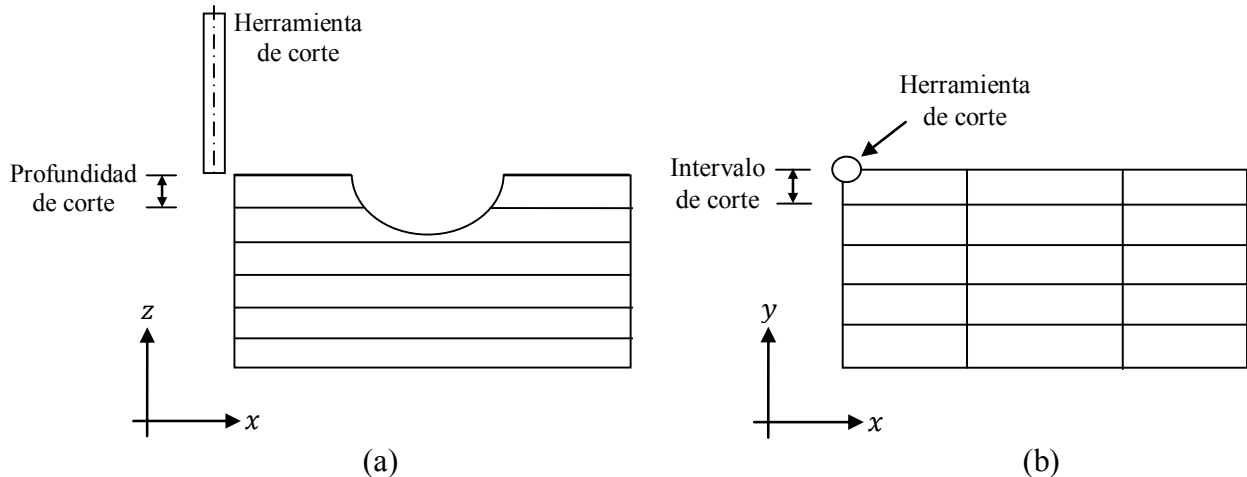


Figura 2.7. Parámetros del maquinado: a) profundidad de corte, y b) intervalo de corte.

### 2.3.3 Tolerancias

La tolerancia indica el rango de la desviación dimensional aceptable del tamaño nominal de la pieza final. En el maquinado esto se controla a través de dos parámetros: el error en la dirección de maquinado generado por las facetas durante la aproximación y el error entre trayectorias paralelas conocido como cresta. El análisis de estos errores se explica a detalle en las secciones 1.2.6 y 1.2.7. En la generación de trayectorias, las tolerancias tienen un papel fundamental, ya que de ellas depende la calidad de la aproximación (número de posiciones de la herramienta) y por consiguiente el tiempo de cálculo.

## 2.4 Generación de trayectorias de herramienta

A continuación se presentan los diferentes algoritmos propuestos para la generación de trayectorias de maquinado para diferentes tipos de herramientas.

### 2.4.1 Offset del modelo CAD

Este es el primer método propuesto para la generación de trayectorias de herramienta, el cual se desarrolla para una herramienta de punta de bola. De la revisión bibliográfica presentada en el Capítulo 1 se observó que la generación de las trayectorias para este tipo de herramienta está basada en la generación de una superficie desplazada una distancia igual al radio de la herramienta de la superficie del modelo original. De esta manera cualquier punto sobre dicha superficie representa la posición del centro de la herramienta y se garantiza que será tangente en algún punto de la superficie original sin llegar a penetrar o interferir otra zona del modelo. Los métodos propuestos en la literatura utilizan diferentes métodos para obtener la superficie desplazada, pero la mayoría se basan en la discretización de la superficie ya sea por medio de puntos, triángulos, cuadriláteros o diferentes áreas, lo que resulta muy costoso computacionalmente hablando. El método propuesto consta de los siguientes pasos:

#### ***Generación de la superficie desplazada***

Como una alternativa a la discretización durante la generación de la superficie desplazada, se propone utilizar la función desplazamiento (offset) que se encuentra por default en cualquier sistema CAD. Esta función desplaza cada una de las caras del modelo a la distancia especificada, reparando aquellas regiones en donde es necesario extender o cortar dichas caras, para generar una superficie continua. El resultado final es un modelo que envuelve al modelo original. La

Figura 2.8 presenta un modelo 3D al cual se le aplicó la función desplazamiento obteniendo como resultado el modelo de la Figura 2.8b.

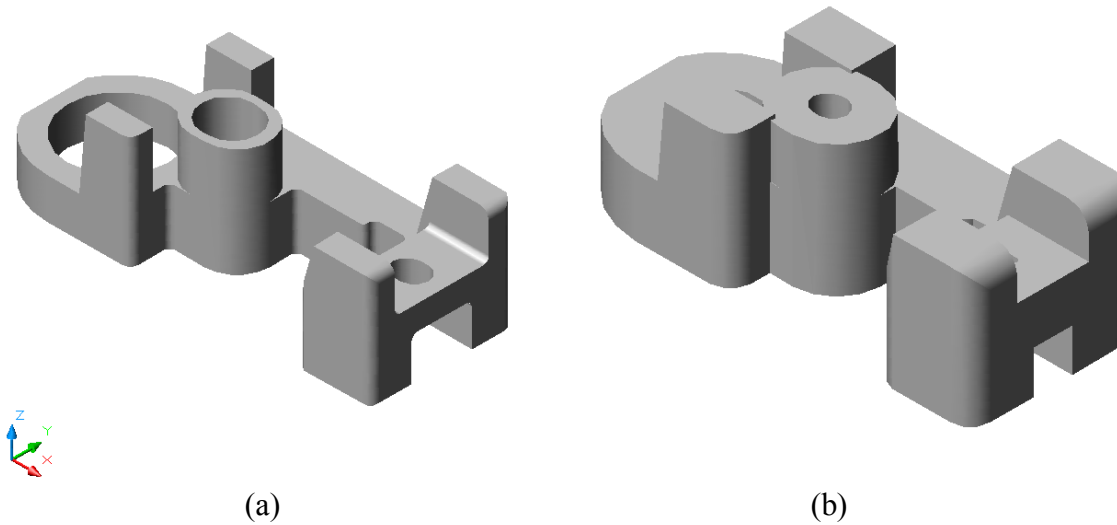


Figura 2.8. Superficie desplazada: a) modelo original, y b) modelo desplazado.

#### ***Obtención de las posiciones de la herramienta***

El segundo paso es determinar las posiciones de la herramienta. Cualquier punto sobre la superficie desplazada es tangente en algún punto a la superficie del modelo original, de tal manera que estos puntos también pueden representar las posiciones del centro de la herramienta, o bien, el centro de la esfera libre de interferencias.

Para obtener dichas posiciones, primero se debe seleccionar la estrategia de maquinado que se utilizará. Para el cálculo de cada posición, se utilizan operaciones geométricas del tipo booleanas. El método consiste en definir un punto sobre el plano  $XY$  en donde se desea obtener la posición, dicho punto debe estar dentro del dominio del modelo en ese plano. Para cualquier modelo se conoce su altura máxima, entonces al punto que se definió sobre el plano  $XY$  se le asigna una coordenada en  $Z$  mayor a la altura máxima del modelo. A partir de este punto origen se lanza un rayo en dirección  $(0,0,-1)$  y se obtiene la altura de choque entre el rayo y el modelo que representa la altura de la herramienta en esa posición del plano  $XY$ , Figura 2.9. El procedimiento se repite moviendo la posición  $XY$  hasta cubrir el modelo completamente. La Figura 2.9 muestra un perfil tomado del modelo de la Figura 2.8. Las líneas interiores representan al modelo original y las exteriores al modelo desplazado.

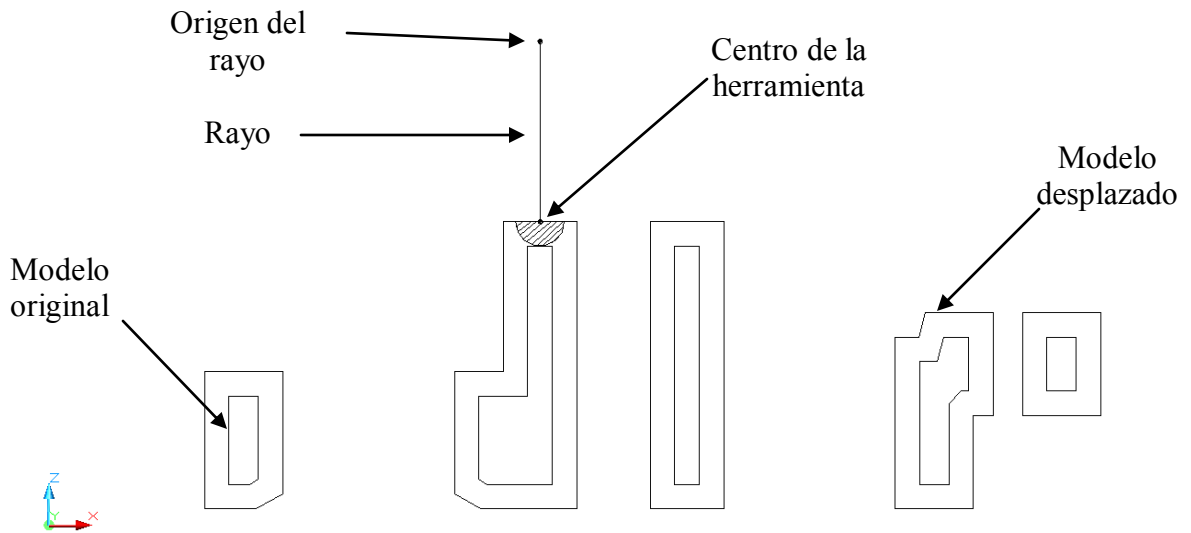


Figura 2.9. Cálculo de posiciones de la herramienta.

La estrategia de maquinado que se utiliza es una estrategia de maquinado en zigzag bi-direccional, por lo que las posiciones de la herramienta se generan a lo largo del eje  $X$ , en el plano  $XZ$  y luego se mueve la coordenada  $Y$  para repetir el mismo procedimiento hasta llegar al final del modelo. Finalmente cuando han sido generadas todas las posiciones sobre el modelo se unen para generar una trayectoria continua en forma de zigzag, Figura 2.10. El método para la unión de los puntos en trayectoria zigzag se explica en el Capítulo 3.

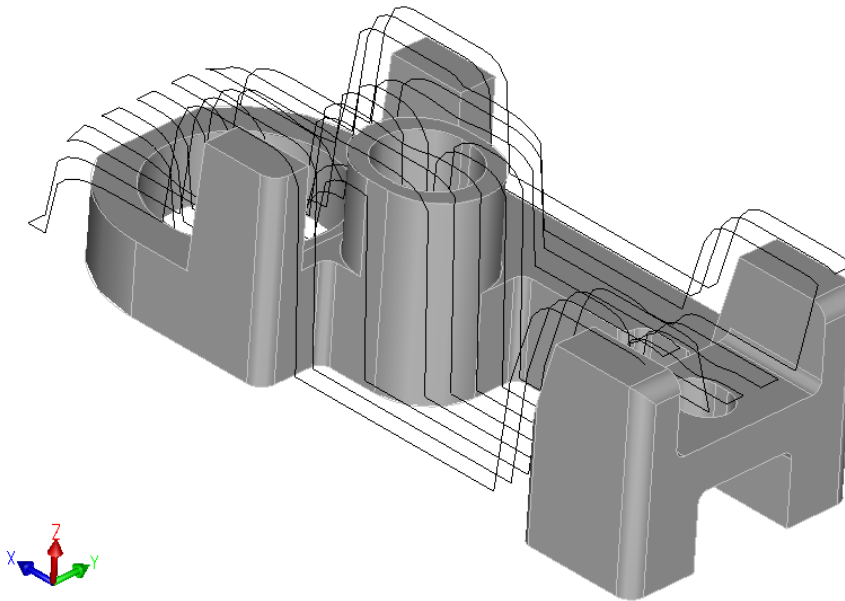


Figura 2.10. Trayectorias de herramienta.

Las ventajas y desventajas del método offset son:

### Ventajas

- La superficie offset se genera con solo una operación geométrica, evitándose así la discretización de la superficie.

- Las posiciones que se obtienen son únicamente las accesibles para un sistema de tres ejes.
- Las posiciones de la herramienta se generan libres de interferencias.

### **Desventajas**

- Debido a que la función desplazamiento hace un desplazamiento de la superficie original constante, solo es posible el cálculo de las trayectorias para herramientas de punta de bola, ya que en herramientas planas y de filete el desplazamiento de la superficie debe ser variable de acuerdo a la posición de la herramienta.
- La operación de desplazamiento de los sistemas CAD no funciona para todas las piezas, de tal manera que el algoritmo está limitado a solo aquellos modelos en donde la función pueda ser aplicada correctamente.
- La operación desplazamiento tampoco funciona para cualquier valor de desplazamiento, y esto depende totalmente de la geometría de la pieza.
- Al generar cada posición en la superficie desplazada se utilizan operaciones booleanas lo cual tiene un alto costo computacional (tiempo de procesamiento) cuando el número de posiciones a calcular es grande.
- El análisis de colisiones se vuelve complicado porque la única información que se tiene es el modelo original y la superficie desplazada, y para la detección de colisiones se tendría que recurrir a operaciones booleanas que son muy costosas en tiempo de cómputo.

Este método presenta muchas limitaciones, por los que no es una buena opción en el cálculo de las trayectorias para cualquier modelo.

### **2.4.2 Posicionamiento por iteración**

Este método está basado en la simulación de la herramienta completa para eliminar las posibles interferencias en un solo paso, y que cada posición analizada se pueda escribir directamente dentro del código de maquinado, evitándose así utilizar la función desplazamiento y garantizándose su funcionamiento para el cálculo de trayectorias sobre cualquier modelo. Al igual que el método anterior este también está formulado solo para el cálculo de trayectorias utilizando herramientas de punta de bola. El método se resume en las siguientes etapas:

#### ***Obtención de un punto sobre la superficie del modelo***

El primer paso para obtener una posición de la herramienta es calcular la altura de un punto definido en el plano  $XY$  en una región dentro del dominio del modelo en ese plano. Esto se hace definiendo el punto sobre el plano  $XY$  y asignándole una coordenada o altura en  $Z$  mayor a la máxima altura del modelo. Desde este punto se lanza un rayo en dirección  $(0,0,-1)$  con la característica de que el diámetro de dicho rayo es igual al de la herramienta (es decir, el rayo simula el cuerpo de la herramienta). El punto de choque entre el rayo y la superficie del modelo representa el punto mínimo hasta el que es posible llegar con la herramienta definida, Figura 2.11.



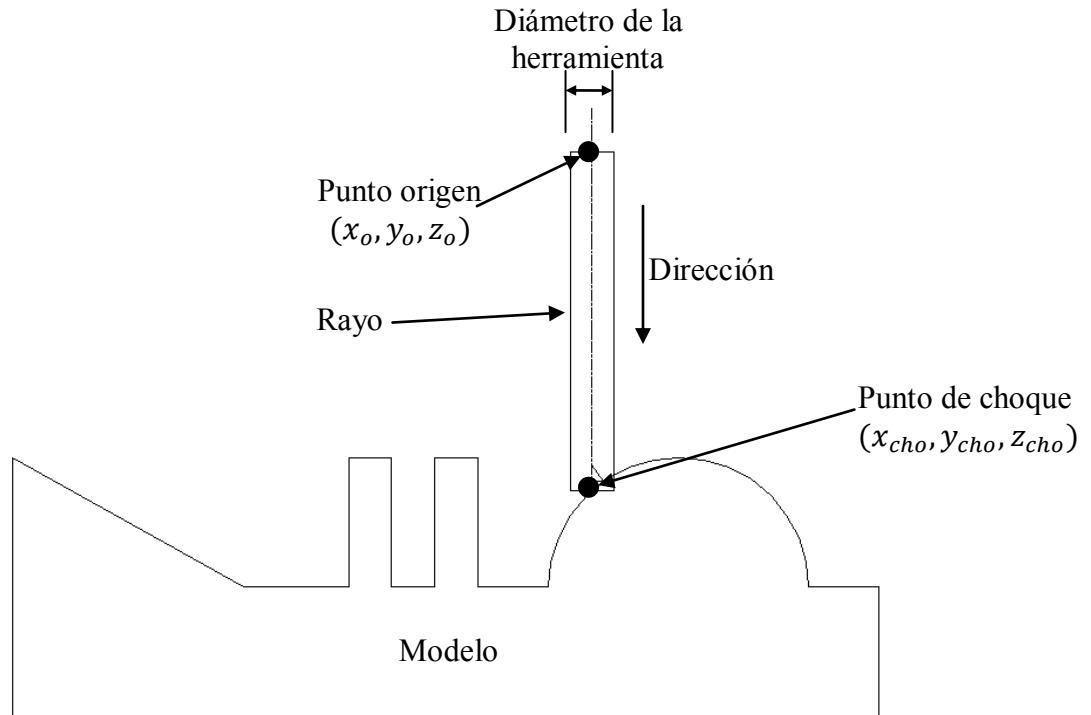


Figura 2.11. Esquema del proceso de obtención de puntos sobre la superficie.

### ***Obtención de las posiciones de la herramienta***

Con base en la posición mínima que puede alcanzar la herramienta,  $(x_{cho}, y_{cho}, z_{cho})$ , se calcula la posición final de la misma desplazando dicha posición (punto de choque) una distancia igual al radio de la herramienta en la dirección de Z positiva (0,0,1) que representará la posición temporal del centro de la herramienta  $(x_c, y_c, z_c)$ , Figura 2.12. Posteriormente se calcula la distancia mínima entre el centro de la herramienta y la superficie del modelo. Si la distancia es igual al radio de la herramienta, entonces la posición es válida y se termina el posicionamiento de la herramienta, convirtiéndose la posición temporal en la posición final. Sin embargo, si la distancia es menor, se calcula la distancia “co” que representa el cateto opuesto del triángulo formado por ca y la distancia, a la distancia mínima se le asigna un valor igual al radio de la herramienta para recalcular la altura del triángulo (ca) que garantiza que la distancia del centro de la herramienta al punto más cercano a la pieza sea igual al radio, y nuevamente se calcula la distancia mínima entre esta nueva posición de la herramienta y la superficie del modelo. Si la distancia es igual al radio, termina el posicionamiento de la herramienta. Si no, se repite el procedimiento hasta que se cumpla la condición. La Figura 2.13 muestra el diagrama de flujo del procedimiento de posicionamiento de la herramienta.

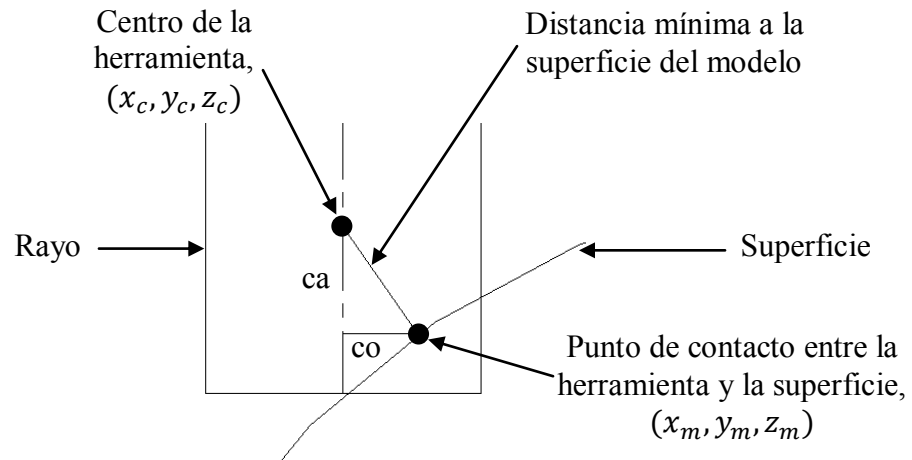


Figura 2.12. Posicionamiento de la herramienta mediante iteración.

### **Generación de segmentos lineales y circulares**

La mayoría de los métodos para la generación de trayectorias disponibles en la literatura utilizan segmentos lineales para aproximar el modelo, método conocido como interpolación lineal. Este método es el más sencillo pero también representa un código de maquinado más grande, además de que el acabado y la precisión dimensional se ven claramente afectadas por este tipo de interpolación.

En el método propuesto se hace una optimización para minimizar el tamaño del código. Para esto se utilizan métodos de extrapolación que permitan disminuir el código y mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional mediante el uso de interpolación lineal y circular (no lineal) de acuerdo a cada sección. El proceso consiste en generar tres posiciones de herramienta en el mismo plano,  $P_1(P_1x, P_1y, P_1z)$ ,  $P_2(P_2x, P_2y, P_2z)$ , y  $P_3(P_3x, P_3y, P_3z)$  con el procedimiento de la Figura 2.13. A partir de los tres puntos se calcula el parámetro  $\alpha$ , el cual determina si los puntos (en un plano XZ) son colineales [55]:

$$\alpha = \det \begin{pmatrix} P_1x & P_1z & 1 \\ P_2x & P_2z & 1 \\ P_3x & P_3z & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

si  $\alpha = 0$  entonces los tres puntos son colineales y son parte de una recta, por lo que los siguientes puntos se pueden predecir por medio de una extrapolación lineal, Figura 2.14, de la forma:

$$z = \frac{x - P_1x}{P_2x - P_1x} (P_2z - P_1z) + P_1z \quad (2.2)$$

y el punto extrapolado tiene coordenadas  $P_n(x, P_1y, z)$ .

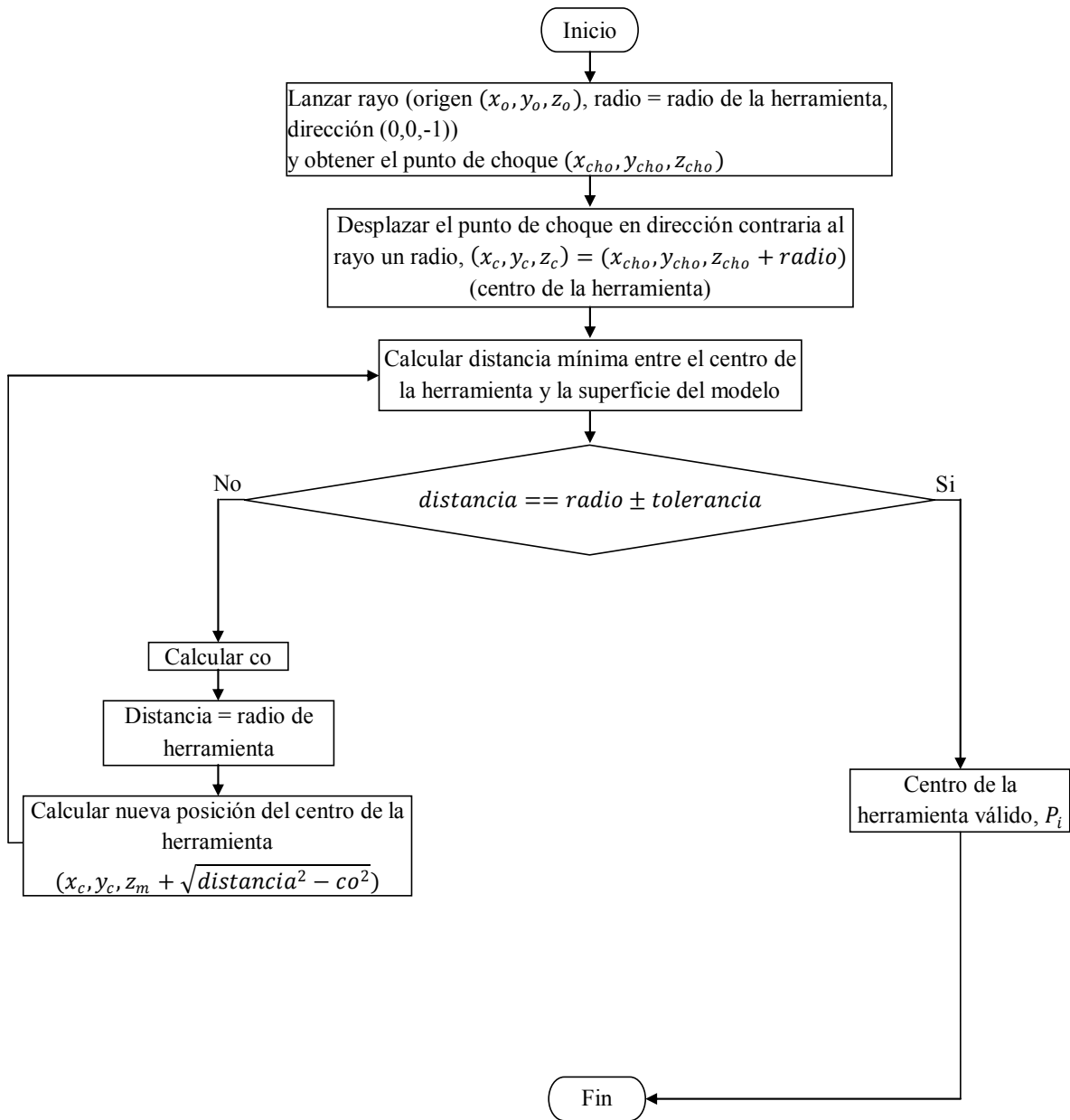


Figura 2.13. Diagrama de flujo del método para posicionamiento de la herramienta.

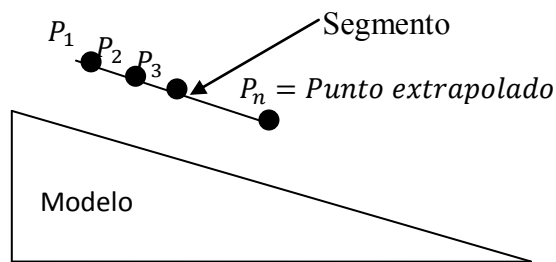


Figura 2.14. Extrapolación lineal.

Por otro lado, si  $\alpha \neq 0$  entonces los tres puntos no son colineales y pueden ser parte de un arco circular en el plano  $XZ$ . Para utilizar una extrapolación circular se calculan los parámetros  $\beta, \gamma, y \delta$  como [55]:

$$\beta = \det \begin{pmatrix} P_1^2x + P_1^2z & P_1z & 1 \\ P_2^2x + P_2^2z & P_2z & 1 \\ P_3^2x + P_3^2z & P_3z & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$\gamma = \det \begin{pmatrix} P_1^2x + P_1^2z & P_1x & 1 \\ P_2^2x + P_2^2z & P_2x & 1 \\ P_3^2x + P_3^2z & P_3x & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$\delta = \det \begin{pmatrix} P_1^2x + P_1^2z & P_1x & P_1z \\ P_2^2x + P_2^2z & P_2x & P_2z \\ P_3^2x + P_3^2z & P_3x & P_3z \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Las coordenadas del centro y el radio del círculo que pasa por los tres puntos se calculan de acuerdo a,

$$x_{cen} = \frac{\beta}{2\alpha} \quad (2.6)$$

$$z_{cen} = -\frac{\gamma}{2\alpha} \quad (2.7)$$

$$r = \sqrt{x_{cen}^2 + z_{cen}^2 + \frac{\delta}{\alpha}} \quad (2.8)$$

Utilizando las ecuaciones paramétricas de la circunferencia se puede predecir el siguiente punto  $P_n(x, Py, z)$  como (ver Figura 2.15),

$$\theta = \theta \pm \text{paso}_{ang} \quad (2.9)$$

$$x = x_{cen} + r * \cos(\theta) \quad (2.10)$$

$$z = z_{cen} + r * \text{sen}(\theta) \quad (2.11)$$

donde

$\theta$  = ángulo entre el punto  $P_3$  y la horizontal (eje  $X$ )

$\text{paso}_{ang}$  = paso o avance angular entre puntos o posiciones de la herramienta

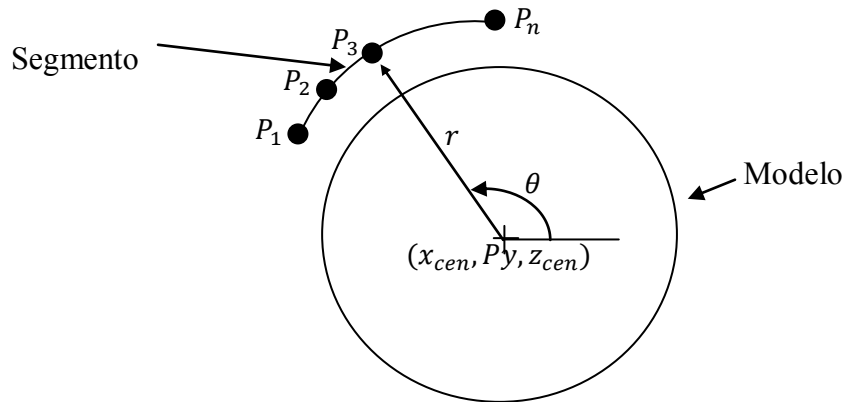


Figura 2.15. Extrapolación circular.

Una vez que se predijo el siguiente punto, ya sea lineal o circular, se calcula la distancia mínima desde ese punto a la superficie del modelo. Si la distancia es igual al radio de la herramienta entonces el punto es válido y se incrementa el paso angular y se repite el procedimiento para predecir el siguiente punto. Por otro lado, si la distancia es menor o mayor al radio, entonces el punto es inválido y el segmento termina teniendo como extremos los puntos  $P_1$  y  $P_{n-1}$ .

En la Figura 2.16 se muestra la imagen con las trayectorias calculadas con este método sobre un modelo, en ella se puede observar que los arcos se generaron de forma continua, es decir, se representa por un solo segmento en lugar de gran cantidad de segmentos lineales. La Figura 2.17 muestra el diagrama de flujo para la generación de segmentos lineales y circulares.

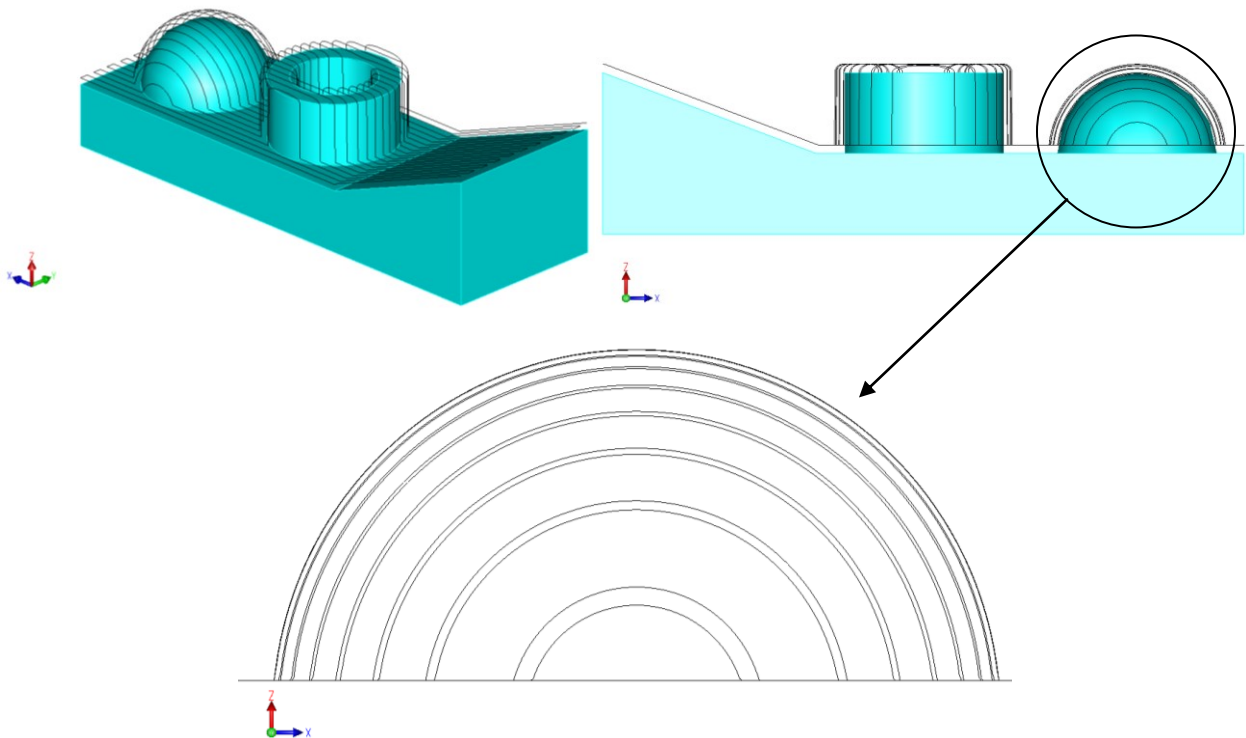


Figura 2.16. Trayectorias de herramienta con segmentos lineales y circulares.

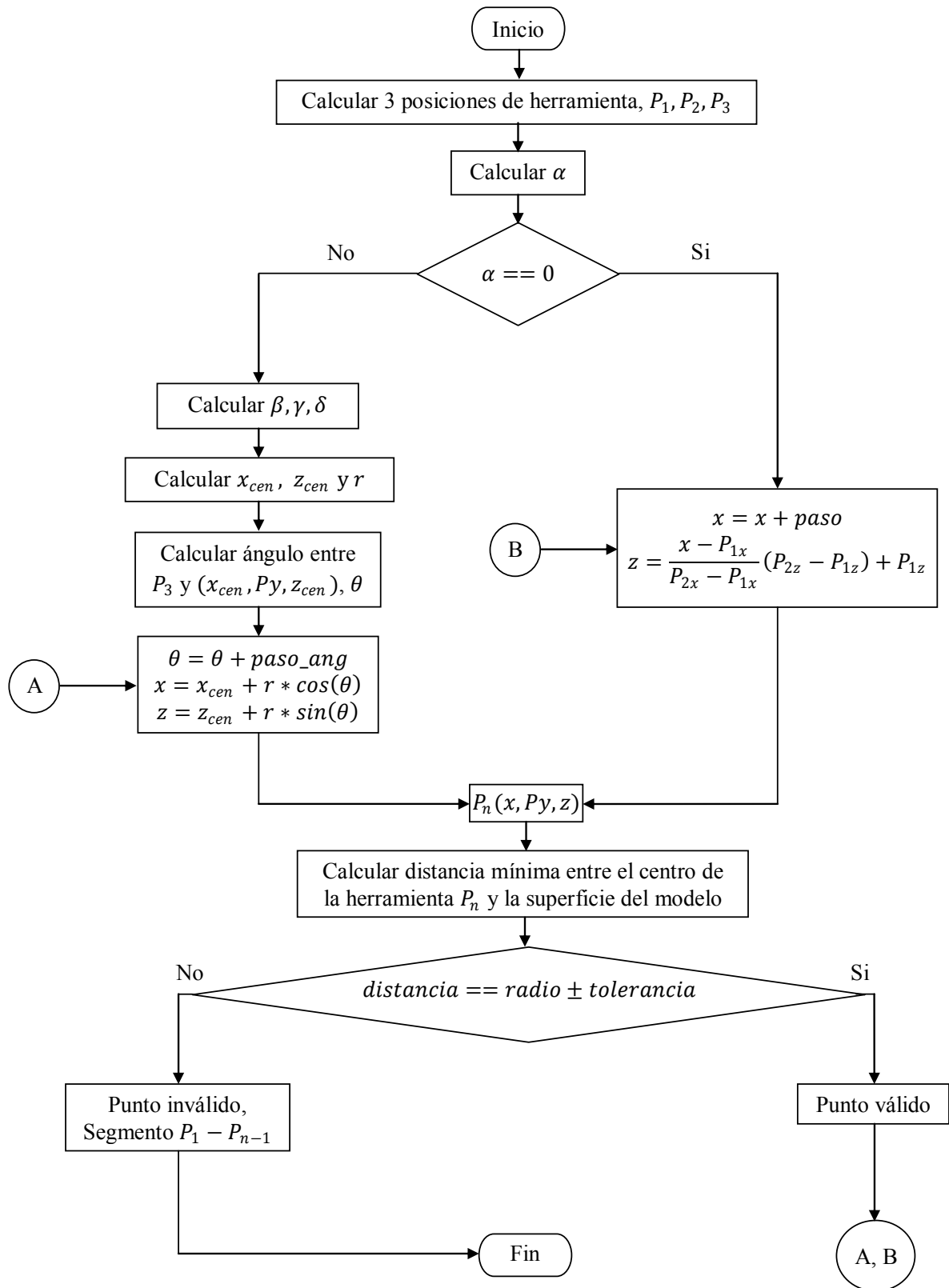


Figura 2.17. Diagrama de flujo para la generación de segmentos lineales y circulares.

Las ventajas y desventajas del método por iteración son:

### **Ventajas**

- El método funciona para cualquier modelo 3D.
- La simulación de la herramienta permite posicionar la herramienta libre de interferencias.
- Las posiciones que se obtienen son únicamente las que puede ver un sistema de tres ejes, evitando problemas de colisiones entre la herramienta y el modelo.
- El método de extrapolación utilizado permite disminuir el número de puntos, tiempo de cálculo, y generar superficies de mejor acabado superficial y calidad dimensional.

### **Desventajas**

- Debido a la formulación del método solo se puede utilizar para trayectorias con herramienta de punta de bola.
- Cuando el rayo toma el diámetro de la herramienta y se calcula el punto de choque entre éste y el modelo, el rayo tiene un error de 0.1 mm en las colisiones con el cilindro y solo se presenta este comportamiento cuando la superficies que penetra no es plana, es decir, una curva. Esto limita el funcionamiento del método ya que en el maquinado regularmente se buscan errores máximos de hasta 0.001mm lo cual no se garantiza con este método.
- Si se desea alta precisión, el número de puntos a generar sobre la superficie es grande y el tiempo de cálculo se eleva considerablemente. Lo anterior debido a que el método está basado en operaciones booleanas, además de ser un método iterativo.
- El análisis de colisiones se vuelve algo complicado porque la única información que se tiene es el modelo original, y para la detección de colisiones se tendría que recurrir a operaciones booleanas que son muy costosas en tiempo de cómputo.

### **2.4.3 Discretización de la superficie**

El tercer método propuesto utiliza la discretización de la superficie por medio de puntos, sobre los cuales se calculan las posiciones de la herramienta. También se considera la generación de trayectorias para tres tipos de herramientas: plana, punta de bola, y filete. La discretización de la superficie comprende la aproximación de la superficie del modelo mediante puntos, satisfaciendo los requerimientos de precisión establecidos. Para ello existen dos métodos. El primero es el utilizado en la sección 2.4.1 para generar las posiciones de la herramienta sobre la superficie desplazada, con la diferencia de que ahora las posiciones se calculan directamente sobre la superficie original del modelo. Al estar basado en operaciones booleanas, el tiempo de cálculo es muy elevado sobre todo cuando la precisión de discretización es alta. El tiempo de cálculo es la principal desventaja que permite descartar el método.

El segundo método para la discretización de la superficie está basado en la discretización por lados, el cual consiste en obtener perfiles de intersección en planos específicos para después descomponerlos en los lados o aristas que lo forman. Aquellos lados o secciones de lados que no son visibles desde una vista superior son eliminados. Los lados restantes se discretizan para obtener una serie de puntos que representan la superficie en dicho plano. Finalmente, a partir de los puntos obtenidos de la discretización se calculan las posiciones de la herramienta y se realiza el análisis de interferencias y colisiones. El método completo consiste de los siguientes pasos:

1. Perfiles de intersección
2. Análisis de visibilidad
3. Posicionamiento de la herramienta
4. Análisis de la tolerancia en la dirección de maquinado
5. Análisis de colisiones

### 2.4.3.1 Perfiles de intersección

Los perfiles de intersección son resultado de la intersección del modelo y los planos de corte. Para definir la posición y orientación del plano de corte se selecciona un punto por el que pase el plano y el vector normal a dicho plano. En el presente trabajo, todos los planos de corte que se utilizarán serán paralelos y verticales. En la Figura 2.18 se muestra una representación del corte de un modelo 3D mediante un plano que pasa por el punto central de la pieza en la dirección  $X$  y normal  $(1,0,0)$  de acuerdo al sistema de coordenadas mostrado, (regla de la mano izquierda).

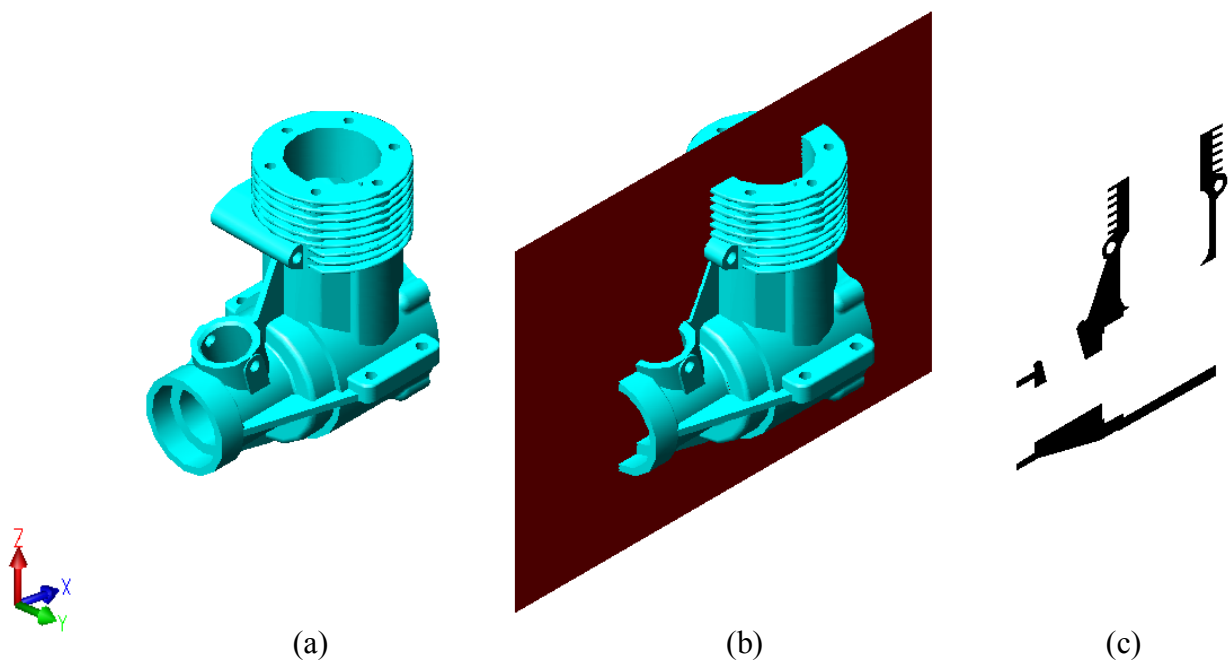


Figura 2.18. Generación de perfiles: a) modelo, b) plano de corte, y c) áreas de intersección.

El contorno del área o áreas de intersección representa el perfil, que a su vez está formado por lados, Figura 2.19a. Generalmente un perfil consiste de varios lados, sin embargo, existen casos especiales como el de la Figura 2.19b donde el perfil consta de un solo lado.



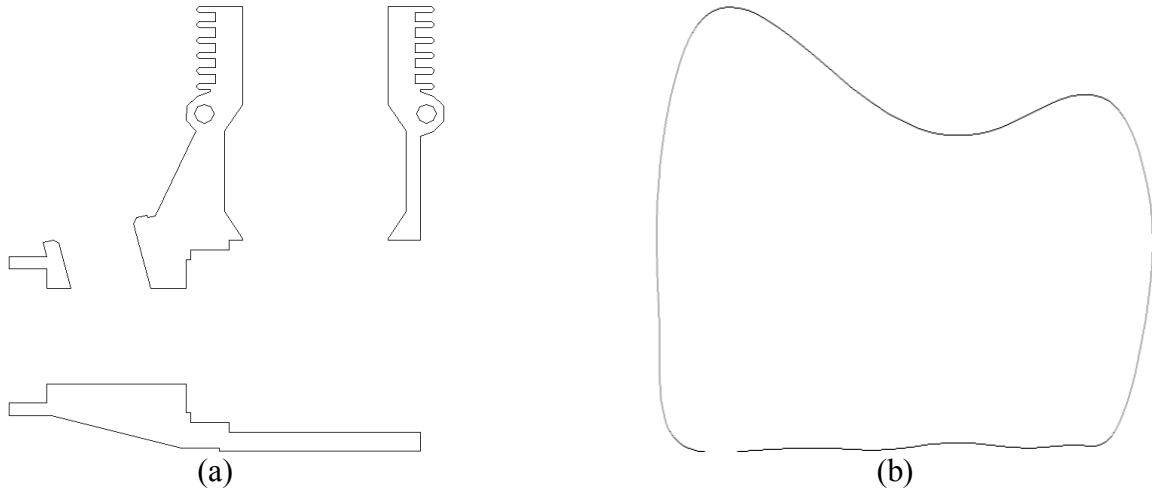


Figura 2.19. Clasificación de los perfiles: a) perfil con múltiples lados, y b) perfil con un solo lado.

Si se analiza el perfil de la Figura 2.19a, se puede observar que no todos los lados del perfil son visibles desde la vista superior, algo similar sucede con el perfil de la Figura 2.19b. En este caso existen secciones del perfil que no tienen visibilidad y para evitar el procesamiento de estos lados o secciones a continuación se presenta un método para su eliminación.

#### 2.4.3.2 Análisis de visibilidad

El análisis de visibilidad se refiere al proceso de eliminación de aquellos lados o secciones de lados que no son visibles desde una vista superior. El proceso se realiza en distintos niveles con el fin de reducir el tiempo de cálculo evitando así la discretización de todos los lados. Para explicar el proceso se considera el perfil de Figura 2.19a.

##### *Nivel 1: Visibilidad de lados rectos*

El sentido de los lados que forman los perfiles de intersección lo determina el vector normal al plano de corte, de acuerdo a la regla de la mano izquierda. Por lo cual, para que el sentido de los lados de los perfiles sea en el sentido horario, el vector normal de todos los planos de corte será  $(0,1,0)$  de acuerdo al sistema de coordenadas mostrado en la Figura 2.18. Para determinar la visibilidad de los lados rectos, cada lado del perfil es examinado para detectar aquellos que son rectos, después se calcula el vector normal de cada lado recto a través del producto cruz entre el vector normal al plano y el vector en dirección del lado recto  $(x,y,z)$ , ecuación (2.12). Si el vector normal al lado examinado tiene una componente en  $Z$  mayor o igual a cero, entonces el lado no tiene visibilidad y debe ser eliminado. Por ejemplo, el vector normal al lado mostrado en la Figura 2.20a tiene la componente en  $Z$  positiva por lo que es eliminado. En el caso de la Figura 2.20b se muestra el caso de un lado vertical y la componente en  $Z$  de su normal es cero, por lo tanto cuando se presenten lados verticales deben ser eliminados.

$$n = \begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ x & y & z \end{pmatrix} = z\hat{i} - x\hat{k} \quad (2.12)$$

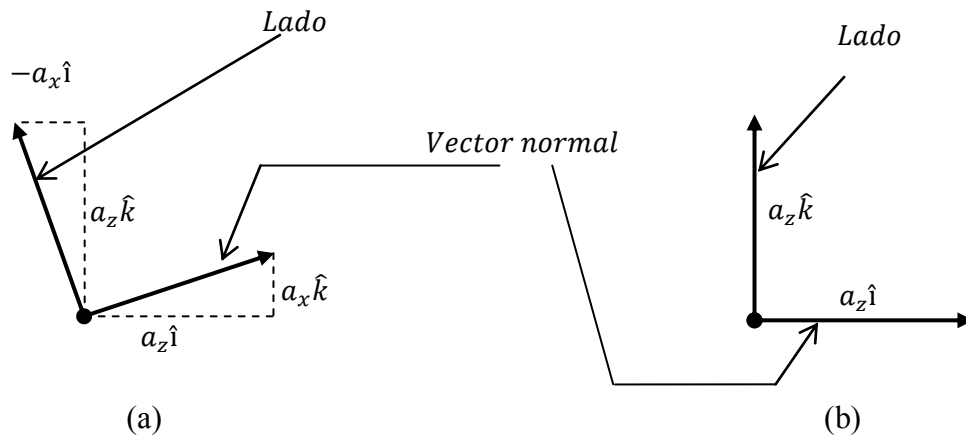


Figura 2.20. Visibilidad de lados rectos basada en su normal: a) lado inclinado, y b) lado vertical.

Después de analizar las normales de los lados rectos del perfil de la Figura 2.19a, y eliminar aquellos cuyo vector normal tenga la componente vertical menor o igual a cero, se obtiene el resultado de la Figura 2.21.

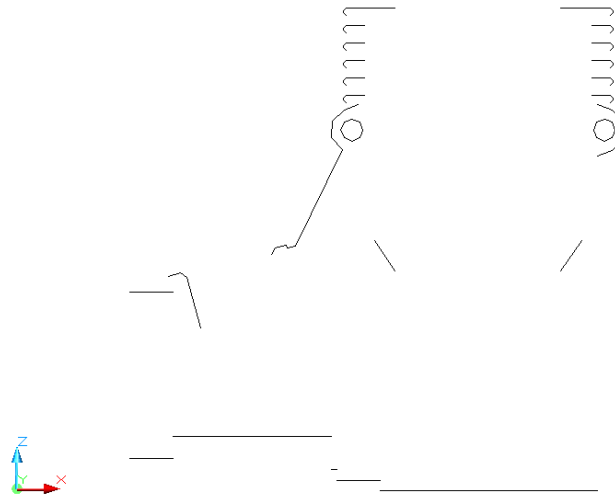


Figura 2.21. Perfil después de la eliminación de lados rectos sin visibilidad.

### Nivel 2: *Visibilidad basada en rectángulos*

Este nivel trata de eliminar todos aquellos lados que se encuentran debajo de uno o más lados, de tal manera que su visibilidad desde una vista superior es completamente nula. El análisis se realiza utilizando una aproximación rectangular del lado. Cada lado tiene asociados sus valores máximos en cada dirección a partir de los cuales se puede construir su rectángulo de aproximación. A continuación se analizan los tres casos posibles que pueden presentarse durante el análisis.

**Visibilidad nula.** Cuando el rectángulo que contiene al lado que se está analizando no es visible desde una vista superior debido a que otros rectángulos (lados) no se lo permiten, es decir, lo obstruyen, se dice que su visibilidad es nula desde una vista superior. En la Figura 2.22a se

muestran cuatro lados, A, B, C y D, que forman el perfil de una pieza. Si se analiza cada uno de ellos para determinar si tiene o no visibilidad, se obtiene el siguiente resultado.

- A- Su rectángulo solo tiene componente en  $X$ , y no existe ningún otro rectángulo que este sobre él. La visibilidad del lado es total.
- B- Aunque el rectángulo de A tiene una altura mayor, está fuera del rango del rectángulo de B en el eje  $X$  por lo que no afecta la visibilidad de B, su visibilidad es total.
- C- A y B tienen alturas mayores que C, sin embargo, están fuera del rango en la dirección  $X$ . Por lo tanto su visibilidad es total.
- D- Observando la Figura 2.22a, A, B, y C tiene alturas superiores a D y se encuentra dentro del rango en  $X$ . C obstruye la sección izquierda de D, A obstruye la parte central de D y B obstruye la parte derecha de D, por lo que su visibilidad queda totalmente obstruida siendo esta nula y el lado debe ser eliminado, Figura 2.22b.

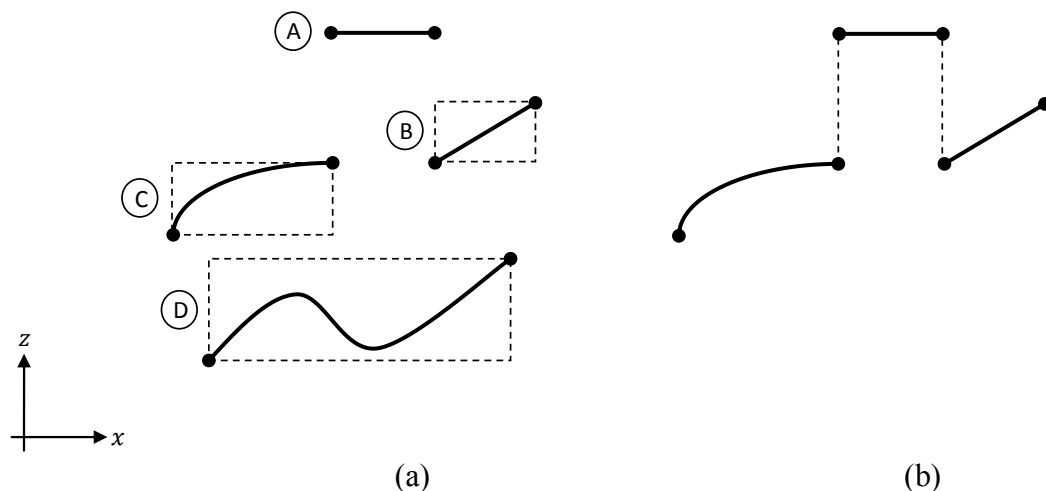


Figura 2.22. Visibilidad nula: a) lados del perfil, y b) resultados del análisis de visibilidad.

**Visibilidad parcial.** Cuando solo alguna sección de un lado es visible desde la vista superior, se dice que su visibilidad es parcial. La Figura 2.23 muestra un caso similar al de la Figura 2.22, con la diferencia de que ahora el lado A no aparece, esto con el fin de explicar claramente la visibilidad parcial. El resultado del análisis de la Figura 2.22 indica que los lados B y C son totalmente visibles y se sigue manteniendo esta condición. Por lo que solo se analizará D.

- D- La sección izquierda del rectángulo de D se encuentra obstruida por C, y la sección derecha esta obstruida por B, sin embargo, la parte central se encuentra sin obstrucciones, es decir, es visible desde la vista superior o bien tiene visibilidad parcial. El resultado se muestra en la Figura 2.23b.

La visibilidad parcial no se analiza en este nivel, ya que es necesario cortar la curva y eliminar las secciones que no son visibles lo cual requiere un análisis más detallado. Por lo tanto el lado D del perfil mostrado pasa al siguiente nivel de manera completa.

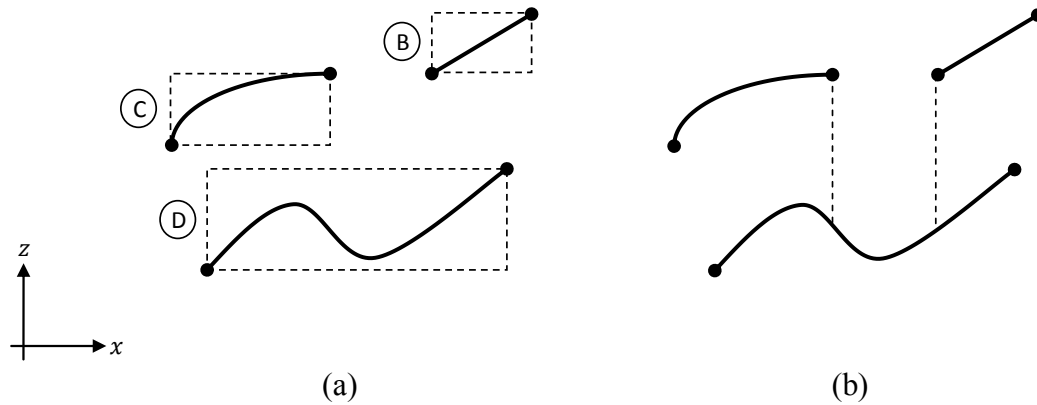


Figura 2.23. Visibilidad parcial: a) lados del perfil, y b) resultados del análisis de visibilidad.

**Visibilidad indefinida.** En los dos casos presentados se identifica fácilmente cuando un lado tiene visibilidad nula o parcial, sin embargo estos análisis se hacen basados en el rectángulo que contiene al lado y no se analiza su forma. En este caso se tiene la particularidad de que algunos de los rectángulos se interceptan, lo cual evita determinar si la visibilidad es nula, parcial, o total, al no contar con mayor información que la posición y dimensiones del rectángulo. Cuando se presenta esta condición se dice que la visibilidad del lado es indefinida. La Figura 2.24 muestra un ejemplo donde el rectángulo C se intercepta con el de D, ocasionando que ambos lados pasen al siguiente nivel sabiendo previamente que D no tiene visibilidad.

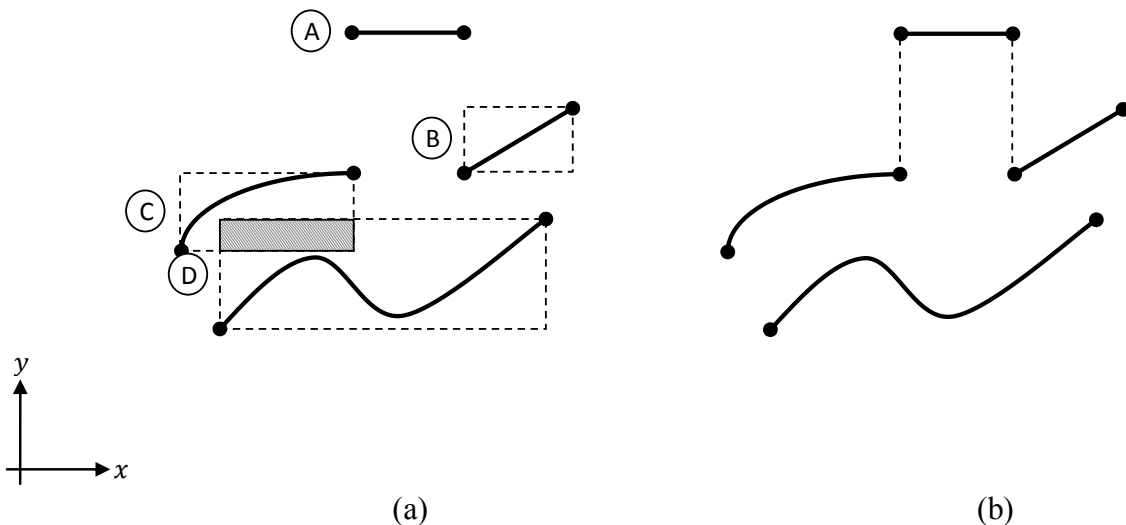


Figura 2.24. Visibilidad indefinida: a) lados del perfil, y b) resultados del análisis de visibilidad.

El procedimiento generalizado para el análisis de visibilidad basado en rectángulos se puede desarrollar a partir de los rectángulos de la Figura 2.25. El proceso inicia con el rectángulo  $i$  a analizar y un rectángulo  $j$  a probar en el sistema de coordenadas mostrado. Primero se realiza un análisis de intersección entre  $i$  y  $j$  basado en las coordenadas de sus vértices opuestos diagonalmente. La intersección entre ambos rectángulos, existe sí:

$$\begin{array}{lll}
 x_{1i} \text{ es menor que } x_{2j} & \text{y} & x_{1j} \text{ es menor que } x_{2i} \\
 z_{1i} \text{ es menor que } z_{2j} & \text{y} & z_{1j} \text{ es menor que } z_{2i}
 \end{array}$$

Si se cumple la condición, el lado  $i$  pasa al siguiente nivel de visibilidad, ya que presenta visibilidad indefinida. Si alguna de las cuatro condiciones no se cumple, la intersección no existe. Sin embargo, el lado  $j$  puede obstruir parcialmente la visibilidad de  $i$ , sí:

$$x_{1i} \text{ es menor que } x_{2j} \quad \text{y} \quad x_{1j} \text{ es menor que } x_{2i} \\ z_{1j} \text{ es mayor que } z_{2i}$$

Si se cumplen las tres condiciones, se guarda la sección que se encuentra obstruida, si cubre por completo el rectángulo  $i$  entonces su visibilidad es nula y se elimina. El procedimiento para  $n$  cantidad de rectángulos o lados se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.26.

Ahora si el rectángulo  $i$  inicia antes de que termine el rectángulo  $j$ , y si el rectángulo  $j$  inicia antes de que termine el rectángulo  $i$ , esto en la dirección  $X$  y  $Z$ , entonces existe intersección entre los rectángulos y el lado  $i$  pasa al siguiente nivel de visibilidad. Si alguna de las cuatro condiciones falla, entonces no existe intersección. Sin embargo, el lado  $j$  puede obstruir parcialmente la visibilidad de  $i$ , sí el rectángulo  $i$  inicia antes de que termine el rectángulo  $j$ , y si el rectángulo  $j$  inicia antes de que termine el rectángulo  $i$  en la dirección de  $X$  y si el rectángulo  $j$  inicia después de que termina el rectángulo  $i$  en la dirección de  $Z$ , si este es el caso entonces se guarda la sección que se encuentra obstruida, si se ha cubierto por completo el rectángulo  $i$ , entonces su visibilidad es nula. El procedimiento para  $n$  cantidad de rectángulos o lados se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.26.

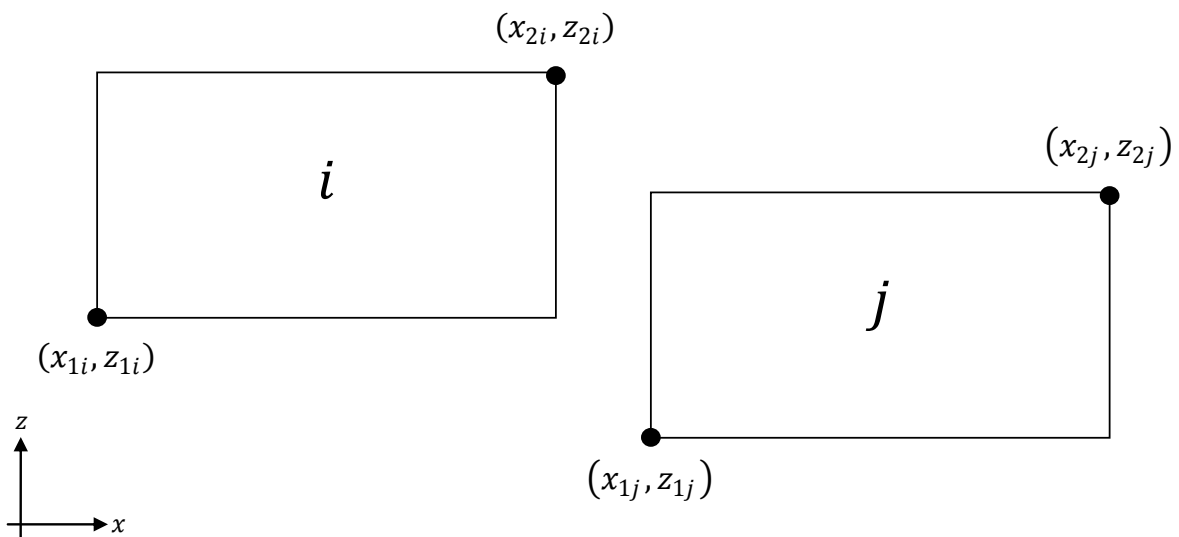


Figura 2.25. Análisis de visibilidad de rectángulos.

El análisis de visibilidad se aplicó al perfil de la Figura 2.21 y se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 2.27.

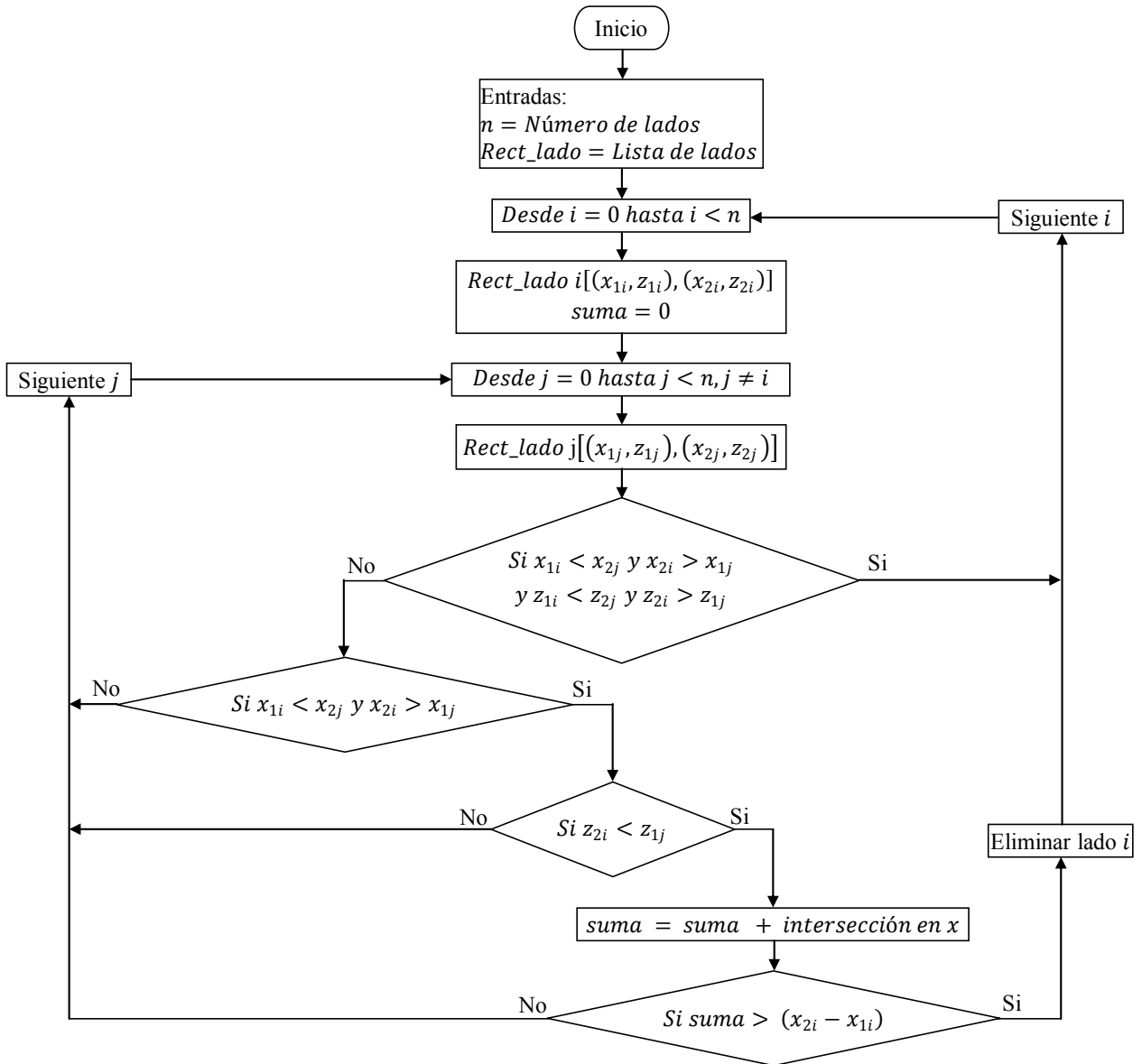


Figura 2.26. Diagrama de flujo para el análisis de visibilidad basada en rectángulos.

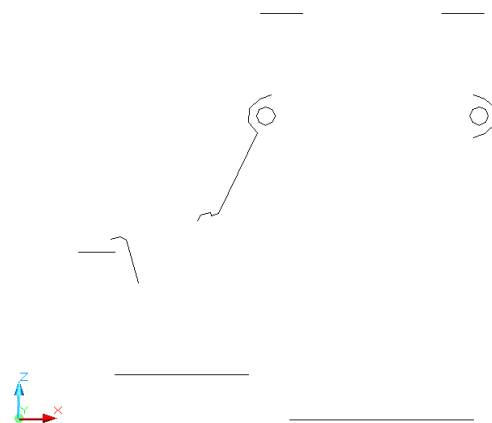


Figura 2.27. Perfil después del análisis de visibilidad por rectángulos.

**Nivel 3: Visibilidad de lados por discretización**

En este nivel ya se eliminaron los lados rectos sin visibilidad, además de aquellos lados que tienen visibilidad nula. Por tanto, solo quedan los que tienen visibilidad total, parcial o indefinida. Aquí se realiza el análisis de mayor nivel además de ser el más costoso en tiempo de cómputo. El método consiste en aproximar cada lado por medio de puntos de acuerdo a la precisión definida, y después comparar las alturas en las secciones de intersección para eliminar aquellas con la menor altura.

Antes de iniciar con la descripción del método es necesario analizar los lados que tienen secciones no visibles, como el mostrado en la Figura 2.28a. En estos casos el lado se descompone en varias secciones de acuerdo a los cambios en su dirección. Durante la generación de los puntos en la discretización, cada lado es examinado para detectar dichas secciones mediante el cambio de signo (es decir, dirección), si existe un cambio entonces se termina una sección e inicia la siguiente. El procedimiento se repite hasta discretizar completamente el lado. El lado de la figura Figura 2.28a se discretizó y se detectaron 4 cambios de dirección lo que corresponde a 5 secciones como se muestra en la Figura 2.28b. Para cada lado se calcula el rectángulo que lo contiene calculando los puntos máximos y mínimos en  $X$  y  $Z$ .

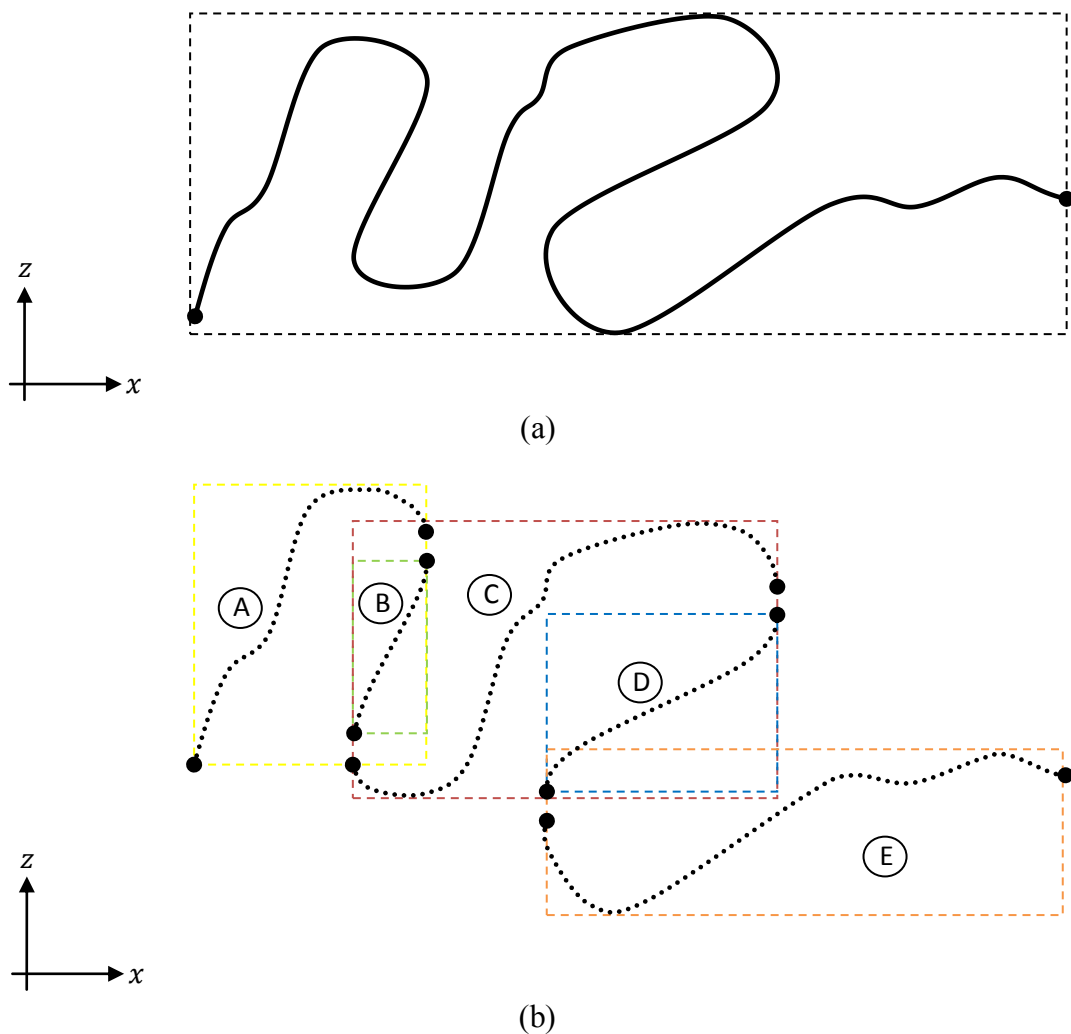


Figura 2.28. Descomposición de un lado en secciones: a) lado original, y b) lados generados.

Las secciones generadas se pueden tratar como un lado independiente, es decir, el lado de la Figura 2.28 se transformó en 5 lados distintos, A, B, C, D y E. Esta descomposición permite formular un método general para el análisis de visibilidad en este nivel. Para eliminar los lados o secciones sin visibilidad, primero se obtiene el rango de intersección en  $X$  del rectángulo del lado a analizar y los restantes, si existe, y después se comparan los puntos de ambos lados dentro del rango. Los puntos de mayor altura se quedan y los de menor altura son eliminados. En la Figura 2.29a se muestra un ejemplo del método. El lado a examinar es el A, y el siguiente lado es el B, primero se calcula si existe intersección en  $X$  de sus respectivos rectángulos, si existe se calcula el rango de intersección en  $X$ . Los puntos de A dentro del rango de la intersección se comparan uno a uno con los de B que también estén dentro del rango. De este análisis se obtiene que los puntos de mayor altura son los de A, por tanto los de B son eliminados. Ahora se comparan las intersecciones de A y C, y se aplica el mismo procedimiento, esto para todos los lados. El resultado final del análisis de visibilidad de la Figura 2.28a se muestra en la Figura 2.29c.

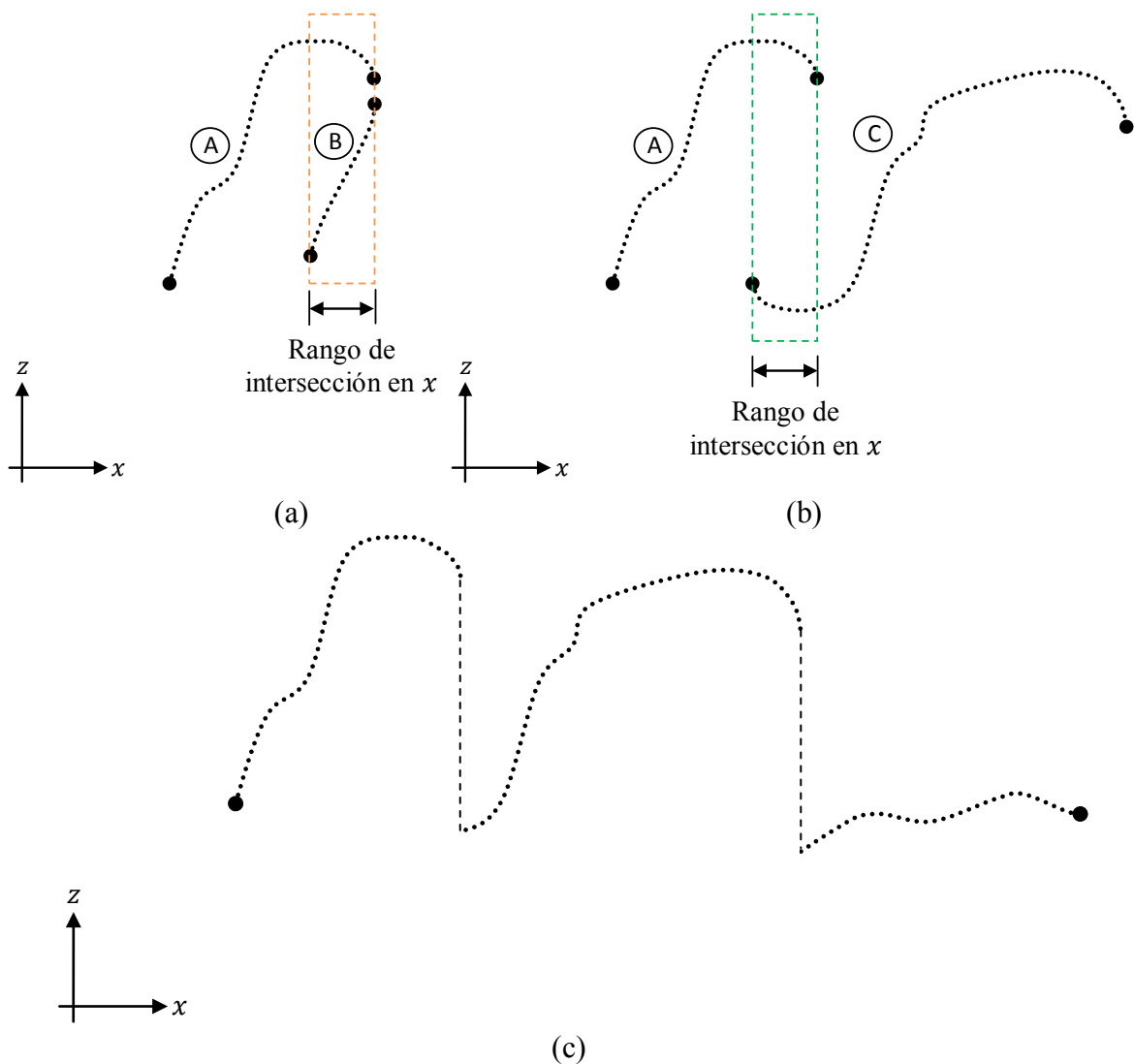


Figura 2.29. Comparación de secciones: a) lado A y B, b) resultado de AB y C, y c) perfil final.



El resultado final del análisis de visibilidad para el perfil de la Figura 2.19a se muestra en la Figura 2.30. En ella se puede observar que todos los puntos generados u obtenidos son aquellos cuya visibilidad no es nula. Como se puede observar, los puntos con visibilidad son menos de la mitad de los que contiene el perfil original. Esto resulta en una generación de trayectorias más rápida y eficiente.

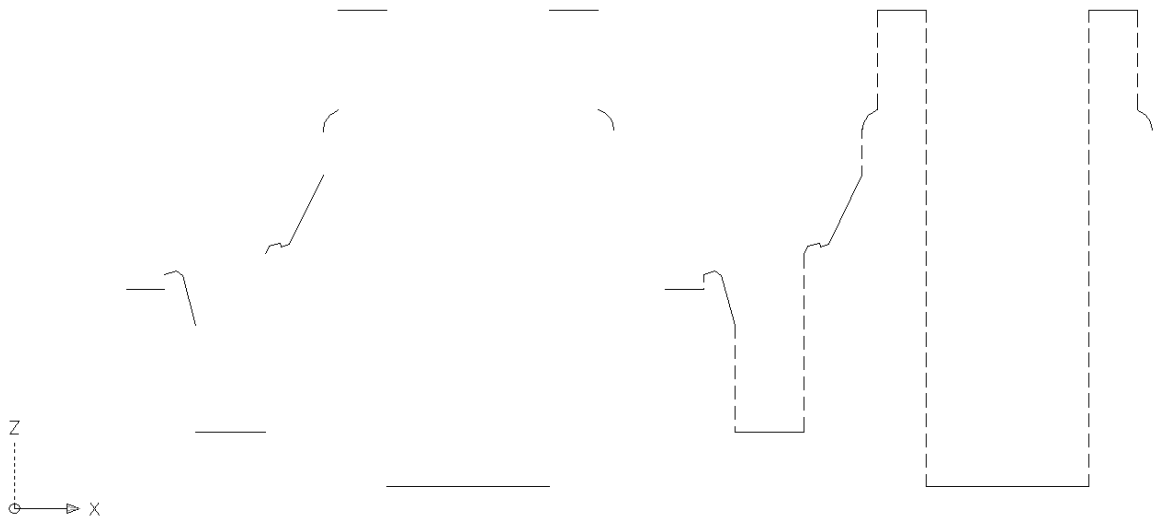
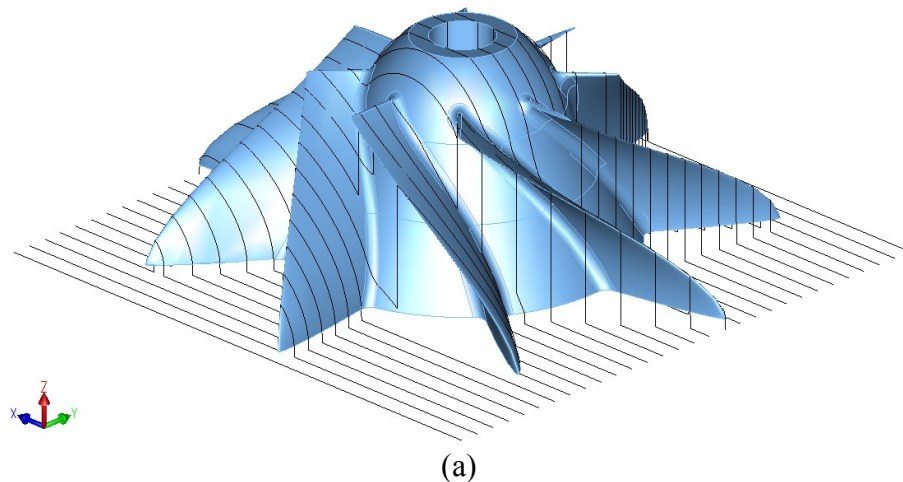
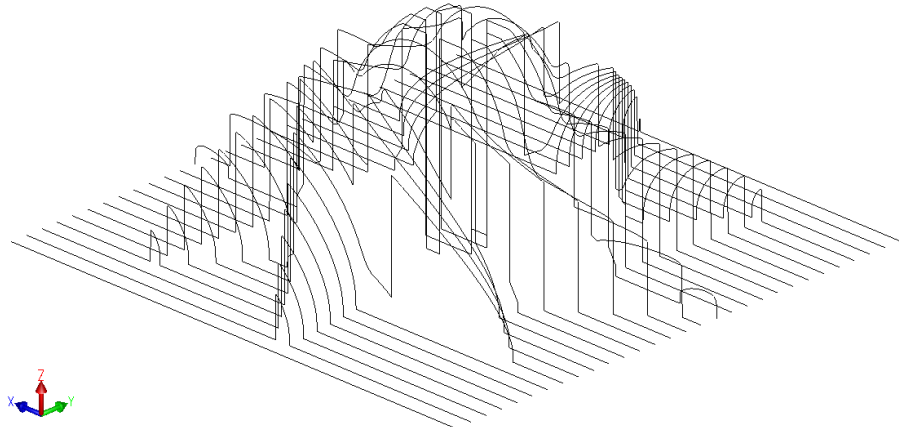


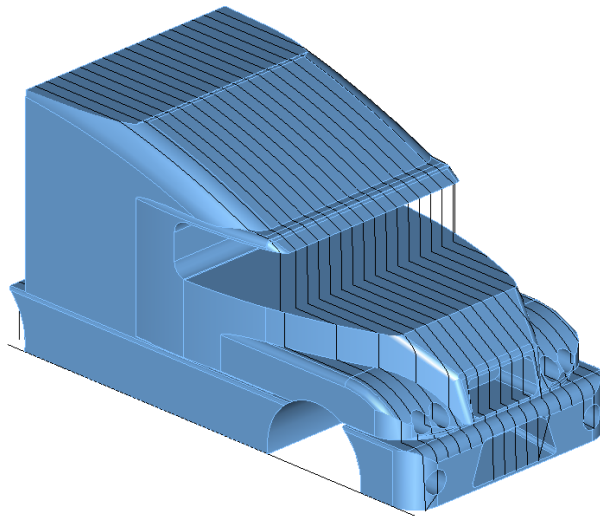
Figura 2.30. Resultado final después del análisis de visibilidad por discretización.

El procedimiento para la discretización de la superficie se aplica a perfiles o planos. Para generar la discretización de la superficie completa se calcula para los planos deseados de acuerdo a la precisión de aproximación requerida. En la Figura 2.31 se muestra la discretización de tres modelos. Los puntos en la figura se encuentran unidos por líneas para una mejor visualización. A cada modelo se le añade una base para que los puntos sean continuos.

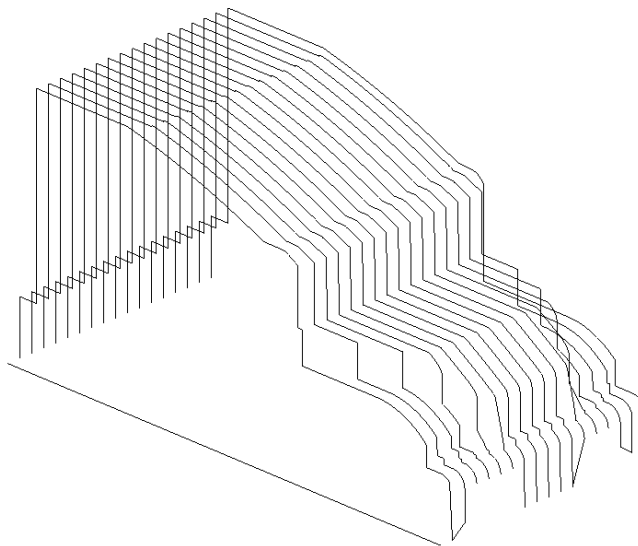




(b)



(c)



(d)

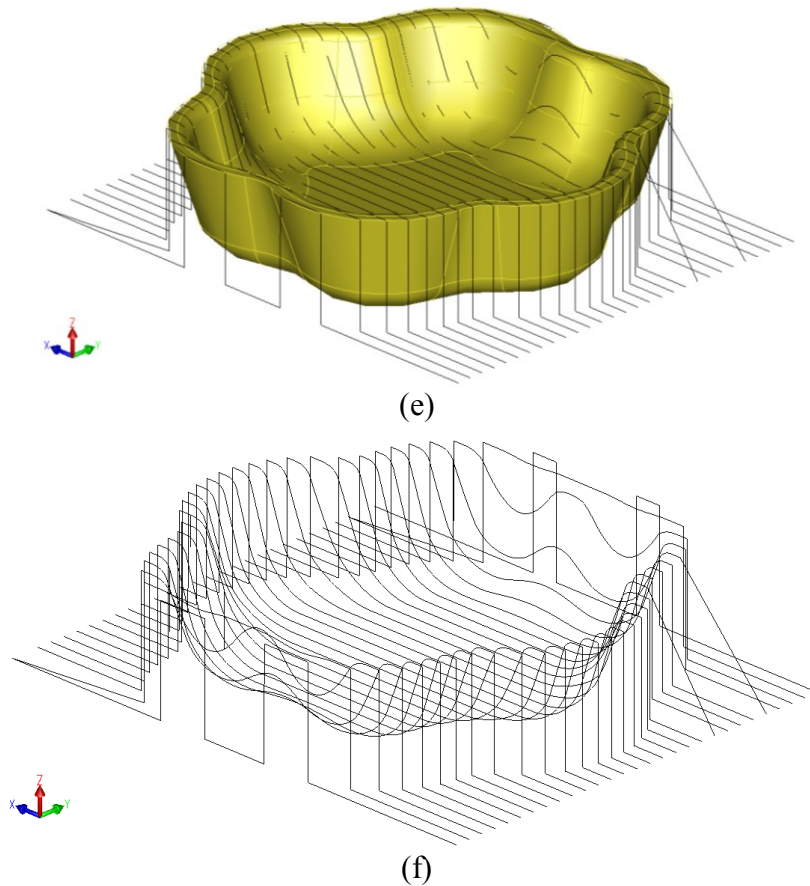


Figura 2.31. Discretización de superficies de 3 diferentes modelos: a) modelo de una turbina, b) discretización de la turbina, c) modelo de un camión, d) discretización del camión, e) modelo de un molde, y f) discretización del molde.

### 2.4.3.3 Posicionamiento de la herramienta

El posicionamiento de la herramienta se refiere a encontrar la posición de la herramienta definida en el punto de referencia respectivo a cada una de ellas, este procedimiento se realiza directamente sobre la matriz de puntos obtenida en la etapa de discretización. En este método se analiza el caso de tres tipos de herramientas de corte: plana, punta de bola y filete, Figura 2.32.

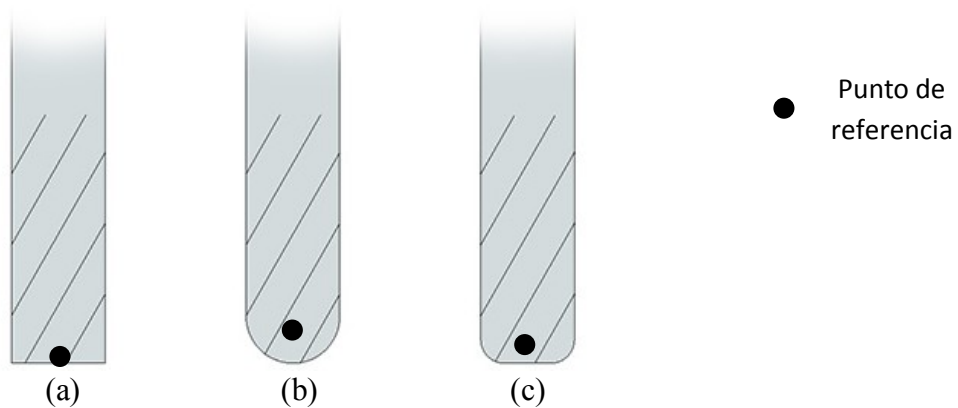


Figura 2.32. Herramientas de corte y su punto de referencia: a) plana, b) punta de bola, y c) filete.

El método para el posicionamiento de la herramienta consiste en los siguientes pasos,

- **Ubicar el eje de la herramienta en la posición deseada.** En este paso se selecciona el eje de la herramienta en la posición que se desea evaluar y obtener la posición.
- **Obtener la posición de la herramienta.** Definido el eje de la herramienta, se evalúan las alturas de todos los puntos alrededor de ese eje a una distancia igual o menor al radio de la herramienta; en otras palabras todos los puntos que estén dentro del área proyectada de la herramienta, Figura 2.33. La forma en que las alturas son evaluadas dependerá del tipo de herramienta a utilizar.

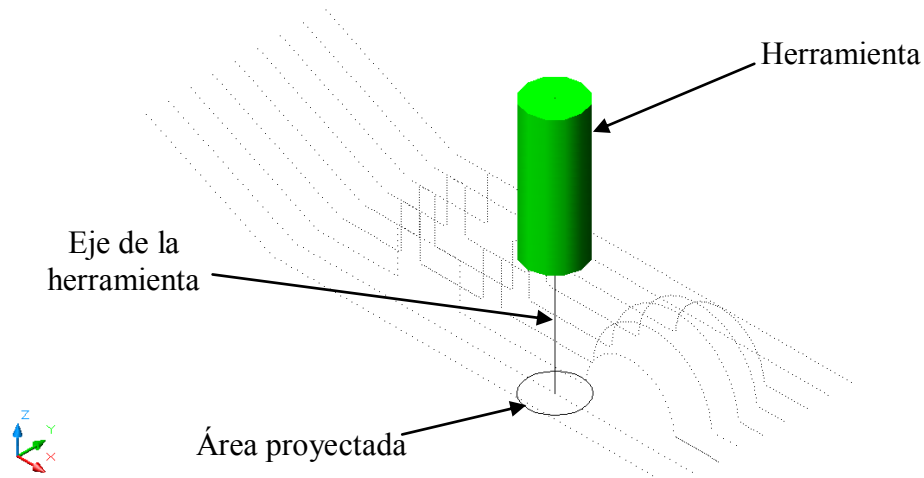


Figura 2.33. Área proyectada de la herramienta.

**a) Posicionamiento de una herramienta de corte plana**

Se evalúa la altura de todos los puntos contenidos dentro del área proyectada de la herramienta, y se selecciona el punto con la máxima altura. Este punto representa la altura del punto de referencia en la herramienta de corte plana, es decir, la posición de la herramienta libre de interferencias.

**b) Posicionamiento de una herramienta de filete**

La herramienta de filete se puede descomponer en dos secciones, una plana circular y otra de un cuarto de círculo, Figura 2.34. Para el posicionamiento de este tipo de herramienta se analizan los puntos en cada sección contenidos en el área proyectada. Si los puntos se encuentran a una distancia menor a  $(RS - r)$  del eje, se calcula el punto más bajo de la herramienta como,

$$h = z_{max} - \text{radio\_filete} \tag{2.13}$$

donde  $z_{max}$  es la altura de la herramienta en el punto de referencia. En esta sección la herramienta es plana, si la altura del punto de prueba ( $z$ ) es mayor que  $h$ , entonces  $z_{max}$  se recalcula como,

$$z_{max} = z + \text{radio\_filete} \tag{2.14}$$

Si la altura del punto de prueba ( $z$ ) es menor que  $h$  entonces  $z_{max} = z_{max}$ .

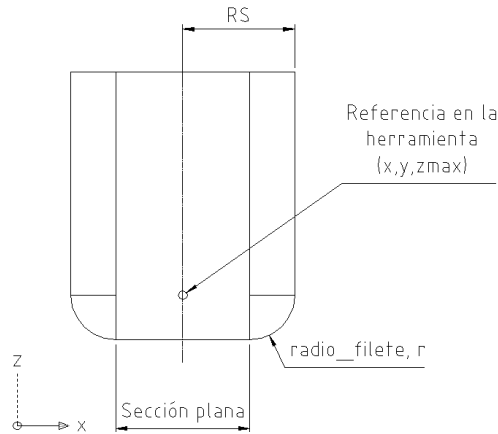


Figura 2.34. Esquema de una herramienta de filete.

Para el análisis del filete de la herramienta se analizan todos los puntos que estén a una distancia menor al radio de la herramienta y mayor que  $(RS - r)$ . Después se calcula la altura que tiene la herramienta correspondiente a la distancia del punto de prueba con respecto al eje de la herramienta en el plano  $XY$ ,

$$h = z_{max} - \sqrt{\text{radio\_filete}^2 - (\text{distancia} - RS + \text{radio\_filete})^2} \quad (2.15)$$

Sí la altura del punto de prueba ( $z$ ) es mayor que  $h$ , entonces se recalcula  $z_{max}$  utilizando la siguiente ecuación,

$$z_{max} = z + \sqrt{\text{radio\_filete}^2 - (\text{distancia} - RS + \text{radio\_filete})^2} \quad (2.16)$$

Sí  $z$  es menor o igual a  $h$ , entonces  $z_{max} = z_{max}$ .

### c) Posicionamiento de una herramienta de punta de bola

Para una herramienta de punta de bola se analizan todos los puntos que estén a una distancia menor al radio de la herramienta, es decir, dentro del área proyectada de la misma, después se calcula la distancia del punto a probar al eje de la herramienta en el plano  $X$ , de acuerdo a esta distancia se calcula la altura ( $h$ ) que tiene la herramienta en ese punto, recordando que la altura varía de acuerdo a la ecuación de la circunferencia con centro en  $(x, y, z_{max})$ ,

$$h = z_{max} - \sqrt{\text{radio\_filete}^2 - (\text{distancia} - RS + \text{radio\_filete})^2} \quad (2.17)$$

Sí la altura del punto de prueba ( $z$ ) es mayor que  $h$ , entonces se recalcula  $z_{max}$  como,

$$z_{max} = z + \sqrt{\text{radio\_filete}^2 - (\text{distancia} - RS + \text{radio\_filete})^2} \quad (2.18)$$

Sí  $z$  es menor o igual a  $h$ , entonces  $z_{max} = z_{max}$ . El posicionamiento de este tipo de herramienta se realiza como una herramienta de filete con el radio del filete igual al radio del cuerpo de la herramienta.

El procedimiento general para el posicionamiento de herramienta se muestra en la Figura 2.35.

### 2.4.3.4 Análisis de la tolerancia en la dirección de maquinado

Un parámetro fundamental en la generación de trayectorias de la herramienta es la tolerancia en la dirección del maquinado. La tolerancia se refiere a la máxima cantidad de material que puede ser removido debido a las aproximaciones de la superficie de diseño. Para realizar este análisis y corrección del error, primero se calculan tres posiciones de la herramienta con un paso constante, Figura 2.36, a partir de la primera ( $p1$ ) y la tercera posición ( $p2$ ) se obtiene un segmento de recta que representa el centro de la herramienta cuando se mueve entre esas dos posiciones, el segundo punto ( $pm$ ) representa un punto en medio del segmento de recta. A partir del centro de la herramienta de este punto central se calcula la distancia ( $d$ ) perpendicular a la recta. Si la distancia ( $d$ ) del punto a la recta es menor al error, significa que los extremos son válidos ya que la interferencia con la pieza de trabajo es menor a la tolerancia definida. Sin embargo, si la distancia es mayor, entonces la interferencia es mayor a la tolerancia por lo que es necesario calcular posiciones adicionales para evitar ese problema. El proceso es repetitivo porque ahora se calcula un nuevo punto entre  $p1$  y  $pm$  y se genera un segmento de recta entre ellos. A partir del nuevo punto se calcula la distancia perpendicular a dicho segmento, si es menor que la tolerancia entonces el segmento es válido. Se hace lo mismo con el segmento que forman  $pm$  y  $p3$ , hasta que la distancia del punto al segmento este dentro de la tolerancia establecida.

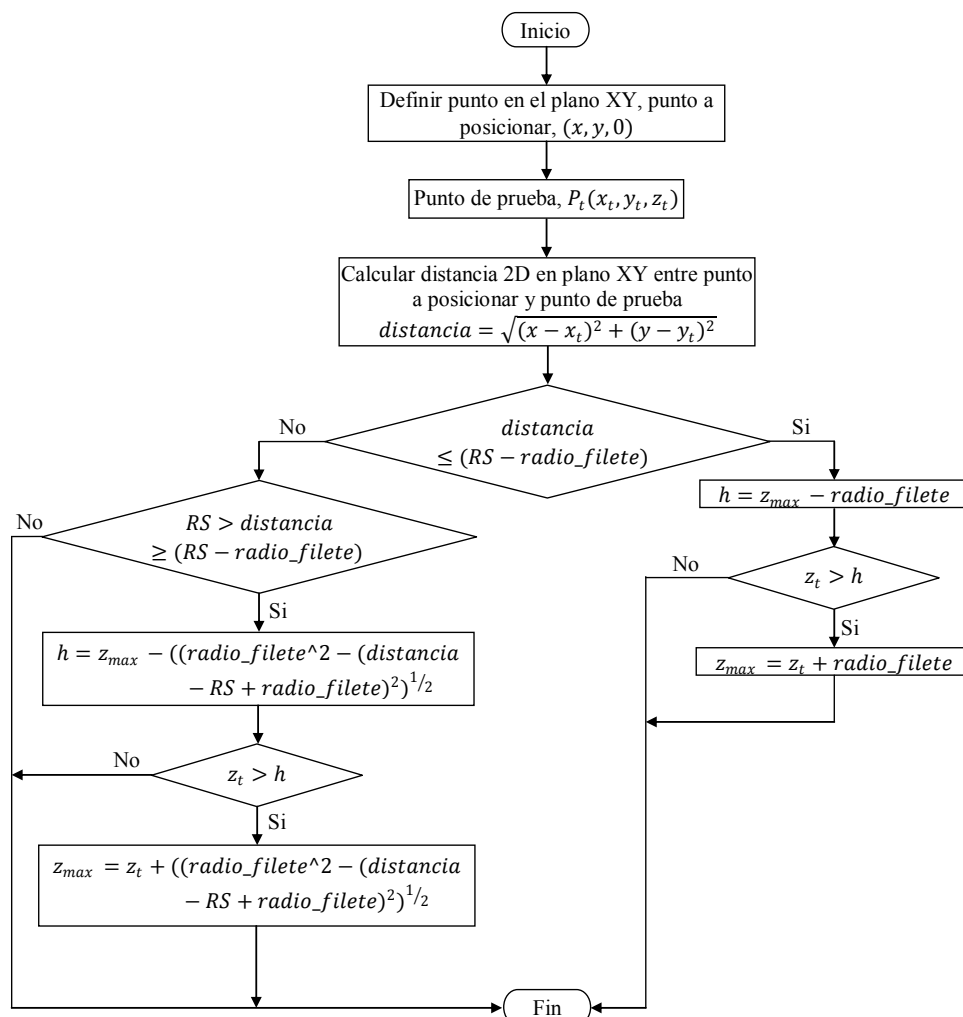


Figura 2.35. Procedimiento general para posicionamiento de herramientas.

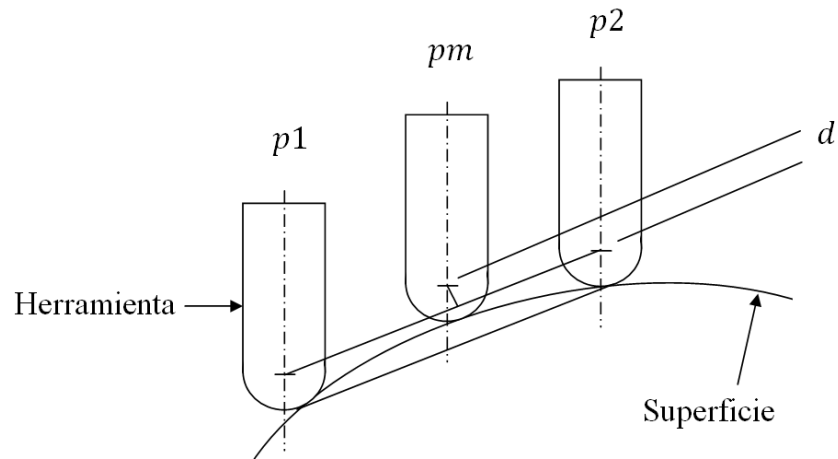


Figura 2.36. Análisis del error en la dirección de maquinado.

#### 2.4.3.5 Análisis de colisiones

Para analizar que las posiciones de la herramienta estén libres de colisiones es necesario modelar la herramienta así como el sistema de sujeción o portaherramientas [38][40]. Debido a que existen diferentes tipos y tamaños de portaherramientas y que las herramientas tienen diferentes longitudes, lo más adecuado es hacer una representación del sistema en forma paramétrica. El modelo se muestra en la Figura 2.37, y los parámetros de entrada del perfil son  $\gamma$  ( $\gamma$ ),  $DH$ ,  $DHi$ ,  $DS$ ,  $LT$  y  $LH$ .

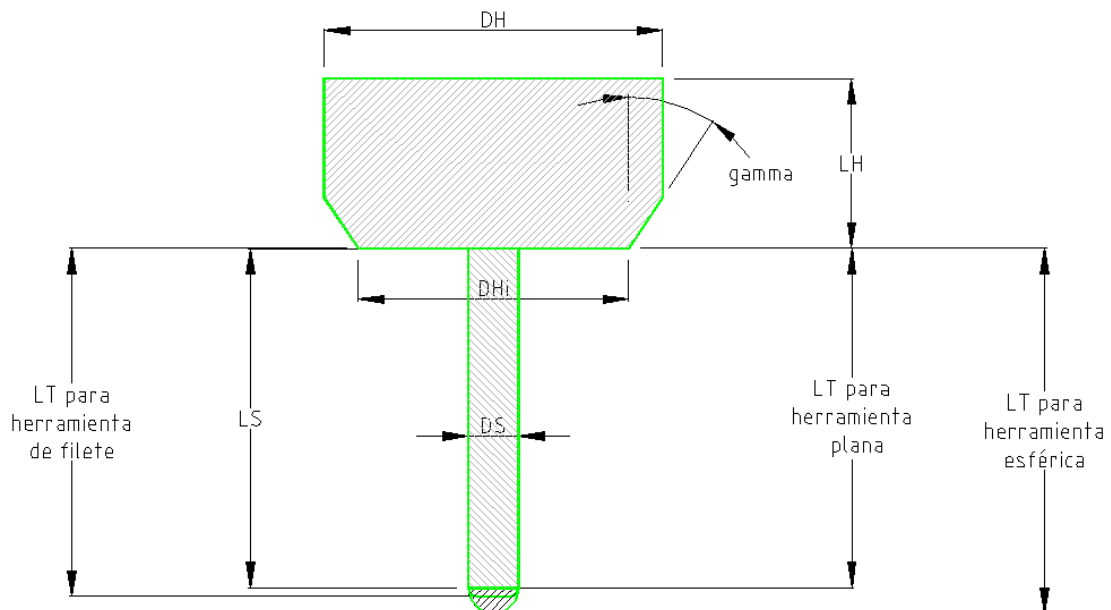


Figura 2.37. Modelo geométrico del sistema de sujeción y herramienta.

Para la detección de colisiones, simplemente se evalúa la distancia alrededor del punto de posicionamiento de acuerdo con las siguientes restricciones:

- Si la distancia del punto de prueba y el punto posicionado en el plano  $XY$  es mayor a  $DS/2$  y menor o igual a  $DHi/2$  entonces se evalúa la altura del sistema de sujeción a esa distancia como,

$$h = z_{max} + LS \quad (2.19)$$

y se compara con la altura del punto de prueba ( $z_t$ ), si  $z_t > h$ , entonces significa que hay colisión y,

$$z_{max} = z_t - LS \quad (2.20)$$

Por el contrario si  $z_t < h$  entonces no hay colisión.

- Sí la distancia del punto de prueba y el punto de posicionado en el plano  $XY$  es mayor a  $DHi/2$  y menor o igual a  $DH/2$ , entonces se evalúa la altura del sistema de sujeción a esa distancia como,

$$h = z_{max} + LS + \frac{\text{distancia} - \frac{DHi}{2}}{\tan(\gamma)} \quad (2.21)$$

y se compara con la altura del punto de prueba ( $z_t$ ), si  $z_t > h$  entonces significa que hay colisión y,

$$z_{max} = z_t - LS - \frac{\text{distancia} - \frac{DHi}{2}}{\tan(\gamma)} \quad (2.22)$$

Por el contrario si  $z_t < h$  entonces no hay colisión.

De esta manera se realiza el análisis de colisiones corrigiendo la posición mediante el recálculo de la altura del punto de referencia  $z_{max}$  para cada posición de la herramienta. El diagrama de flujo para este análisis se presenta en la Figura 2.38. Cabe mencionar que este análisis se realiza solamente para posiciones de la herramienta en las cuales el portaherramientas tiene una altura menor al bounding box del modelo. En caso contrario este análisis no se realiza, ya que de antemano se sabe que está fuera del modelo.

La Figura 2.39 muestra las trayectorias generadas sobre un modelo que tiene una altura 2.5 veces mayor que la longitud de la herramienta. Existen zonas en donde la herramienta no puede llegar debido a que el portaherramientas colisionaría con la pieza de trabajo. Las posiciones que no son accesibles para el portaherramientas se recalculan hasta donde se evite la colisión, obteniendo el resultado mostrado.



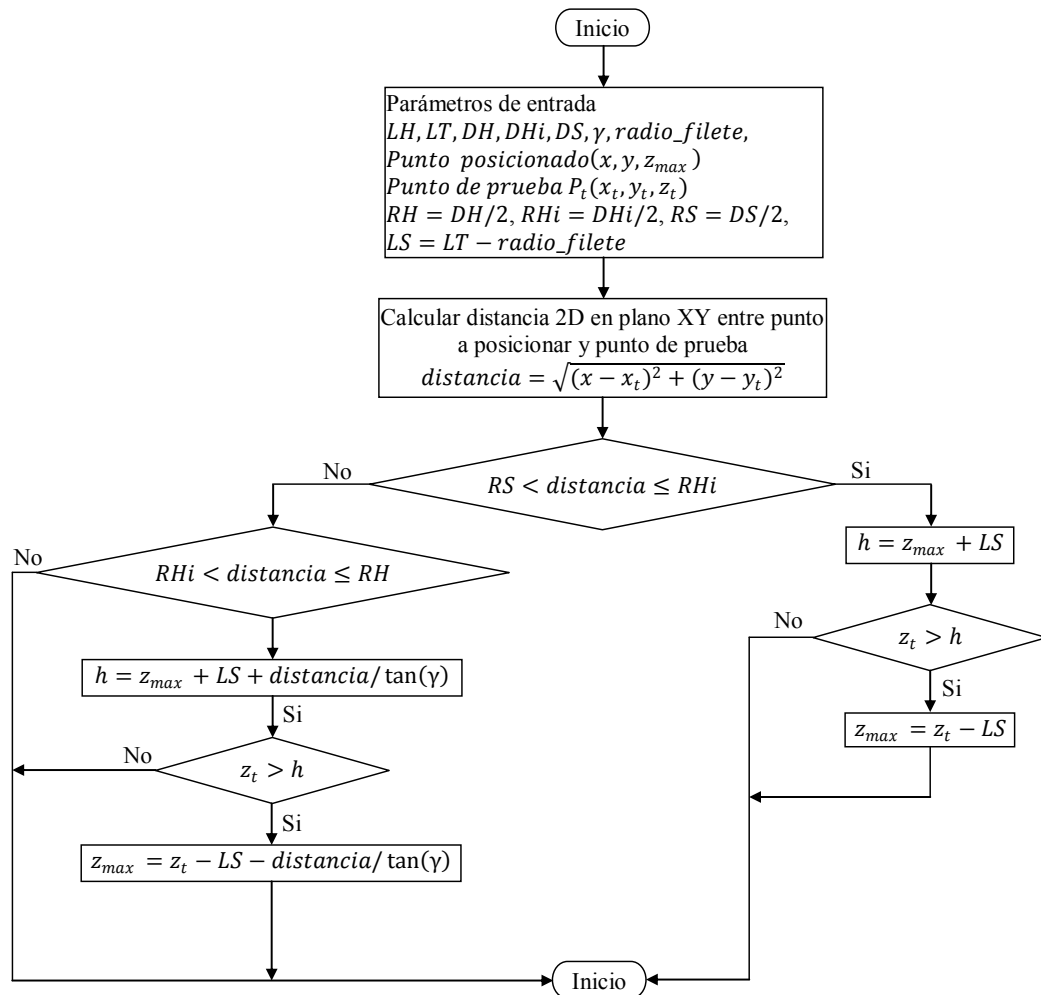


Figura 2.38. Diagrama de flujo para análisis de colisiones.

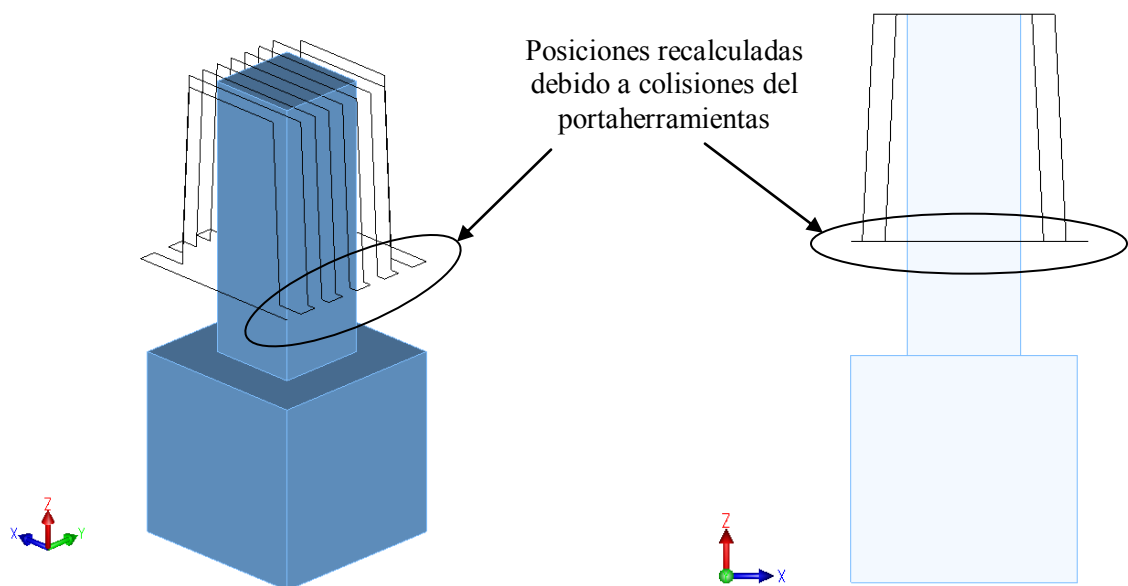


Figura 2.39. Recálculo de posiciones debido a colisiones.

### 2.4.3.6 Ventajas y desventajas

Las ventajas y desventajas del método por discretización se resumen a continuación:

#### Ventajas

- Funciona para la generación de trayectorias utilizando tres tipos de herramientas: plana, punta de bola y filete.
- En los modelos probados, la discretización de la superficie no ha presentado fallas.
- Debido a que el modelo se encuentra en una matriz de puntos, puede ser utilizada tanto para la generación de trayectorias como el análisis de colisiones.
- Al no estar basado en operaciones booleanas, el tiempo de cálculo no es tan elevado como en los dos métodos anteriores.

#### Desventajas

- La cantidad de datos que se generan en la discretización puede ser muy elevada, haciendo lento el proceso, sobre todo cuando los modelos son de tamaño grande.
- En superficies de forma libre el proceso es más lento que en modelos de formas regulares. Tanto la intersección mediante los planos de corte como la discretización de los lados presentan tiempos mayores que en modelos del mismo tamaño pero de formas regulares.
- Debido a que en cada posición de la herramienta se leen todos los puntos del área proyectada de la herramienta y al tener un paso pequeño se re-leen muchas veces los mismos puntos ya que influyen en más de una posición, lo cual es un proceso ineficiente.

Debido a las ventajas que presenta el método basado en la discretización de la superficie sobre los dos primeros métodos, la discretización de superficies se utilizará para la generación de trayectorias de herramienta para desbaste y acabado.

## 2.5 Generación de trayectorias de herramienta para desbaste

El objetivo de las trayectorias de desbaste es conducir la herramienta para eliminar el material innecesario de la materia prima dejando solo una capa delgada para el proceso de acabado. El método más comúnmente utilizado es el desbaste “capa por capa”, el cual consiste en remover el material innecesario de la materia prima en forma de planos de corte o capas. El resultado del maquinado en capas es una forma final en forma escalonada (efecto escalera), Figura 2.40, [56]-[58].

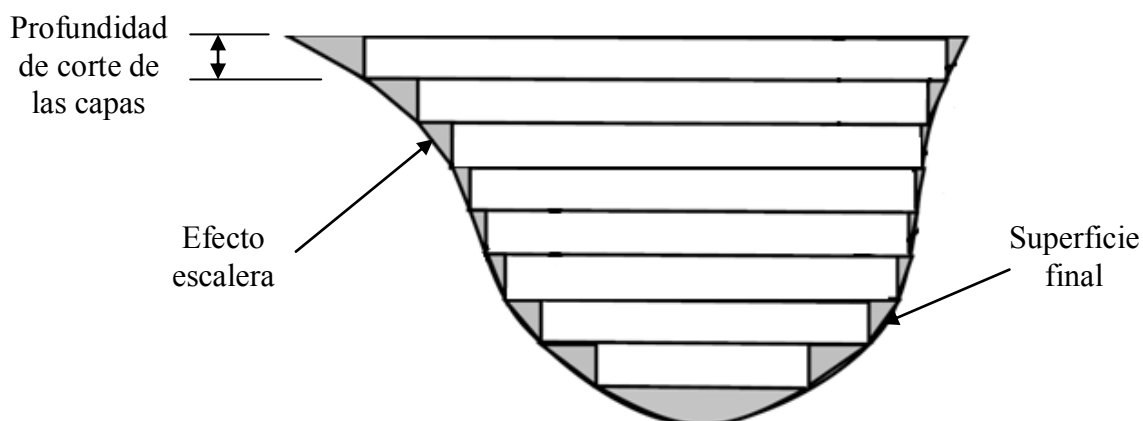


Figura 2.40. Desbaste capa por capa.

En el método propuesto para las trayectorias de desbaste, primero se generan las trayectorias sobre el modelo final y la materia prima. A partir de ambas se calculan las trayectorias finales.

### 2.5.1 Parámetros en el desbaste

En el desbaste se tienen dos parámetros fundamentales: profundidad de corte y el intervalo entre trayectorias paralelas. La profundidad indica la distancia que habrá entre trayectorias en la dirección de  $Z$ , o bien, la distancia o avance entre pasada y pasada. Particularmente en el desbaste la profundidad de corte se puede calcular en función del diámetro de la herramienta como:

$$\Delta z = \frac{1}{3} D \quad (2.23)$$

donde

$\Delta z =$  profundidad de corte

$D =$  diámetro de la herramienta

Por otra parte, el intervalo entre trayectorias es la distancia entre trayectorias paralelas y también se puede calcular en función del diámetro de la herramienta como:

$$w = D - d \quad (2.24)$$

$$\text{ó}$$

$$w = \frac{2}{3} D \quad (2.25)$$

donde

$w =$  intervalo entre trayectorias paralelas

$D =$  diámetro de la herramienta

$d =$  traslape entre las trayectorias

En la ecuación (2.24) comúnmente los valores de  $d$  son de 1.0, aunque la ecuación (2.25) es más conservadora por lo que es la opción utilizada en el presente trabajo. Sin embargo, los valores tanto de la profundidad de corte como del intervalo entre trayectorias pueden ser seleccionados de acuerdo a la experiencia del programador.

La capa para acabado es una pequeña capa de material que se deja para darle el acabado superficial y la precisión dimensional a la pieza. Para que esta capa no se remueva durante el maquinado de desbaste, las herramientas utilizadas son modificadas de acuerdo a la capa de material deseada, es decir, si la capa es  $l$  mm, a la herramienta se le aplica un desplazamiento en todas las superficies de un valor  $l$ . De tal manera que cuando se realice el maquinado real con la herramienta definida quedara una capa para acabado.

### 2.5.2 Cálculo de las pasadas

El método para el cálculo de las pasadas o de las trayectorias de la herramienta debe ser capaz de generarlas ya sea a partir de una materia prima rectangular o de forma aproximada. La principal diferencia entre ambas, en cuestión de trayectorias es que en las formas rectangulares las trayectorias finales se calculan numéricamente a partir de la posición y dimensiones especificadas para la materia prima. En la Figura 2.41 se muestra la sección de una forma rectangular, las

trayectorias de la herramienta se calculan simplemente desplazando tres lados. Los laterales se desplazan una distancia igual al radio de la herramienta y el superior se desplaza el radio del filete de la herramienta. Finalmente se unen y se obtiene la trayectoria de la herramienta para esta forma de la materia prima. El ejemplo mostrado está calculado para una herramienta de punta de bola. Para formas aproximadas las trayectorias se calculan al igual que en un modelo final.

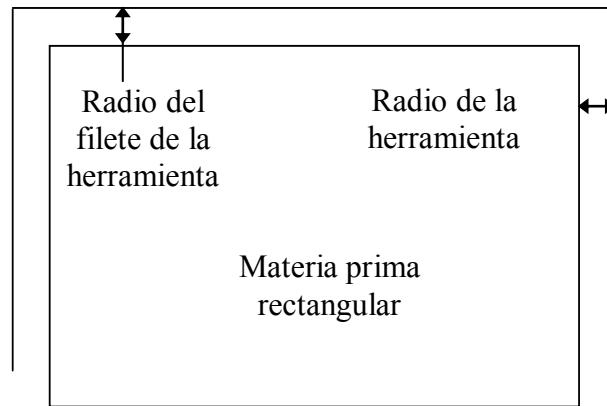


Figura 2.41. Generación de trayectorias en materia prima rectangular.

Considerando que ya se tienen las trayectorias tanto del modelo final como de la materia prima, el siguiente paso es el cálculo de las pasadas. El método se basa en la intersección de líneas rectas que representan el punto de referencia de la herramienta utilizada, recordando que las trayectorias generadas sobre la superficie del modelo final y de la materia prima son generadas utilizando interpolación lineal, es decir, segmentos de recta. Si se define una línea horizontal que representa el punto de referencias de la herramienta para cada pasada y se buscan todas las intersecciones con las líneas que forman la trayectoria de la herramienta sobre el modelo, se pueden encontrar las trayectorias para remover todo el material del modelo o de la materia prima. Los puntos de intersección encontrados se ordenan y si existen más de dos puntos de intersección, entonces la pasada estará compuesta por más de un segmento. El primer punto siempre inicia un segmento de acuerdo al método y el siguiente termina dicho segmento, y así sucesivamente hasta unir todas las intersecciones. El número de segmentos dependerá de la cantidad de intersecciones, por ejemplo, en la Figura 2.42 se tienen cuatro puntos de intersección los cuales corresponden a dos segmentos.

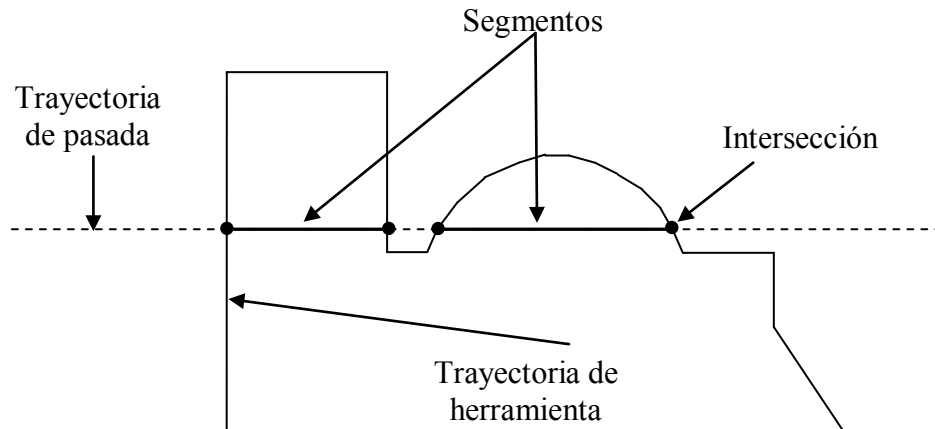


Figura 2.42. Método para el cálculo de las trayectorias por pasada.

Aplicando este método a los modelos completos se obtiene el resultado mostrado en la Figura 2.43. En principio las pasadas se calculan como si se quisiera remover todo el material del modelo. Sin embargo, es evidente que si las trayectorias se quedan como se generaron se removería todo el material. Para que las trayectorias de la materia prima no remuevan el material correspondiente al modelo final, a las trayectorias de la materia prima se le sustraen las trayectorias del modelo final, Figura 2.44. Cabe mencionar que las trayectorias en ambos modelos tienen las mismas alturas para que coincidan.

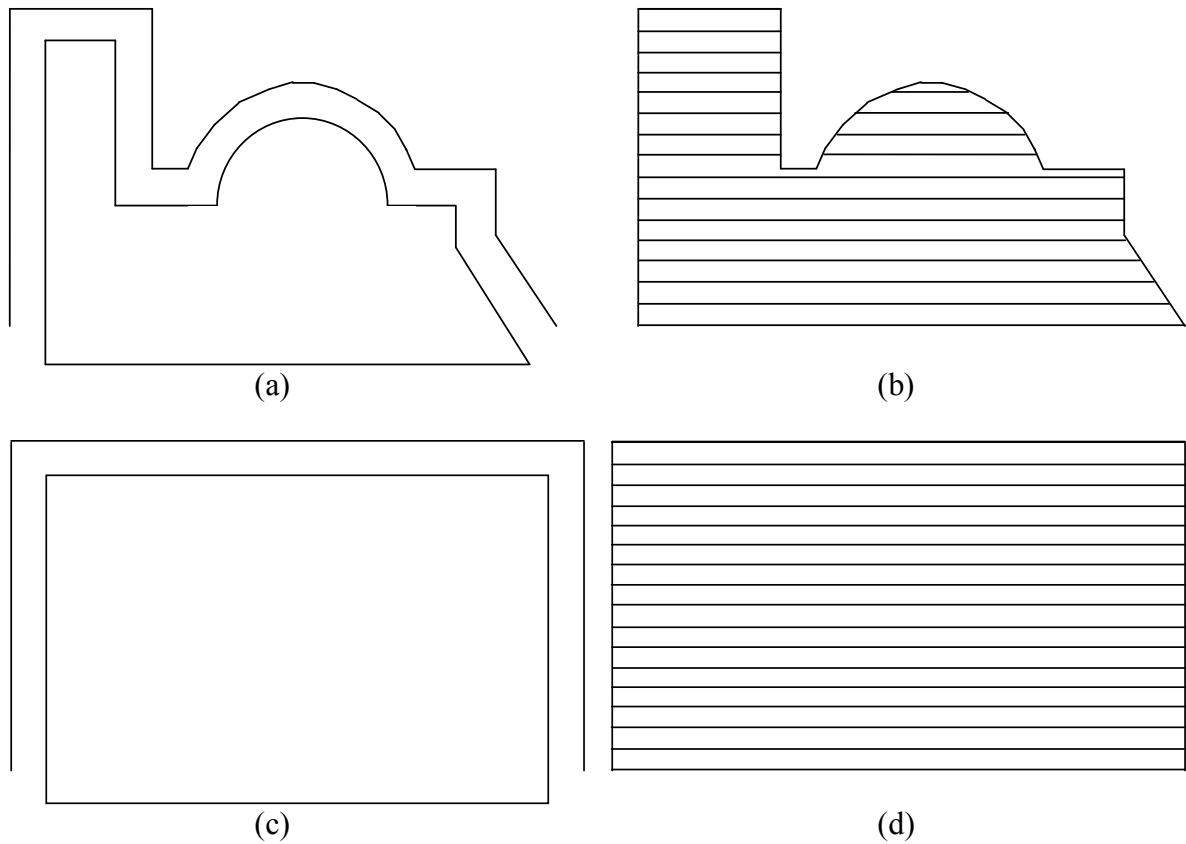


Figura 2.43. Generación de trayectorias por pasada: a) trayectorias sobre modelo final, b) pasadas para modelo final, c) trayectorias sobre materia prima, y d) pasadas para materia prima.

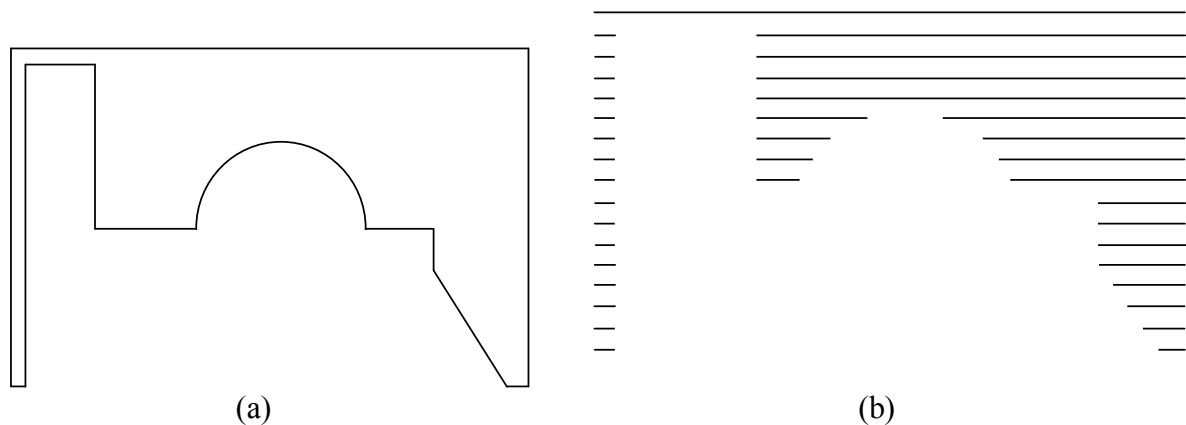


Figura 2.44. Sustracción de modelos: a) sustracción de modelos, y b) sustracción de trayectorias.

Ahora ya se tienen las trayectorias sin interferir en el material del modelo final, sin embargo, el objetivo final es obtener trayectorias continuas para cada pasada de la herramienta. Para esto, en la Figura 2.45 en lugar de calcular los segmentos que pasan en el interior del modelo se calculan los segmentos que evitan el interior del modelo. Cuando se generan las trayectorias por pasada, se lee cada segmento de la trayectoria final, de esta manera cuando se encuentra la primera intersección también se puede evaluar cual es el segmento con la mayor altura hasta la próxima intersección. El máximo punto encontrado es la altura hasta la cual debe elevarse la herramienta para evitar el material del modelo, Figura 2.45.

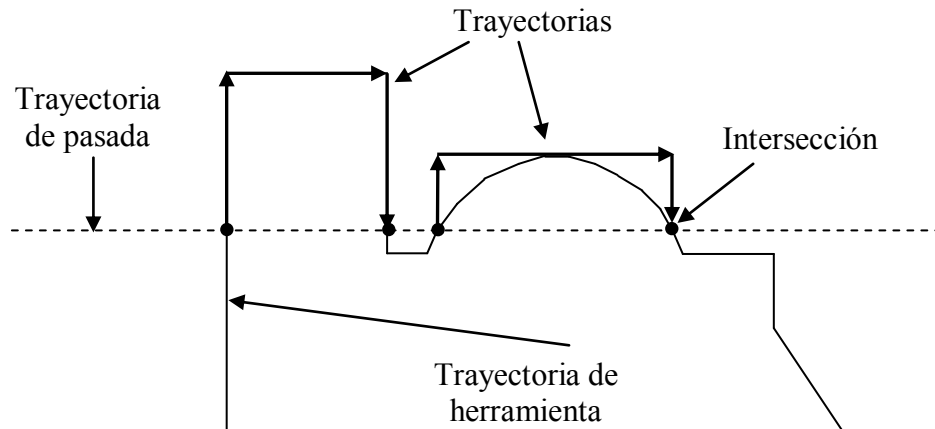


Figura 2.45. Generación de trayectorias para evitar interferir en el modelo final.

Las trayectorias se calculan para cada pasada, y así en lugar de sustraer las trayectorias del modelo final a las de la materia prima, se añade la trayectoria calculada y se genera una trayectoria continua. En la Figura 2.46 se muestran las trayectorias finales para desbaste. Con este método la superficie al final del desbaste queda en forma escalonada como en la Figura 2.40. Para eliminar este efecto la última pasada de desbaste es la trayectoria final calculada sobre el modelo original y a partir de la cual se calculan las intersecciones para generar las pasadas. La Figura 2.47 muestra la generación de trayectorias de desbaste a partir de una materia prima rectangular, en las trayectorias se puede observar las trayectorias de las pasadas así como de la pasada final que recorre la superficie del modelo.

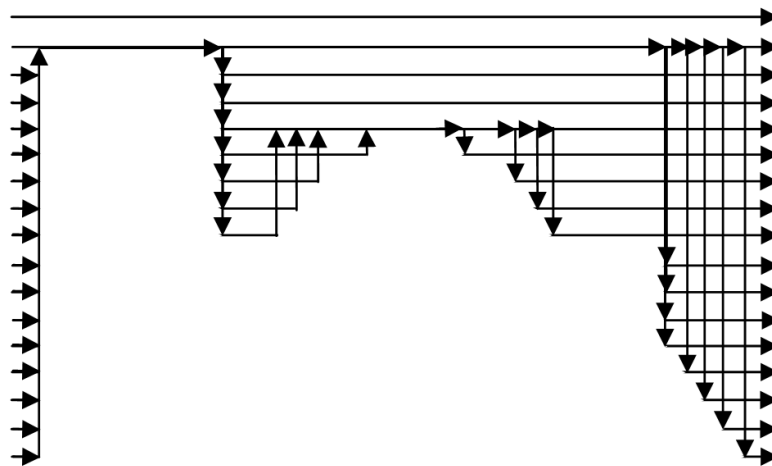
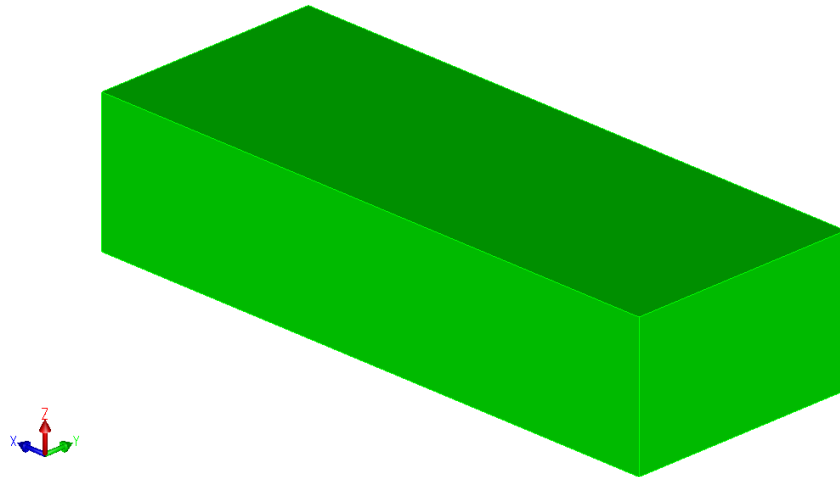
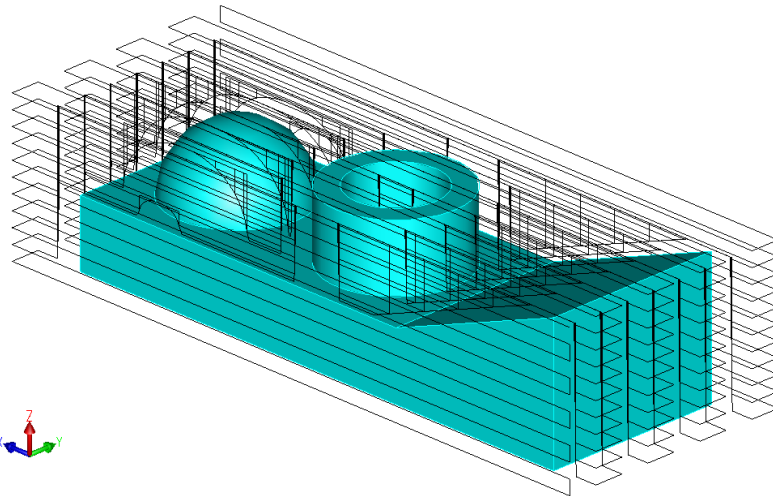


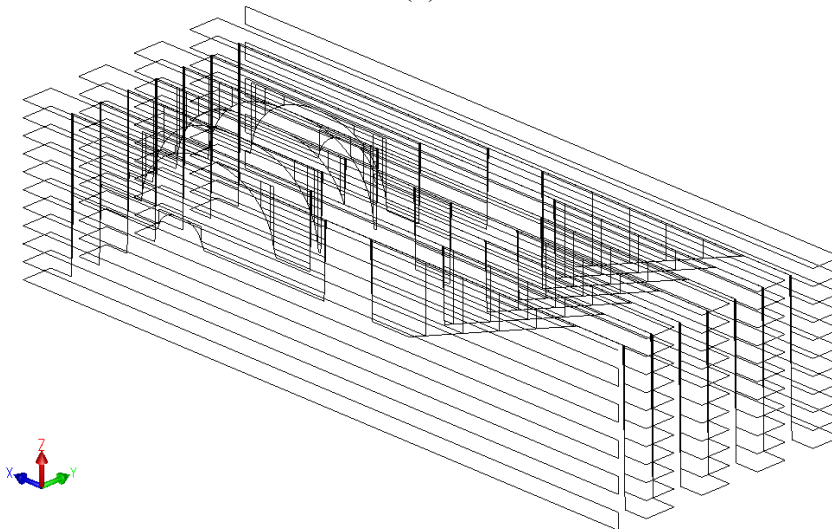
Figura 2.46. Trayectorias finales para desbaste.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.47. Trayectorias de desbaste: a) materia prima, b) trayectorias de desbaste sobre modelo, y c) trayectorias de desbaste.

## 2.6 Generación de trayectorias de herramienta para acabado

Durante la generación de las trayectorias de desbaste se deja una capa de material para la etapa de acabado, aunque como resultado del desbaste por capas y un intervalo entre trayectorias relativamente grande comparado con el intervalo en el acabado, en algunas zonas también existen una mayor concentración de material. Todo este material excedente es removido en esta etapa de acabado en una sola pasada. Aquí ya no se considera la materia prima, porque las trayectorias se generan sobre el modelo final.

Existen dos parámetros principales en el acabado de los cuales dependerá la calidad de la superficie final: el paso en la dirección de maquinado y el paso entre trayectorias paralelas.

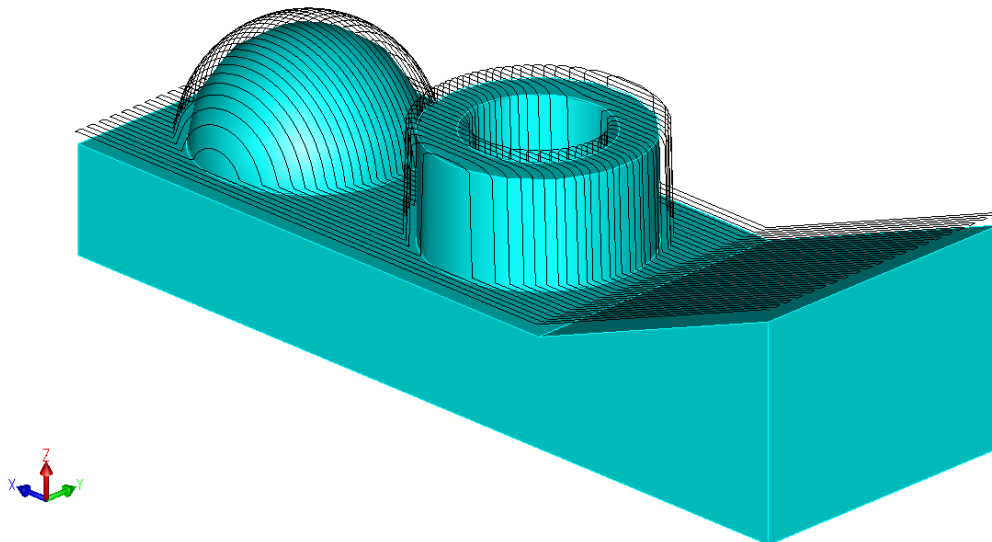
### 2.6.1 Paso en la dirección de maquinado

El paso en la dirección de maquinado está determinado por la tolerancia que se defina. El paso se adapta para lograr que la superficie final cumpla las especificaciones de tolerancia, como se explicó en la sección 2.4.3.4.

### 2.6.2 Paso entre trayectorias paralelas

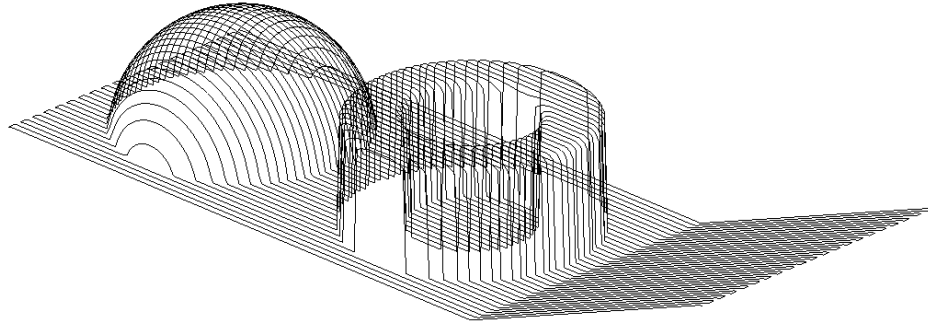
El paso entre trayectorias paralelas se refiere a la distancia que habrá entre trayectoria y trayectoria de la herramienta. Dado el paso entre dichas trayectorias, el diámetro de la herramienta y el ángulo de la superficie a maquinarse, se puede calcular cual será el error aproximado (ecuación (1.14)) y seleccionar el paso que más se adecue a la tolerancia requerida.

Las trayectorias para acabado se generan con los algoritmos para la generación de trayectorias presentados en la sección 2.4 con una tolerancia y paso entre trayectorias adecuado. La Figura 2.48 muestra un modelo y sus trayectorias para maquinado de acabado.



(a)





(b)

Figura 2.48. Trayectorias de acabado: a) modelo y sus trayectorias, y b) trayectorias.

# Capítulo 3

## Generación de código o instrucciones de maquinado

---

En este Capítulo se presenta el desarrollo de los algoritmos para la generación de código a partir de las trayectorias de herramienta presentadas en el Capítulo 2.

### 3.1 Control Numérico (NC) o Control numérico computarizado (CNC)

La diferencia entre las abreviaciones NC y CNC, radica en que la primera representa las viejas y originales tecnologías de Control Numérico y la segunda representa las nuevas tecnologías de Control Numérico Computarizado. Sin embargo, la abreviación CNC es preferida en la práctica. El Control Numérico se puede definir como la operación de máquinas-herramienta por medio de instrucciones codificada específicamente para el sistema de control de la máquina [7][59]. Esas instrucciones son una combinación de letras del alfabeto, dígitos y símbolos seleccionados, por ejemplo, el punto decimal, el signo de porcentaje y los paréntesis. La sucesión de instrucciones que representan ordenes y procesos correlativos relacionados con el maquinado de una pieza escritos en un orden lógico, forman un programa NC o programa CNC. Dichas instrucciones pueden estar en subrutinas o dentro del cuerpo del programa.

Al igual que cualquier lenguaje de programación, el campo del CNC también tiene su propia sintaxis y términos especiales. Hay cuatro términos básicos utilizados en la programación CNC. Esas palabras son la clave para entender la terminología general [59]-[60].

*Carácter → Palabra → Bloque → Programa*

Cada término es muy común e importante en la programación CNC y merece su propia explicación a detalle.

#### 3.1.1 Carácter

El carácter es la unidad más pequeña de un programa CNC. Puede tener una de las siguientes tres formas:

- **Dígitos.** Hay diez dígitos, del 0 a 9, disponibles para el uso en un programa y crear números. Los dígitos son utilizados en dos modos, uno para números enteros (números sin punto decimal), y el otro para números reales (números con punto decimal). Los números pueden tener valores negativos o positivos. En algunos controles, los números reales pueden o no utilizar punto decimal. Los números aplicados en cualquier modo pueden ser solo introducidos dentro del rango que es permitido por el sistema de control.
- **Letras.** En teoría las 26 letras del alfabeto inglés están disponibles para la programación. Sin embargo, muchos de los sistemas de control aceptarán solo ciertas letras y rechazarán

otras. Por ejemplo, el control de un torno CNC rechazará la letra Y, como el eje Y, ya que es único en las operaciones de fresado (máquinas fresadoras y centros de maquinado). Las letras mayúsculas son una designación normal en la programación CNC, pero algunos controles aceptan letras minúsculas con el mismo significado que su equivalente en mayúscula.

- **Símbolos.** Varios símbolos son utilizados para la programación, adicionalmente a las letras y dígitos. Los símbolos más comunes son el punto decimal, signo menos (-), signo de porcentaje (%), paréntesis (()) y otros, dependiendo de las opciones del control.

Los caracteres se combinan en palabras significativas. Esta combinación de dígitos, letras y símbolos es llamado programa alfa-numérico.

### 3.1.2 Palabra

Una palabra en un programa es una combinación de caracteres alfa-numéricos, creando una sola instrucción para el sistema de control. Normalmente cada palabra inicia con una letra mayúscula que es seguida por un número representando un código de programa o el valor actual. Las palabras típicas indican las posiciones de los ejes, avances, velocidades, comandos preparatorios, funciones auxiliares y muchas otras definiciones.

### 3.1.3 Bloque

Así como la palabra es utilizada como una sola instrucción para el sistema CNC, el bloque es utilizado como una instrucción múltiple. Un programa introducido dentro del sistema de control consiste de líneas individuales de instrucciones, secuenciadas en un orden lógico. Cada línea, llamada secuencia bloque o simplemente bloque, está compuesta por una o varias palabras y cada palabra está compuesta de dos o más caracteres.

En el sistema de control, cada bloque debe ser separado de todos los demás. Cuando se prepara el programa en una computadora, la tecla “enter” del teclado terminará el bloque. Cuando se escribe un programa primero en papel, cada bloque del programa debe ocupar solo una línea en el papel. Cada bloque de programa contiene una serie de instrucciones que son ejecutadas juntas.

### 3.1.4 Programa

La estructura de un programa varía de acuerdo al control utilizado, pero el enfoque lógico no cambia de un control a otro. Un programa CNC usualmente inicia con el número de programa o una identificación similar, seguido por un bloque de instrucciones en un orden lógico. El programa termina con el código de paro o un símbolo de terminación de programa, tal como el signo de porcentaje (%). La documentación interna y los mensajes del operador pueden ser ubicados en lugares estratégicos dentro del programa.

## 3.2 Estructura de los bloques de programa

Una estructura típica de un bloque de programación, depende del sistema de control y del tipo de máquina CNC. Un bloque puede contener las siguientes funciones (Figura 3.1), en el orden sugerido, no siendo necesaria la programación de todas ellas.



Figura 3.1. Estructura de un bloque en programación CNC.

### 3.2.1 Número de bloque (N)

El número de bloque, también llamado código N, es el número de identificación del bloque (línea) en un programa CNC. La palabra de código común utilizada comienza con N. N es el primer código en un bloque y normalmente tiene un rango N1 hasta N9999. Muchos sistemas CNC no requieren el uso de códigos N lo cual ayuda a liberar memoria. Sus principales beneficios son el que permiten la búsqueda fácil en programas largos y la capacidad de volver a hacer partir un programa en casi cualquier número de línea. Usualmente el programador saltará N números entre bloques para dejar espacio para insertar posteriormente bloques olvidados o adicionales. En la Tabla 3.1 se muestran algunos ejemplos de la numeración de los bloques y sus incrementos.

Incremento	Programa
2	N2, N4, N6, N8, ...
5	N5, N10, N15, N20, ...
10	N10, N20, N30, N40, ...
100	N100, N200, N300, N400, ...

Tabla 3.1. Ejemplos de números de bloque.

### 3.2.2 Funciones preparatorias (G)

Las funciones preparatorias son los códigos G. Los códigos G son indicados por la letra G y un número de 2 dígitos. Estos códigos son las funciones más importantes en programación CNC debido a que dirigen el sistema CNC para el procesamiento de los datos de coordenadas en una manera particular. Algunos ejemplos son: transversal rápido, interpolación circular e interpolación lineal. Los códigos son algo casi estandarizado en la industria. A continuación se presentan la descripción de los códigos más importantes. La lista completa de las funciones preparatorias se encuentra en el apéndice A. El término “Modal” o “Función modal” significa que una vez que una función ha sido programada, permanece activa hasta que se programe una función incompatible, se presente una emergencia o un reset, o se apague o encienda el CNC.

#### **G00 Avance rápido**

Formato N... G00 X... Y... Z...

Este comando desplaza los carros a la velocidad máxima hasta el punto final programado (posición de cambio de herramienta, punto inicial para el siguiente arranque de viruta). Esta es una de las funciones más peligrosas en el mundo de la programación CNC, debido a que el movimiento de los carros se efectúa a la máxima velocidad programada por el fabricante de la máquina. Además hay que tener en cuenta cual de los tres ejes es el primero que llega a la coordenada definida. Siempre que se pueda es aconsejable realizar este movimiento en dos fases. La primera es alejar la herramienta de la zona comprometida, por ejemplo, si en Z se puede salir de manera vertical sin tropiezo alguno con ningún obstáculo o con la misma pieza, se lleva la herramienta a un altura Z lejos de la pieza y luego se mueve en X y Y.

Notas

- Mientras se ejecuta G00 se suprime el avance de carro programado.
- La velocidad de avance rápido la define el fabricante de la máquina.

#### **G01 Interpolación lineal**

Formato N... G01... X... Y... Z... F...

Pueden ser movimientos con variación simultánea en los 3 ejes. Esto significa que pueden ser trayectorias espaciales no paralelas a ninguno de los ejes. El CNC calculará las velocidades relativas según cada uno de los ejes, de manera que el resultado de la combinación sea una trayectoria rectilínea. El movimiento recto se realiza con velocidad de avance programada. Normalmente el avance (F) es modal. G01 no puede ser incluida en un mismo bloque con G00, G02, G03 y G33 ya que es modal.

#### **G02 Interpolación circular a derechas y G03 Interpolación circular a izquierdas**

Formato N... G02/G03 X... Y... Z... I... J... K... F...

ó

N... G02/G03 X... Y... Z... R... F...

X, Y, Z.....Punto final de arco (absoluto o incremental)

I, J, K.....Parámetros incrementales de arco (distancia desde el punto inicial al centro de arco, I está en relación al eje X, J en relación con el eje Y, K con el eje Z).

R.....Radio del arco (arco menor que un semicírculo en +R, mayor que un semicírculo en -R). Puede introducirse en lugar de los parámetros I, J, K.

Los códigos G02 y G03 son trayectorias según arcos de circunferencia. Sólo pueden ejecutarse en un plano determinado: XY, XZ o YZ. La Figura 3.2 muestra los giros según el plano de trabajo seleccionado. En este caso el CNC no solo deberá calcular las velocidades relativas de cada eje sino también la aceleración y desaceleración de los movimientos para tener una trayectoria circular. Las herramientas se desplazarán al punto final a lo largo del arco definido con el avance programado con F.

#### Notas

- La interpolación circular solo puede realizarse en el plano activo.
- Si I, J ó K tiene valor 0, el parámetro en cuestión no debe introducirse.
- Hay que contemplar el eje de giro de G02, G03 siempre perpendicularmente al plano activo.

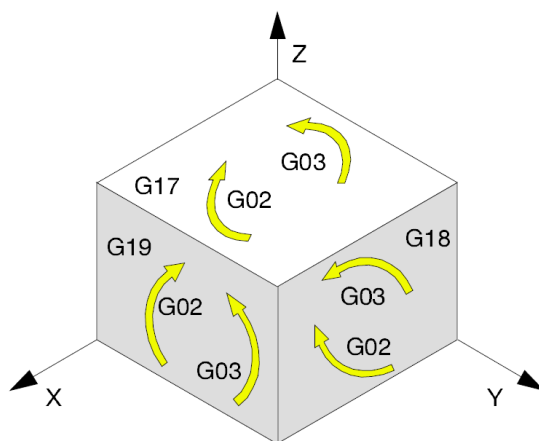
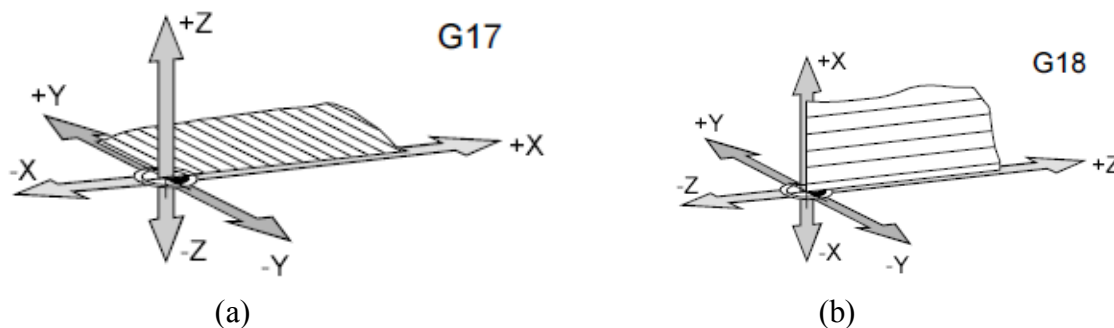


Figura 3.2. Direcciones de giro de G02 y G03.

#### G17-G19 Selección de plano

Formato N... G17/G18/G19

Con G17 – G19 se determina el plano en el que puede realizarse la interpolación circular y la interpolación de coordenadas polares; en dicho plano se calculará la compensación del radio de herramienta. En el plano perpendicular al plano activo se realizará la compensación de la longitud de la herramienta. La Figura 3.3 muestra el plano de trabajo que le corresponde a los códigos G17, G18 y G19.



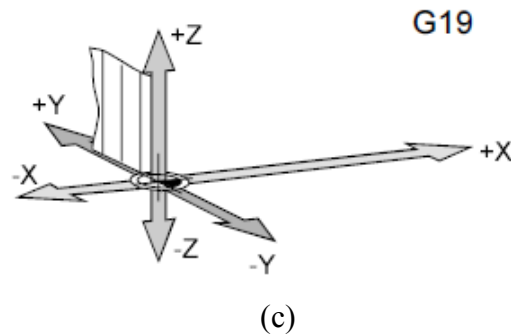


Figura 3.3. Selección de planos del área de trabajo: a) plano XY, b) plano XZ, y c) plano YZ.

### G20 Medidas en pulgadas

Formato N... G20

Programando G20 se cambian las siguientes indicaciones al sistema de medición en pulgadas:

- Avance F [mm/min, pulgadas/min, mm/rev, pulgadas/rev]
- Valores de decalaje (decalaje de origen, geometría y desgaste) [mm, pulg.]
- Desplazamientos [mm, pulg.]
- Visualización de la posición actual [mm, pulg.]
- Velocidad de corte [m/min, pies/min]

Notas

- Para mayor claridad, G20 debe definirse en el primer bloque del programa.
- El último sistema de medición programado permanecerá activo incluso tras la desconexión/conexión del interruptor principal.

### G21 Medidas en milímetros

Formato N... G21

Comentario y notas: como para G20 pero en milímetros.

### G28 Aproximación al punto de referencia

Formato N... G28 X... Y... Z...

X, Y, Z: coordenadas de posición intermedia

El comando G28 se utiliza para la aproximación a un punto de referencia a través de una posición intermedia (X, Y, Z). Primero se produce la retirada a X, Y o Z, después la aproximación al punto de referencia. Ambos movimientos se realizan con G00.

### G40-G42 Compensación del radio de la herramienta

Formato N... G40/G41/G42

La compensación es un pequeño desplazamiento de la herramienta sobre la línea de corte, es decir, se puede cortar justo por el centro de la línea (G40), o bien, a un lado derecho (G42) o izquierdo (G41), Figura 3.4.

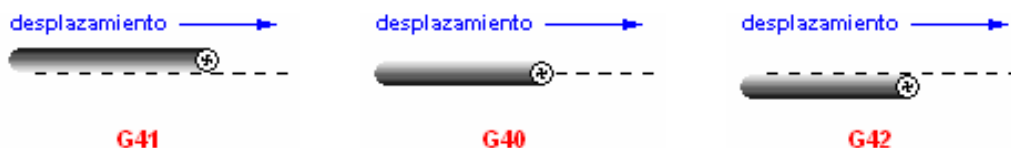


Figura 3.4. Compensación del radio de la herramienta.

A estos tres comandos no les acompaña ningún valor que le indique de cuanto será la compensación. Sin embargo, la máquina debe tener la capacidad suficiente para reconocer el diámetro de la herramienta con el que está trabajando en el momento de aplicarla y así calcular, de cuanto será la compensación.

### G43 Compensación de la longitud de la herramienta

Formato N... G43 H...

Activa la compensación de la longitud de la herramienta. Esto permite al usuario utilizar las herramientas con diferentes longitudes. El sistema recupera automáticamente el desplazamiento de valor de la longitud de la herramienta actual y agrega unos valores adicionales al desplazamiento. Cuando se utilizarán diferentes herramientas para un maquinado, se deben definir y asociar los valores de la longitud para cada herramienta y de esta manera el sistema automáticamente compensará la longitud de la herramienta seleccionada.

### G90-G91 Coordenadas absolutas e incrementales

Formato N... G90/G91

El código G90 es una instrucción modal, que por defecto asume el control numérico cuando se inicia. Cuando se programa G90 en un bloque, lo que se está indicando al control es que todas las cotas que salgan en el programa son cotas en absoluto, es decir, todas las medidas están tomadas desde un mismo punto de referencia ubicado en la pieza (cero pieza), es decir, el origen del sistema de coordenadas ubicado en la pieza, Figura 3.5.

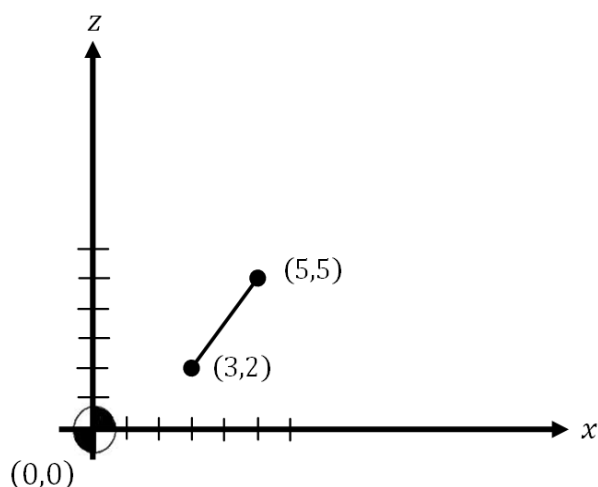


Figura 3.5. Cotas absolutas.

G91 también es una función modal, que indica que la programación se va a realizar en cotas relativas. La referencia es siempre el último punto programado, es decir, en una línea recta se precisa tener la referencia del último punto para poder indicar el siguiente. En la Figura 3.6 se



tiene un punto inicial, se desea desplazarse hacia el punto final. Para realizar este proceso en forma incremental, se tiene que utilizar el punto inicial como si se tratará del origen. El punto utilizado de referencia es igual que el punto (0,0) en coordenadas absolutas. Una vez que se llegó al punto final, la siguiente trayectoria se realiza en referencia a ese punto final.

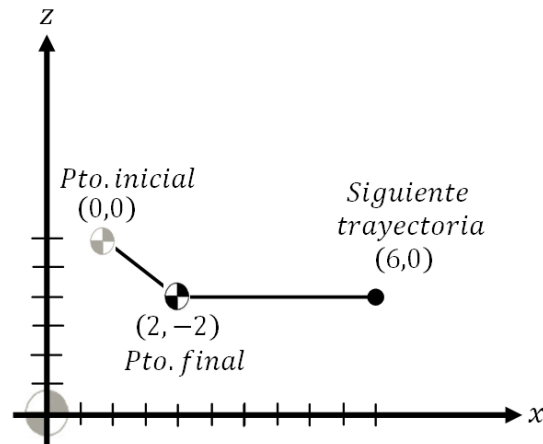


Figura 3.6. Cotas incrementales.

### 3.2.3 Avance de los ejes (F)

El avance se representa mediante la letra “F” seguida del valor de avance deseado. Esta función es modal por lo que permanece hasta que su valor sea cambiado o se utilice un código G00. Por ejemplo para indicarle al control que realice un movimiento lineal con avance programado de 300 de un punto a otro se puede utilizar la siguiente estructura.

N... G... X... Y... Z... F300

### 3.2.4 Velocidad del cabezal (S)

Esta función determina la velocidad del cabezal. El nombre del cabezal estará definido por uno o dos caracteres. El primer carácter es la letra S y el segundo carácter, que es opcional, será un sufijo numérico entre 1 y 9. De esta forma el nombre de los ejes podrá ser cualquiera del rango S a S9. En la línea de abajo se muestra la programación de un giro del cabezal o husillo de 1300 rpm.

N... S1300

### 3.2.5 Número de herramienta (T)

Esta función selecciona la herramienta con la que se va a ejecutar el maquinado programado. La herramienta se representa mediante la letra “T” seguida del número de herramienta, por ejemplo, para definir la herramienta número 2 se utilizan las siguientes palabras:

N... T2

### 3.2.6 Funciones auxiliares (M)

Las funciones auxiliares son las encargadas de controlar todos los aspectos auxiliares al maquinado, tales como la puesta en marcha de la herramienta, elección del sentido de giro, puesta

en marcha de los sistemas de refrigeración, etc. Son junto a las funciones preparatorias, las más importantes de la programación.

El formato es dos caracteres que corresponden con el número de función escogida. Si la función tiene colocado un cero como carácter izquierdo se puede escribir utilizando los dígitos u obviando el cero de la izquierda. En ambos casos el control actuará de la misma manera. Por ejemplo:

M03=M3 M05=M5

En una frase de programación se puede escribir más de una función auxiliar, pero estarán siempre una tras otra y no deberán ser contradictorias entre sí. Por ejemplo si escribe una función de giro de husillo y a continuación se escribe uno de paro de husillo, el control solo hará caso de la última que lea. Las funciones auxiliares son modales. Por tanto no es obligado escribir en todos los bloques las funciones auxiliares, sino en solo aquellas que tengas que actuar. A continuación se presenta la descripción de los principales códigos M. Algunas funciones adicionales se pueden encontrar en el apéndice B.

#### **M00 Parada programada**

Formato N... M00

Este comando produce una parada en la ejecución de un programa de piezas. El cabezal de fresado, los avances y el refrigerante se desconectan. Las puertas de protección contra virutas pueden abrirse sin que se active la alarma.

#### **M02 Fin del programa principal**

Formato N... M02

Para el programa y desconecta todos los motores. Para iniciarlo nuevamente, será necesario colocarse manualmente al principio del mismo y después actuar el arranque del programa.

#### **M03-M04 Giro de husillo de fresado**

Formato N... M03/M04

El husillo se activa siempre que se hayan programado ciertas revoluciones a una velocidad de corte. El código M03 deberá ser utilizado para todas las herramienta de corte a la derecha, es decir, el husillo girará a la derecha. Por el contrario, para herramienta de corte a izquierda se debe utilizar un comando M04.

#### **M08–M09 Puesta en marcha del refrigerante**

Formato N... M08/M09

Son unas funciones auxiliares muy simples, actúan como un interruptor, al activar M08 se pone en marcha la salida del refrigerante y al activar el M09 se para el mismo.

#### **M30 Fin de programa**

Formato N... M30

Se para el programa y se detiene todos los programas. Cuando se ejecuta esta función se vuelve al inicio del programa.

### 3.2.7 Comentario de bloques

No tiene ninguna capacidad de cara al programa, y es puramente informativa. Su utilidad se reserva a apuntar datos en el programa que recuerden al operario datos fundamentales, tales como tipo y número de herramientas, inicios de programa, etc. Toda la información deberá ir siempre entre paréntesis. Por ejemplo, en el siguiente bloque se define un avance de 300 mm/min en la última palabra (F300) seguida de un comentario que dice que “El avance programado es de 300 mm/min” y que cuando el control llegue a esta parte lo ignorará, ya que solo es información complementaria.

N... G01 X... Y... Z... F300 (El avance programado es de 300 mm/min)

### 3.3 Estructura del programa

El cuerpo del programa presenta la siguiente estructura:

**Encabezado del programa.** Un programa CNC puede ser identificado por su número y, en algunos controles, también por su nombre. La identificación del programa por su número es necesaria con el fin de guardar más de un programa en la memoria del CNC. La cabecera del programa es un bloque que se compone del número del programa, si es requerido por el sistema de control desde el programa. Dos direcciones para el número de programa están disponibles, la letra estándar O para el formato EIA y dos puntos (:) para el formato ASCII (ISO). En la memoria, el sistema de control siempre muestra el número de programa con la letra O.

Si el programa utiliza el número de programa, tiene que estar dentro del rango permitido por el control. Los programas en los controles Fanuc típicos deben estar dentro del rango de 0-9999. El programa O0 ó O0000 no están permitidos. En el caso de algunos controles Fagor admite 14 caracteres y puede estar formado por letras mayúsculas, minúsculas y por números (no admite espacios en blanco), además de estar precedido con el símbolo de porcentaje %.

Fanuc	O1005, O1007, O12345
Fagor	%0123, %PROGRAM, %PART923R

El nombre definido en la cabecera no tiene ninguna relación con el nombre con el que se guarda el archivo. Ambos nombres pueden ser distintos.

**Cuerpo del programa.** El cuerpo del programa lo componen los bloques encargados de ejecutar las operaciones, movimientos.

**Fin del programa.** El final del cuerpo del programa se define mediante las funciones M02 o M30, siendo ambas funciones equivalentes, pero cada una tiene distintos propósitos. La función M02 parará el programa y para iniciarlo nuevamente, será necesario colocarse manualmente en el primer bloque del programa y después actuar el arranque del mismo. En cambio con M30, se regresa automáticamente al primer bloque del programa, pudiéndose actuar directamente el arranque de programa, sin necesidad de realizar ningún movimiento más. Cuando el programa lee el código M02 o M30 cancelará todos los movimientos de los ejes, giro del husillo, refrigerante y usualmente preestablece los valores por default del sistema. La función preferida para terminar el programa es M30. Es aconsejable colocar la función en un bloque por separado.

N65  
 N66 G91 G28 X0 Y0  
 N67 M30  
 %

El signo de porcentaje (%) después de M30 es un código especial de paro. Este símbolo termina la carga de un programa desde un dispositivo externo.

### 3.4 Generación de código CNC para maquinado

La generación de código CNC consiste en escribir las trayectorias de la herramienta dentro de un archivo en el formato adecuado para el sistema de control de las máquinas CNC. Para la escritura del código se seguirá la estructura presentada en la sección 3.3 y se implementará en un archivo de texto .TXT. El formato de programa CNC desarrollado en este trabajo, está basado en controles Fanuc, sin embargo, para otros tipos de controles solo es necesario cambiar algunos códigos, siendo en esencia la misma estructura.

#### 3.4.1 Encabezado del programa

En el código desarrollado en este trabajo el encabezado consiste del nombre del programa y de información general del proceso de escritura. La estructura del encabezado es igual para todos los códigos generados en el sistema, se inicia por escribir un símbolo porcentual (%) en el primer renglón y en el segundo el nombre del programa CNC, formado por una letra O inicial y después el número 1234, Figura 3.7. La segunda parte del encabezado es opcional, y solamente es una información general. Como se muestra en la Figura 3.7, cada renglón de esta sección del programa se encuentra encerrada entre paréntesis para que cuando el control llegue a esta sección, simplemente identifique las líneas como comentarios y sean omitidas. Esta sección incluye la información del programa donde fue generado el código, el nombre del modelo, la ubicación del archivo que contiene el modelo, la ubicación donde se guarda el código generado, así como la fecha y el tiempo en que fue creado.

```

Rough_CNC_code.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
%
O1234

(           **HWUTestBedApp products**           )
(           MACHINING system                       )

( ----- JOB INFORMATION ----- )

(Name of component:      Jelly_final.sat)
(File location:         Settings\Administrador\Escritorio\Jelly_final.sat)
(NC file location:      C:\HwTestBedApp\Temp\Rough_CNC_code.txt)
(Date:                  16/1/2013 (DD/MM/YY))
(Time:                  23:57:51 (GMT))
    
```

Figura 3.7. Encabezado del programa.

#### 3.4.2 Cuerpo del programa

Las trayectorias generadas con los algoritmos presentados en el Capítulo 2 son guardadas en una matriz tridimensional, donde las filas representan los planos en que fue generada cada trayectoria, las columnas contienen la información de las posiciones de la herramienta que forman la trayectoria para cada plano y las pasadas se encuentran distribuidas en los diferentes niveles de la

matriz, Figura 3.8. Para la matriz de acabado solo se tienen dos niveles. En el primero se encuentra solo el dato de la coordenada en que se encuentran las trayectorias y el número de niveles de la matriz. Y en el segundo se encuentran todas las posiciones de las trayectorias para acabado. La matriz para desbaste tiene tantos niveles como número de pasadas de la herramienta sean. En ambas matrices el elemento de la primera columna de cada fila, excepto el primer nivel, contiene el dato del número de posiciones para esa fila, es decir, el número de posiciones que forman la trayectoria. De esta manera, toda la información de las trayectorias se encuentra contenida dentro de la matriz.

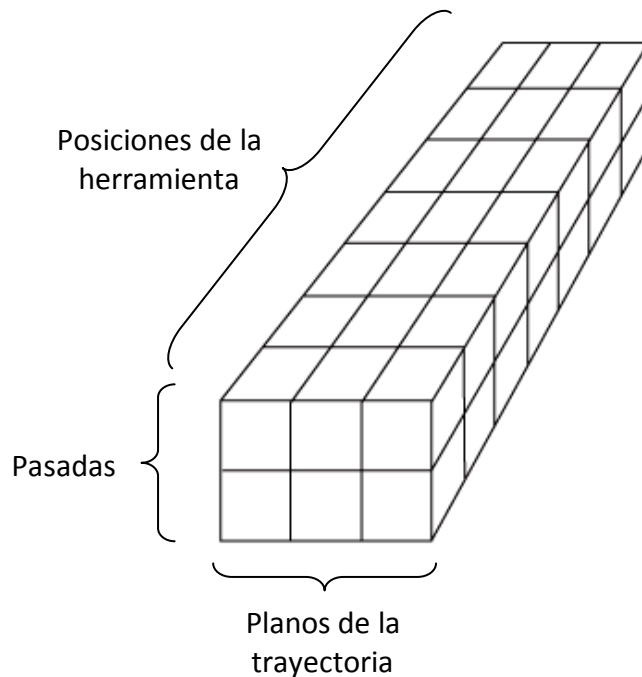



Figura 3.8. Organización de las matrices de desbaste y acabado.

En dichas matrices las trayectorias se encuentran por planos individuales, es decir, el número de trayectorias es igual al número de filas de la matriz multiplicada por el número de niveles menos uno. Sin embargo, para tener un movimiento continuo en los movimientos de la herramienta es necesario unir todas las trayectorias individuales en una sola, de tal manera que la herramienta machine la pieza la mayor parte del tiempo, es decir, evitar el maquinado en aire. La manera en que se guardan las trayectorias durante su generación está formulado para que la escritura sea lo más simple posible.

Dentro del cuerpo del programa se encuentran todas las instrucciones relacionadas con el maquinado de la pieza. En la primera parte del cuerpo del programa se encuentra toda la información para la puesta a punto de la máquina y en la segunda se incluyen todos los movimientos de la herramienta.

### Primera parte

La primera parte del programa se muestra en la Figura 3.9 y la descripción de cada uno de los bloques se describe a continuación:



```

Rough_CNC_code.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
%
01234

(                **HWUTestBedApp products**                )
(                MACHINING system                            )
( ----- JOB INFORMATION ----- )
(Name of component:      Jelly_final.sat)
(File location:         Settings\Administrador\Escritorio\Jelly_final.sat)
(NC file location:      C:\HWTestBedApp\Temp\Rough_CNC_code.txt)
(Date:                  16/1/2013 (DD/MM/YY))
(Time:                  23:57:51 (GMT))

N100 G21
N102 G00 G17 G40 G49 G80 G94
N104 G91 G28 Z0.0
N106 G00 G58 G90 X0.0 Y0.0 S1300 M03
N108 G43 H1 Z1.0 M08
    
```

Figura 3.9. Encabezado y primera parte del cuerpo del programa.

**Bloque 100.** La primera palabra del cuerpo del programa es el número de bloque, el cual puede iniciar con un número entero arbitrario, por ejemplo, el número cien con incrementos de dos. Este bloque consta del código G21 para indicarle al control que se trabajará en milímetros y de esta manera todos los movimientos definidos a partir de aquí se realizarán en dichas unidades.

**Bloque 102.** En este bloque se le indica al control que prepare un movimiento rápido (G00) además de que se trabajará en el plano XY (G17). Cuando la máquina se enciende o ha sido utilizada previamente, algunos comandos se mantienen activos, es decir, si se inicia un nuevo maquinado estos valores se mantendrán en la nueva pieza a menos de que sean cancelados. Por esta razón ciertas funciones deben ser canceladas antes de iniciar el maquinado de una nueva pieza, algunos de los comandos utilizados con este fin son: G40 que cancela la compensación del radio de la herramienta, G49 que cancela el offset definido para las herramientas previamente utilizadas y el G80 que cancela los ciclos fijos. Estos comandos son implementados dentro del código que se está escribiendo. En el mismo bloque también se incluye el código G94 para indicarle al control que el avance será definido por minuto, mm/min.

**Bloque 104.** El siguiente paso es enviar el sistema a la posición de referencia de la máquina, para lo cual se incluye el código G91 para que a partir de la posición actual de la máquina, se aproxime a la posición de referencia definida por el código G28, utilizado como punto intermedio con la posición actual en el plano XY y coordenada en Z igual a cero (Z0.0), recordando que el código G00 es modal y se encuentra activo.

**Bloque 106.** En este bloque se incluye la información del origen de la pieza, o cero pieza. El comando G58 le indica al control que dentro de sus registros de las coordenadas de trabajo, previamente configuradas, utilice las ubicadas en la posición 5. Este comando puede ser sustituido por G55-G59, de acuerdo a las coordenadas de trabajo deseadas. Durante la generación del código en este trabajo se utilizará la posición 5 (G58) por

default. En el mismo bloque ahora se cambia el tipo de entradas de los movimientos a absolutos (G90), es decir, que las movimiento definidos se realicen relativos al sistema de coordenadas de la pieza definidas por el código G58 y se manda la herramienta a la posición origen en el plano XY a través de las cotas X0.0 y Y0.0 respectivamente, recordando que G00 aún está activo. También se define que la velocidad del husillo será de 1300 RPM (S1300). La velocidad del husillo es tomada de los valores de entrada de la herramienta, por lo que varía de acuerdo a la herramienta de corte seleccionada. Finalmente, una vez definida la velocidad de giro del husillo se pone en movimiento (M03).

**Bloque 108.** La posición actual del cabezal se encuentra en el origen del sistema de coordenadas de trabajo definidas por G58 y con una altura (Z) en el origen del sistema de referencia de la máquina. Antes de aproximar el cabezal al origen del sistema de coordenadas de la pieza en Z, es necesario compensar la longitud de la herramienta a través del código G43 precedido del número de herramienta que se utilizará, ya en base a ella se calculará la compensación de la longitud. Una vez realizado este paso, ahora si se aproxima la herramienta al cero pieza llegando hasta Z1.0 y se enciende la bomba del refrigerante con M08.

A este punto la herramienta se encuentra en la posición (0,0,1) relativo al sistema de coordenadas de la pieza y esta lista para iniciar la secuencia del maquinado.

### Segunda parte

A partir de este punto se inicia con la escritura del programa que incluye los movimientos para realizar el maquinado. Para esto considere cuatro trayectorias o segmentos de líneas rectas, Figura 3.10, de una pieza cualquiera que se desean unir en forma de zigzag para tener una trayectoria continua y no cuatro individuales. En la Figura 3.11 se representa la forma en que están guardadas las trayectorias en la matriz y el detalle del contenido de cada uno de sus elementos.

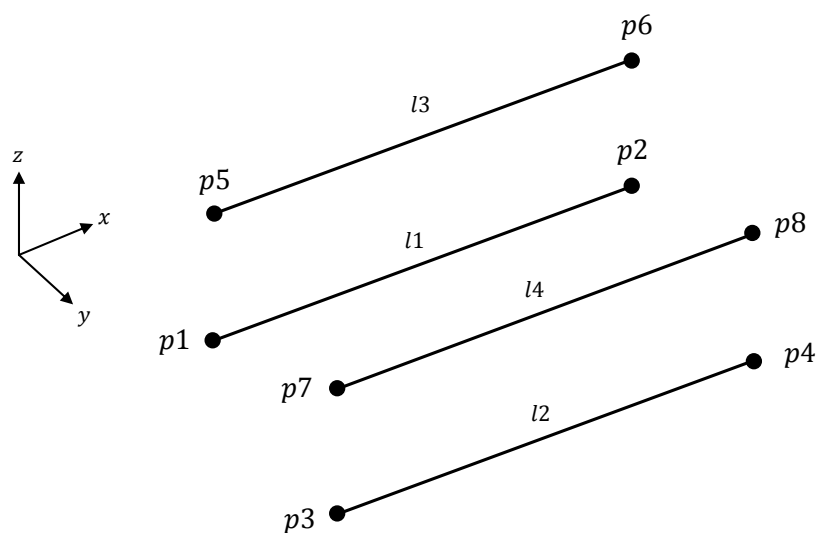


Figura 3.10. Cuatro trayectorias de herramientas.

Posición	Valor	Descripción
$(i0, j0, k0)$	$y1$	Plano de la trayectoria para $l1$ y $l3$
$(i0, j1, k0)$	$y2$	Plano de la trayectoria para $l2$ y $l4$
$(i1, j0, k0)$	3	Niveles de la matriz
$(i1, j1, k0)$	3	Niveles de la matriz
$(i0, j0, k1)$	2	Número de posiciones para $l1$
$(i0, j1, k1)$	2	Número de posiciones para $l2$
$(i0, j0, k2)$	2	Número de posiciones para $l3$
$(i0, j1, k2)$	2	Número de posiciones para $l4$
$(i1, j0, k1)$	$p1$	Posición de $l1$
$(i2, j0, k1)$	$p2$	Posición de $l1$
$(i1, j1, k1)$	$p3$	Posición de $l2$
$(i2, j1, k1)$	$p4$	Posición de $l2$
$(i1, j0, k2)$	$p5$	Posición de $l3$
$(i2, j0, k2)$	$p6$	Posición de $l3$
$(i1, j1, k2)$	$p7$	Posición de $l4$
$(i2, j1, k2)$	$p8$	Posición de $l4$

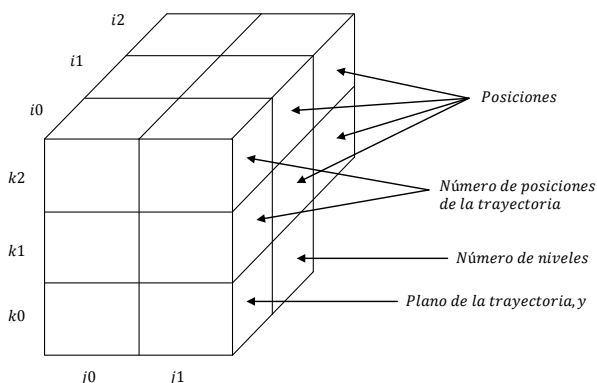


Figura 3.11. Matriz de trayectorias de desbaste.

A partir de la matriz que contiene la información de las trayectorias, Figura 3.11, se realiza el procedimiento para generar trayectorias continuas con una estrategia de maquinado en zigzag, Figura 3.12. El diagrama de flujo de la Figura 3.13 muestra el procedimiento para generar las trayectorias en zigzag, el cual tiene como entrada la matriz (*mat*), que en el caso particular de la Figura 3.10 es la matriz de la Figura 3.11, en donde la variable “*n\_planes*” representa el número de planos, 2 en el caso de análisis. A partir de ella se lee la posición  $(i1, j0, k0)$  para conocer el número de niveles de la matriz. Las trayectorias deben iniciar con las trayectorias con la mayor altura, es decir, de arriba hacia abajo, por lo cual se inicia un ciclo que inicia en el valor de  $(i1, j0, k0)$  menos uno, es decir,  $3 - 1 = 2$  que corresponde al nivel  $k2$  y termina hasta que el nivel sea mayor o igual a 1, es decir,  $k1$ . El procedimiento está formulado para que la primera trayectoria en ser escrita tenga el menor valor de  $y$ , de acuerdo al sistema de coordenadas mostrado. Para esto se introduce un condicional (*pas*) que si es cero, las trayectorias se leen y escriben de  $j0$  a  $jn$  y si tiene un valor de uno se leen y escriben de  $jn$  a  $j0$ . Para leer todas las trayectorias en el nivel  $k2$  se utiliza un ciclo que lee plano por plano, sin embargo, para generar una trayectoria en zigzag, se introduce otro condicional (*sel*) para determinar si las trayectorias se escriben de  $i1$  a  $in$ , o bien, de  $in$  a  $i1$ . Si el valor de *sel* es cero, se escriben de  $i1$  a  $in$  y si es uno de  $in$  a  $i1$ . El valor de *pas* y *sel* inicial es cero, por lo que las trayectorias del nivel  $k2$  son escritas de  $j0$  a  $j1$  y de  $i1$  a  $in$ , es decir, las primeras posiciones escritas son  $p1$  y  $p2$ . Escrita la primera trayectoria ahora *sel* tiene un valor uno, por lo que la siguiente trayectorias se escribe de  $in$  a  $i1$ , es decir las posiciones  $p3$  y  $p4$  y *sel* cambia de uno a cero. Al final de que se leyeron todas las trayectorias del nivel  $k2$ , el valor de *pas* cambia de cero a uno. Entonces, ahora el nivel  $k1$  debe iniciar a escribirse de  $jn$  a  $j0$ . El valor de *sel* tiene el valor con el que termino de escribirse  $k2$ , es decir, cero, lo cual significa que la trayectoria  $jn$  se escribe de  $i1$  a  $in$ , es decir,  $p7$  y  $p8$ . El procedimiento se repite hasta terminar de leer la matriz completa. Para el caso del ejemplo analizado se tiene el resultado mostrado en la Figura 3.12.



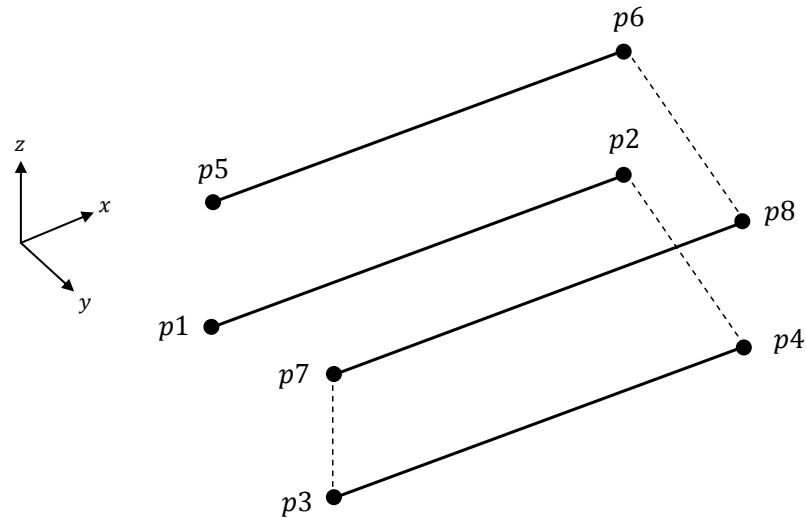


Figura 3.12. Trayectorias finales de desbaste.

Para la escritura de las trayectorias además de solo escribir las coordenadas de las posiciones de la herramienta, se debe incluir el código adecuado para que el control interprete adecuadamente lo que se desea hacer. La estructura del bloque se forma con el número de bloque (N). La secuencia debe iniciar con el número 100 y no debe ser mayor a 9999. Por esta razón dentro del procedimiento de escritura de trayectorias de herramienta de la Figura 3.13 se incluye la condición de que si el número de bloque es mayor a 9997, entonces se reinicie en 100. Los incrementos son de dos en dos. El tipo de interpolación utilizada para las trayectorias es solamente lineal, por lo que después de cada número de bloque le sigue un código G01 y las coordenadas de posición del punto. El formato de cada bloque es:

N... G... X... Y... Z...

Además de esto, siempre se guarda la posición anterior escrita que junto con la actual, determinan la longitud del segmento entre estas dos posiciones. Esta longitud se va sumando para al finalizar determinar la longitud de la trayectoria total. También se incluye un contador para el número de segmento. Esta información es complementaria y se presenta al usuario dentro de un reporte al finalizar el proceso, la descripción de estas opciones se presenta en el Capítulo 4.

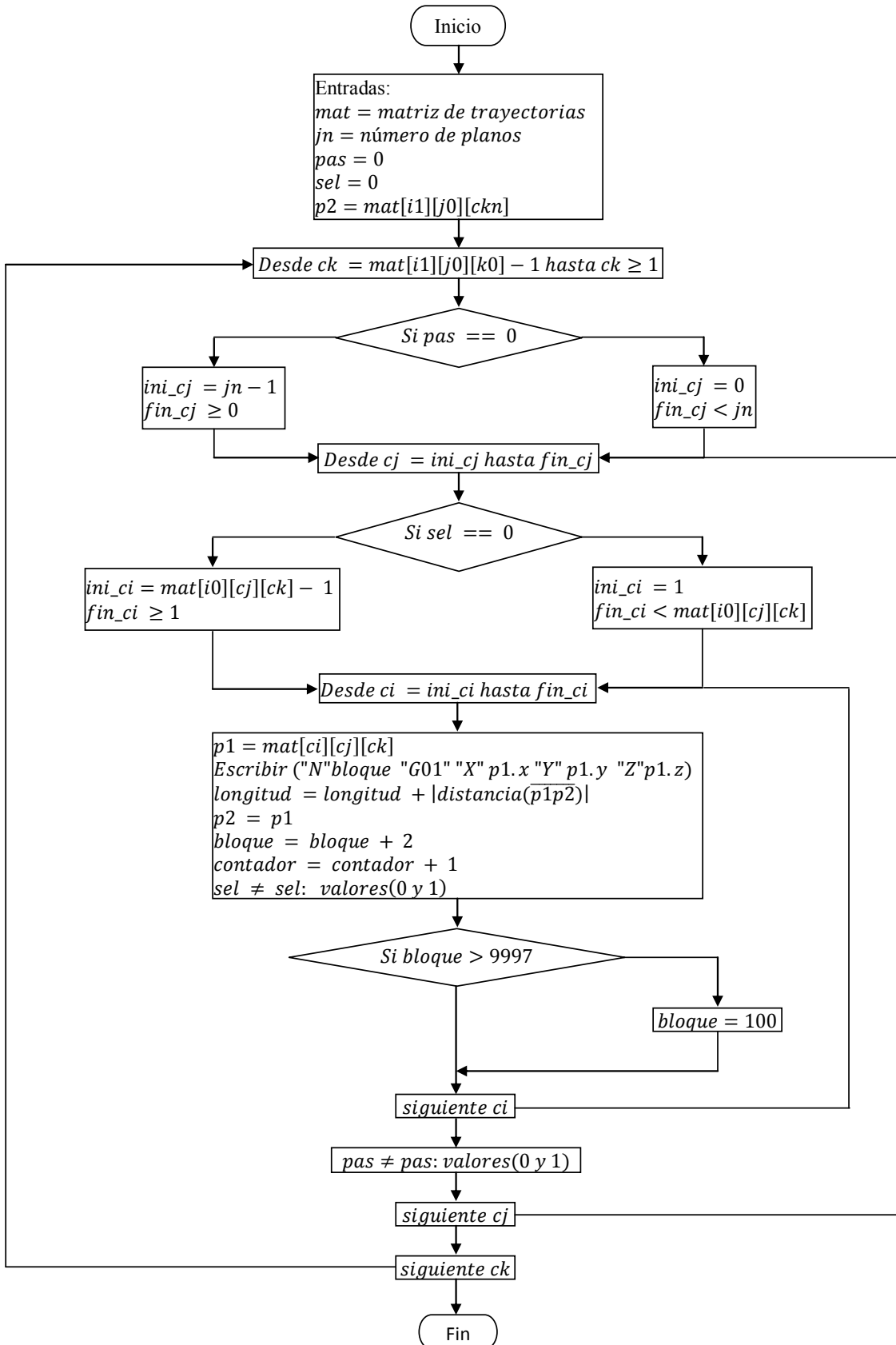


Figura 3.13. Diagrama de flujo para la escritura de la trayectorias de herramienta.

Ahora ya se tiene escrito el encabezado del programa y el cuerpo del programa. Por ejemplo, el código que hasta ahora se tendría para una pieza cualquiera sería el mostrado en la Figura 3.14.

```

%
O1234

(                               **HWUTestBedApp products**                               )
(                               MACHINING system                                       )
( ----- JOB INFORMATION ----- )
(Name of component:             Jelly_final.sat)
(File location:                 Settings\Administrador\Escritorio\Jelly_final.sat)
(NC file location:              C:\HwTestBedApp\Temp\Rough_CNC_code.txt)
(Date:                          16/1/2013 (DD/MM/YY))
(Time:                          23:57:51 (GMT))

N100 G21
N102 G00 G17 G40 G49 G80 G94
N104 G91 G28 Z0.0
N106 G00 G58 G90 X0.0 Y0.0 S1300 M03
N108 G43 H1 Z1.0 M08
N112 G01 X-40.717 Y72.419 Z46.900 F200.00
N114 G01 X40.317 Y72.419 Z46.900
N116 G01 X40.317 Y65.819 Z46.900
N118 G00 X-40.717 Y65.819 Z46.900
N120 G00 X-56.717 Y59.219 Z46.900
N122 G00 X56.317 Y59.219 Z46.900
N...
N...
N...
N...
N...
N6916 G01 X41.300 Y-66.181 Z0.700
N6918 G00 X-41.700 Y-66.181 Z0.700
N6920 G00 X-41.700 Y-72.781 Z0.700
N6922 G00 X41.300 Y-72.781 Z0.700
N6924 G01 X41.300 Y-72.781 Z25.700
    
```

Figura 3.14. Programa CNC.

### 3.4.3 Fin del programa

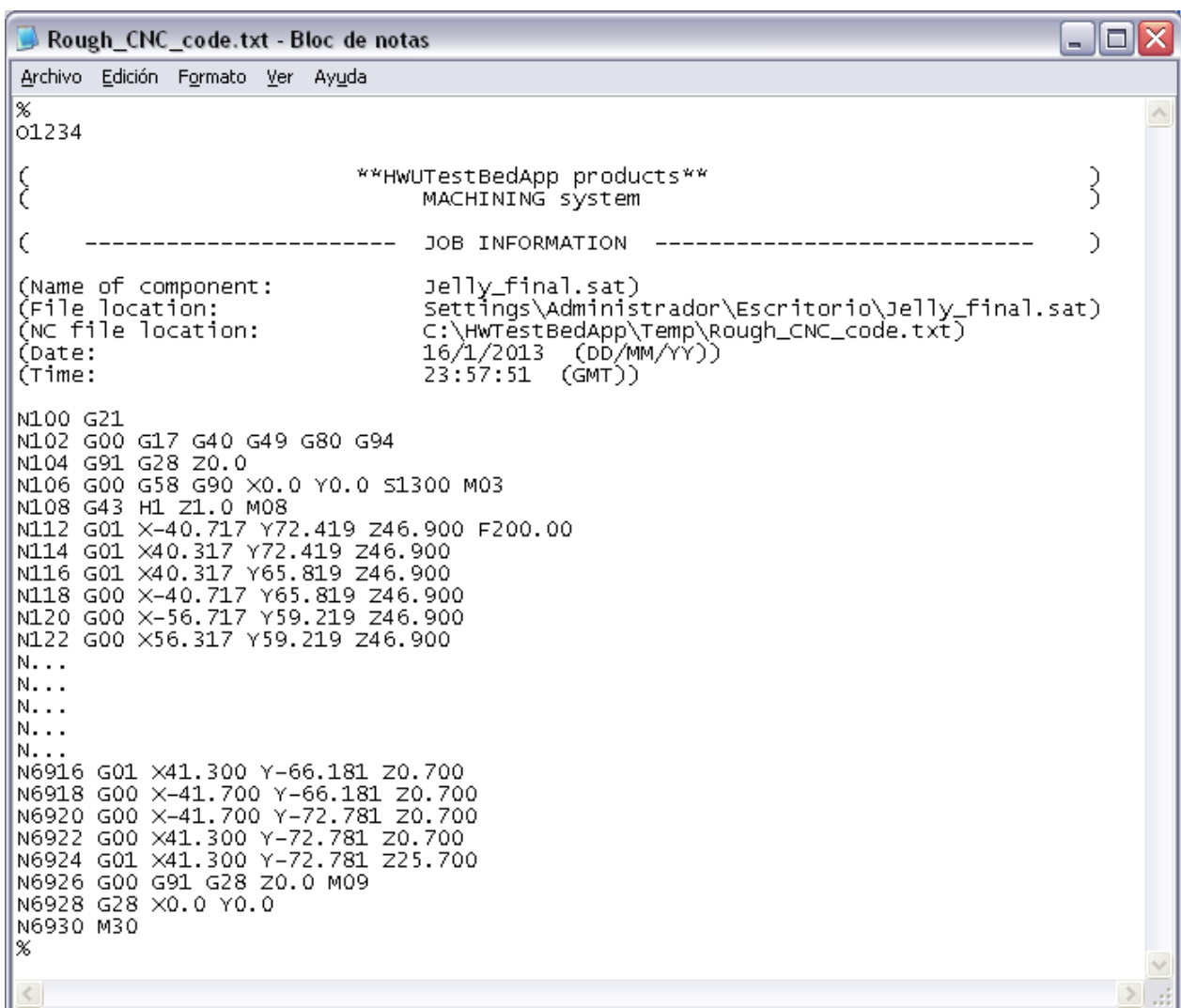
Finalmente una vez que se escribieron las trayectorias para las herramientas, es necesario terminar el código de una forma adecuada y no dejar el sistema en la última posición de las trayectorias. Para esto se le añaden tres bloques más al final de la escritura de las trayectorias para finalizar el programa.

**Antepenúltimo bloque.** En este bloque se cambia de la modalidad de coordenadas absolutas a incrementales (G91) para enviar el cabezal al sistema de referencia de la máquina (G28). Es decir, a partir del último punto definido en el cuerpo del programa se define un punto intermedio con la misma posición en el plano XY y una altura de Z0 relativa al sistema de referencia de la máquina (no de la pieza), para llevar el cabezal a una posición segura. Este movimiento lo realiza con un movimiento rápido G00 que cancela el movimiento lineal con velocidad programada G01. Una vez estando en esta posición apaga el motor de la bomba de refrigerante con M09.

**Penúltimo bloque.** El cabezal del sistema se encuentra con la altura del origen de sistema de coordenadas, sin embargo, en el plano XY se encuentra en la última posición ejecutada. Para enviarlo al origen del sistema de referencia en los dos ejes restantes, se programa un G28 con cotas X0.0 y Y0.0.

**Último bloque.** Para finalizar se utiliza el código M30, que regresa al inicio del programa y apaga los motores.

Al final de todos los bloques se cierra con el símbolo de porcentaje (%). Finalmente con este fin de programa se tiene el programa CNC completo. En la Figura 3.15 se muestra como queda el programa CNC final y listo para ser enviado al sistema de control de una máquina CNC con control Fanuc.



```
%
O1234

(
    **HWUTestBedApp products**
    MACHINING system
)

(
    ----- JOB INFORMATION -----
)

(Name of component:      Jelly_final.sat)
(File location:          Settings\Administrador\Escritorio\Jelly_final.sat)
(NC file location:       C:\HwTestBedApp\Temp\Rough_CNC_code.txt)
(Date:                   16/1/2013 (DD/MM/YY))
(Time:                   23:57:51 (GMT))

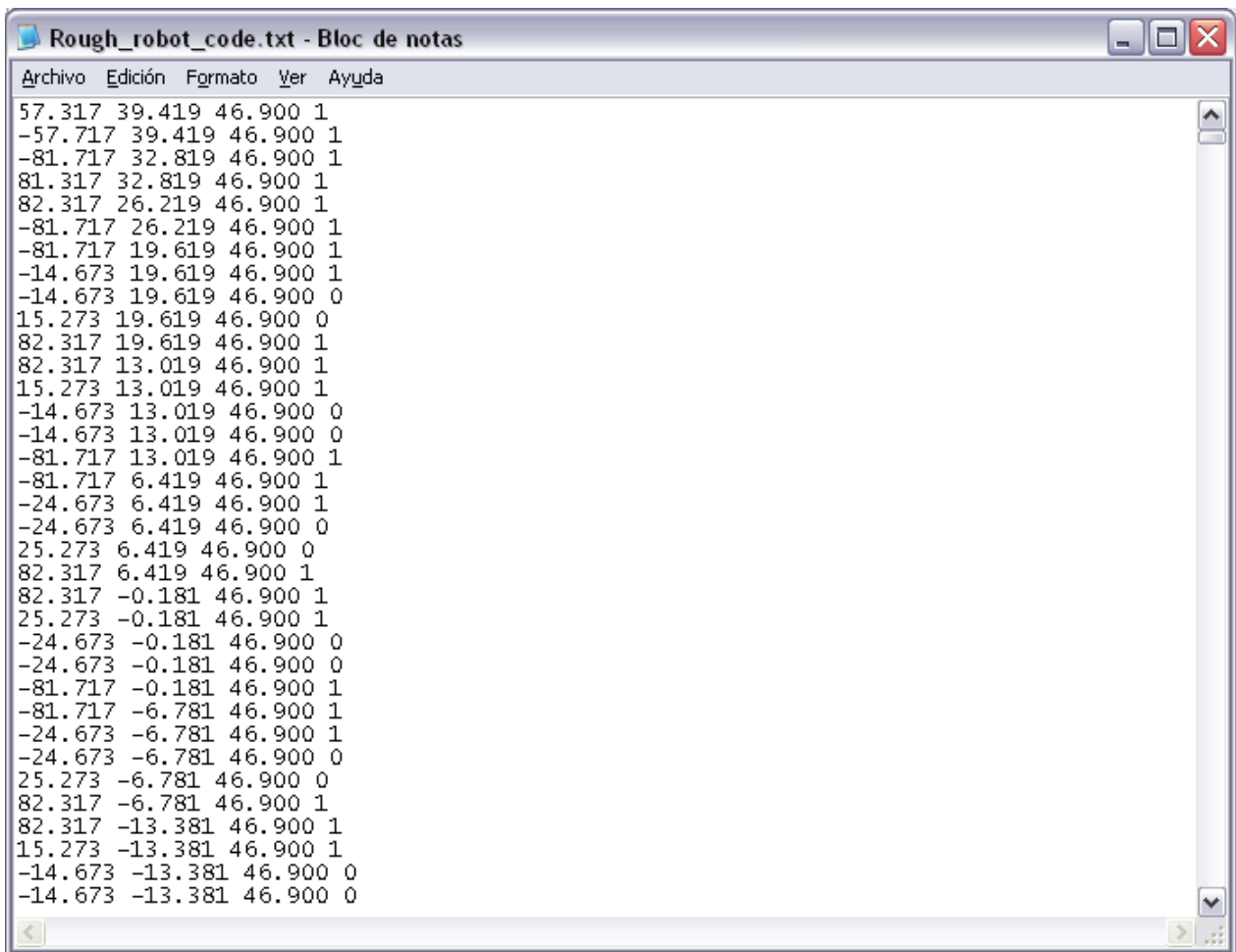
N100 G21
N102 G00 G17 G40 G49 G80 G94
N104 G91 G28 Z0.0
N106 G00 G58 G90 X0.0 Y0.0 S1300 M03
N108 G43 H1 Z1.0 M08
N112 G01 X-40.717 Y72.419 Z46.900 F200.00
N114 G01 X40.317 Y72.419 Z46.900
N116 G01 X40.317 Y65.819 Z46.900
N118 G00 X-40.717 Y65.819 Z46.900
N120 G00 X-56.717 Y59.219 Z46.900
N122 G00 X56.317 Y59.219 Z46.900
N...
N...
N...
N...
N...
N6916 G01 X41.300 Y-66.181 Z0.700
N6918 G00 X-41.700 Y-66.181 Z0.700
N6920 G00 X-41.700 Y-72.781 Z0.700
N6922 G00 X41.300 Y-72.781 Z0.700
N6924 G01 X41.300 Y-72.781 Z25.700
N6926 G00 G91 G28 Z0.0 M09
N6928 G28 X0.0 Y0.0
N6930 M30
%
```

Figura 3.15. Programa CNC final.

### 3.5 Generación de código de maquinado para robot y/o propósito general

El código CNC, como su nombre lo indica solo puede ser leído por sistemas que utilizan este lenguaje. Sin embargo, el sistema también genera un código que incluye solo las coordenadas de las posiciones de la herramienta y un número adicional para indicar si el movimiento se debe realizar con la velocidad de avance programada o bien un movimiento rápido, Figura 3.16.

El algoritmo utilizado para la escritura de este archivo es el mismo que el utilizado para generar un código CNC, con la diferencia de que cuando se escriben las coordenadas en el archivo, los prefijos (códigos G) se omiten. A través de este código se puede controlar un robot para que siga las trayectorias definidas. Aunque un robot generalmente tiene más de tres ejes, en este caso se considera que la herramienta permanece siempre vertical. Además el código también puede utilizarse para sistemas cartesianos de tres ejes, que no necesariamente son controlados por códigos G y M.



```
Rough_robot_code.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
57.317 39.419 46.900 1
-57.717 39.419 46.900 1
-81.717 32.819 46.900 1
81.317 32.819 46.900 1
82.317 26.219 46.900 1
-81.717 26.219 46.900 1
-81.717 19.619 46.900 1
-14.673 19.619 46.900 1
-14.673 19.619 46.900 0
15.273 19.619 46.900 0
82.317 19.619 46.900 1
82.317 13.019 46.900 1
15.273 13.019 46.900 1
-14.673 13.019 46.900 0
-14.673 13.019 46.900 0
-81.717 13.019 46.900 1
-81.717 6.419 46.900 1
-24.673 6.419 46.900 1
-24.673 6.419 46.900 0
25.273 6.419 46.900 0
82.317 6.419 46.900 1
82.317 -0.181 46.900 1
25.273 -0.181 46.900 1
-24.673 -0.181 46.900 0
-24.673 -0.181 46.900 0
-81.717 -0.181 46.900 1
-81.717 -6.781 46.900 1
-24.673 -6.781 46.900 1
-24.673 -6.781 46.900 0
25.273 -6.781 46.900 0
82.317 -6.781 46.900 1
82.317 -13.381 46.900 1
15.273 -13.381 46.900 1
-14.673 -13.381 46.900 0
-14.673 -13.381 46.900 0
```

Figura 3.16. Código de maquinado para robot y/o propósito general.

# Capítulo 4

## Implementación

La implementación de los algoritmos para la generación de trayectorias de herramienta y generación de código o instrucciones de maquinado se presenta y describe en este Capítulo.

### 4.1 HWTestBedApp

HWTestBedApp es una plataforma para el desarrollo y prueba de algoritmos con fines de investigación desarrollada por investigadores de Heriot-Watt University en Edimburgo. Está programada en Visual C++ y utiliza ACIS® geometric modeling kernel [61] para desarrollar las operaciones geométricas requeridas. El programa solo acepta archivos nativos de ACIS, es decir, archivos con extensión \*.SAT que pueden ser creados con ACIS o cualquier otro software CAD que soporte archivos de ACIS. La Figura 4.1 muestra la interfaz gráfica del programa, que como se puede observar es muy similar a un sistema CAD comercial. En la parte superior se muestra la barra de menús principal, y una barra de herramientas para la manipulación de modelos sólidos 3D. En la parte izquierda se encuentra una sección de navegación y en la parte central se encuentra el área gráfica. Las funciones requeridas para el sistema están distribuidas en forma de menús desplegables, barras de herramientas y diálogos. Una descripción más detallada de las funciones del sistema se puede encontrar en [2].

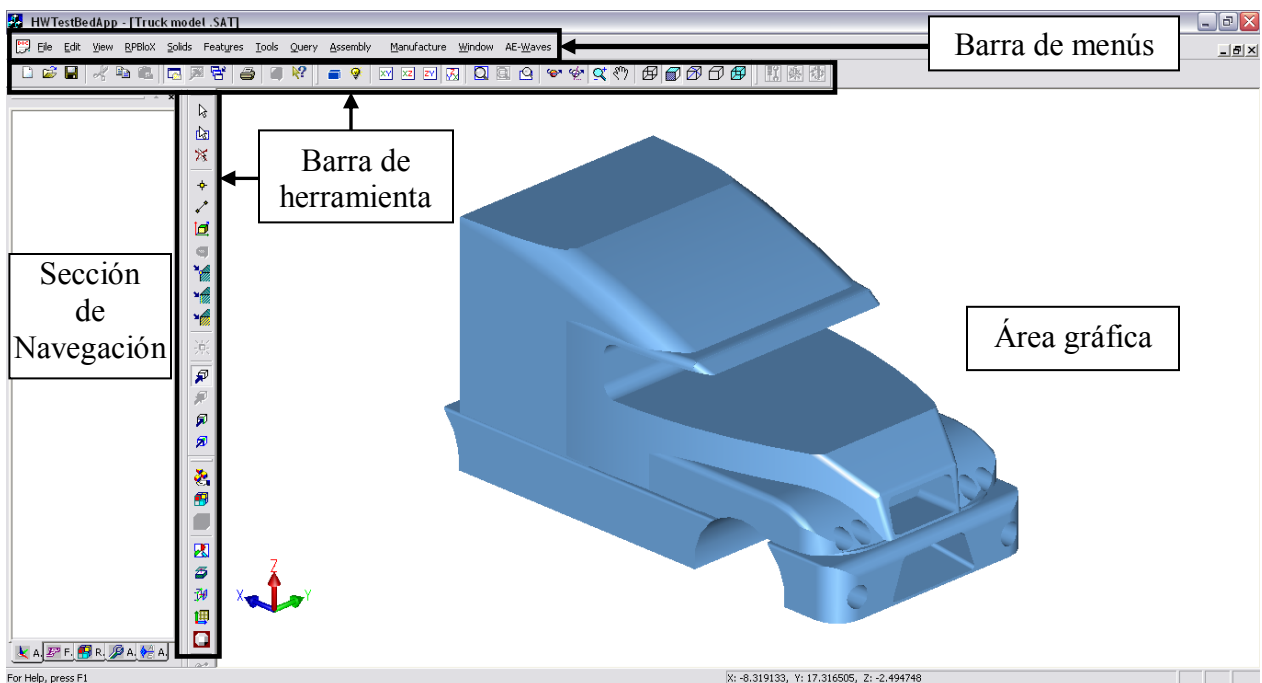


Figura 4.1. Interfaz gráfica de la plataforma HWTestBedApp.

Para la implementación de los algoritmos y funciones necesarios para la generación de las trayectorias de la herramienta se añadió un nuevo menú dentro de la barra de menús. El menú tiene la etiqueta “Machining” (maquinado) como se muestra en la Figura 4.2. Las funciones se muestran en forma desplegable al hacer clic sobre dicho menú. Las funciones se encuentran ordenadas de acuerdo al procedimiento de maquinado (Figura 2.2), esto con el fin de que el procedimiento sea sistemático y más simple. La descripción detallada de cada una de las opciones del menú se presenta en las siguientes secciones.

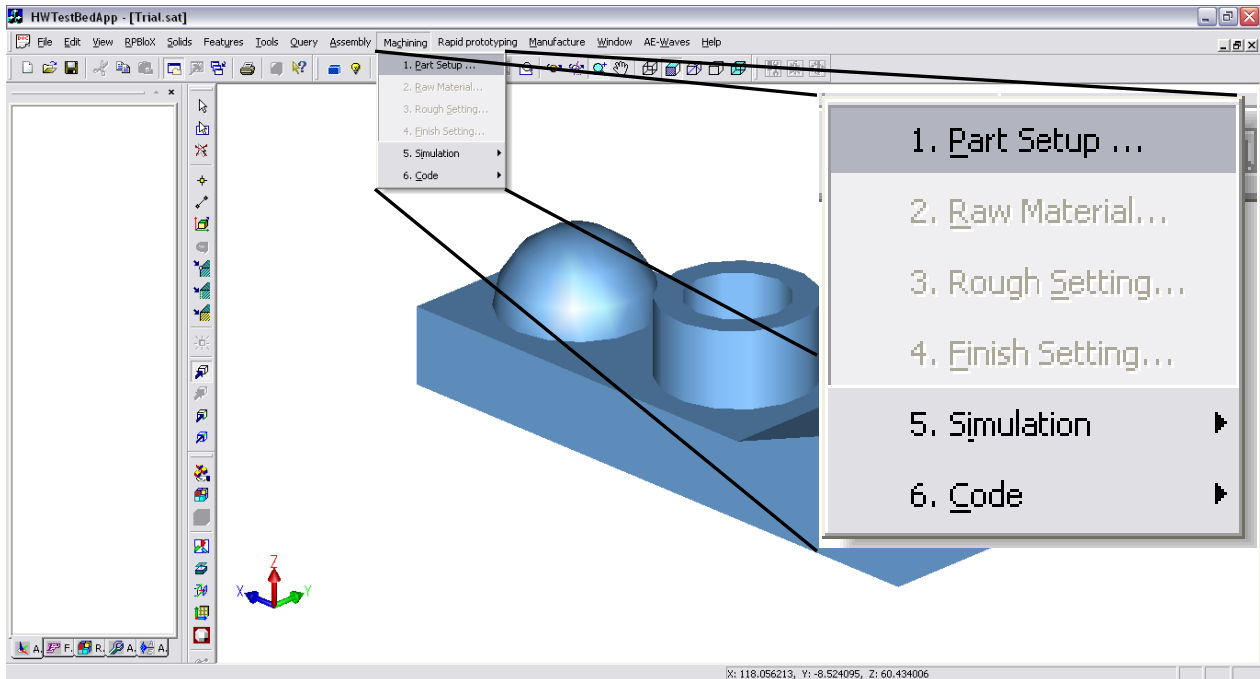


Figura 4.2. Opciones del menú de maquinado “Machining”.

#### 4.2 Configuración de la pieza (Part Setup)

La función Part Setup es la opción que permite configurar la orientación de la parte a maquinar. Cuando el modelo se genera en cualquier sistema CAD y se importa a este sistema, la posición y orientación del sistema donde se creó permanece. Sin embargo, la configuración del archivo original no siempre es el apropiado para la generación de las trayectorias, así cuando se abre un archivo CAD en el sistema, antes de que se visualice en pantalla se calcula su posición respecto del sistema de coordenadas y es modificada para que el vértice inferior izquierdo del bounding box del modelo coincida con el origen del sistema.

Al hacer clic sobre la pestaña “Part Setup” del menú “Machining” aparece un mensaje, Figura 4.3, el cual notifica que la dirección de maquinado solo está disponible en la dirección del eje  $X$ , además de que la superficie a maquinado debe estar hacia arriba (eje  $Z$ ). Cuando se hace clic en “Aceptar” aparece un cuadro de diálogo, Figura 4.4, mediante el cual se puede orientar el modelo respecto a los tres ejes del sistema cartesiano. Al seleccionar una de las opciones de la izquierda (radio botones) en el cuadro de la Figura 4.4, se está seleccionando el eje de rotación y el cuadro de texto a su derecha se activa para permitir introducir el valor del ángulo de rotación en grados. Cuando se hace clic en “Apply” u “OK” el modelo en pantalla es asignado a una variable y después se ejecuta una función que calcula el punto medio del bounding box de dicho modelo a

partir del cual se le aplica una rotación en el eje y con el ángulo especificado en el cuadro de diálogo, para después actualizar su nueva orientación en pantalla.

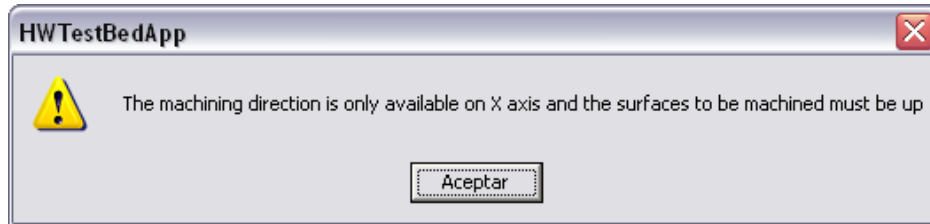


Figura 4.3. Diálogo de notificación.



Figura 4.4. Orientación del modelo.

Si se observa la Figura 4.2, la única opción de la pestaña “Machining” que está activa es “Part Setup” esto debido a que necesariamente se debe configurar la parte antes de realizar cualquier operación sobre ella. Una vez que se cierra el diálogo de “Part Setup” se activan las opciones “Raw Material” y “Finish Setting”. La opción “Rough Setting” no se activa porque es necesario definir la materia prima para poder configurar el maquinado de desbaste.

### 4.3 Materia prima (Raw Material)

Para definir la materia prima se implementó la opción “Raw Material”. Esta opción está formulada para definir los dos tipos de materia prima, materias primas de forma rectangular y de forma aproximada. La Figura 4.5 muestra el cuadro de diálogo de esta opción. En la parte superior del diálogo se observa un grupo de opciones con el título “Raw material”, en él se pueden observar las opciones mencionadas “Rectangular shape” y “File”. La primera opción se refiere a la definición de materias primas con forma rectangular y la segunda incluye cualquier forma de materia prima y se define a partir de un archivo CAD.

#### 4.3.1 Forma rectangular (Rectangular Shape)

La opción materia prima rectangular aparece activa por default. Cuando esta opción está seleccionada los cuadros de texto de los grupos de opciones “Dimension” y “Reference point” del lado izquierdo del cuadro de diálogo se encuentran activos. La forma rectangular se define mediante las dimensiones del rectángulo en las direcciones  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  y la posición de su punto de referencia en el sistema global de coordenadas. Del lado derecho del cuadro de diálogo se observan las figuras de dos formas rectangulares. El rectángulo de la parte inferior representa el bounding box del modelo en pantalla (modelo original), y el superior representa el bounding box definido para la materia prima. Por default el tamaño del modelo y de la materia prima, así como sus puntos de referencia son iguales. Estos valores propuestos garantizan el mínimo valor posible



de la materia prima si es ubicada en la misma posición del modelo original. Sin embargo, el usuario puede modificar los valores de la materia prima a través de los cuadros de texto del lado izquierdo.

Cuando la opción “Rectangular shape” se encuentra seleccionada, los botones “Load...” “Orientation...” y “Part zero...” se muestran inactivos. Los dos primeros únicamente se activan si se selecciona la opción “File” y el tercero se activa al definir la materia prima rectangular. La Figura 4.6 muestra el cuadro de diálogo para definir el cero pieza (Part zero...) u origen del sistema de coordenadas, a través de la distancia en las direcciones X, Y y Z relativas al punto de referencia en la materia prima. La Figura 4.7 muestra el modelo original y una materia prima de forma rectangular configurada a través de las opciones presentadas.

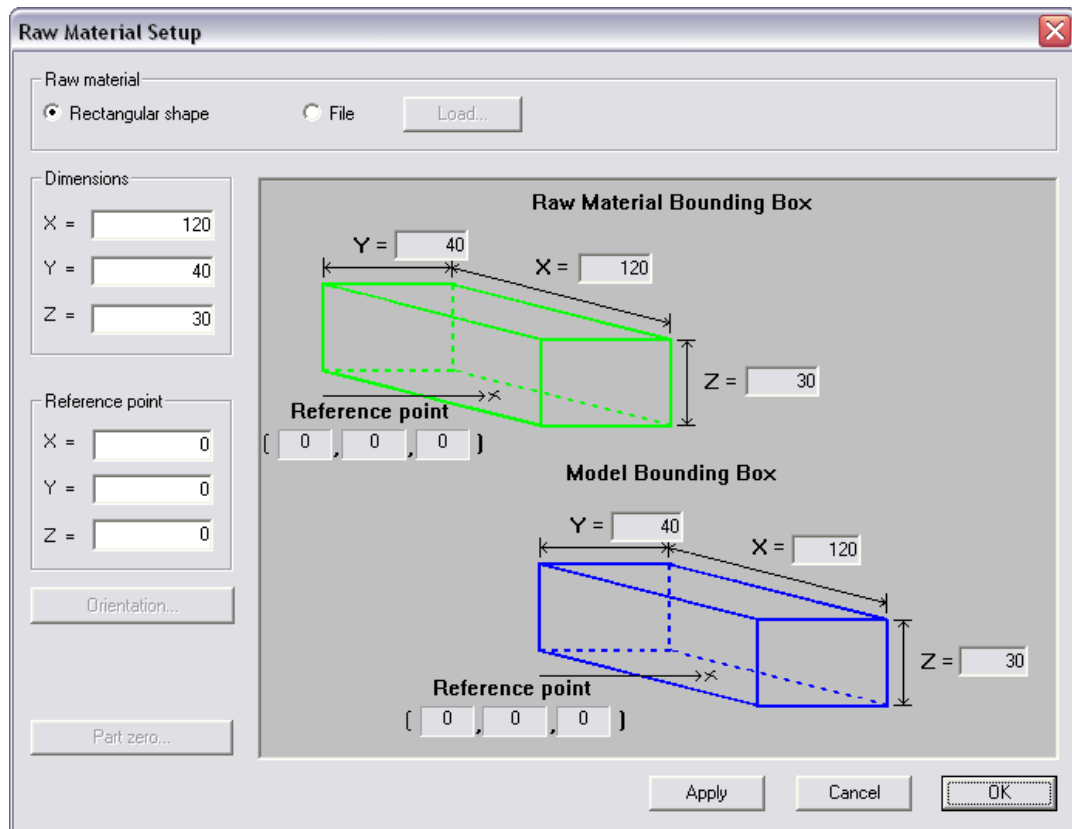


Figura 4.5. Definición de la materia prima (forma rectangular).

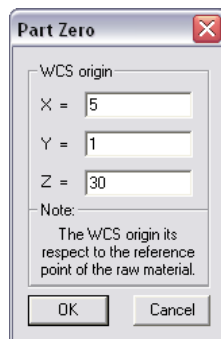


Figura 4.6. Origen del sistema de coordenadas.

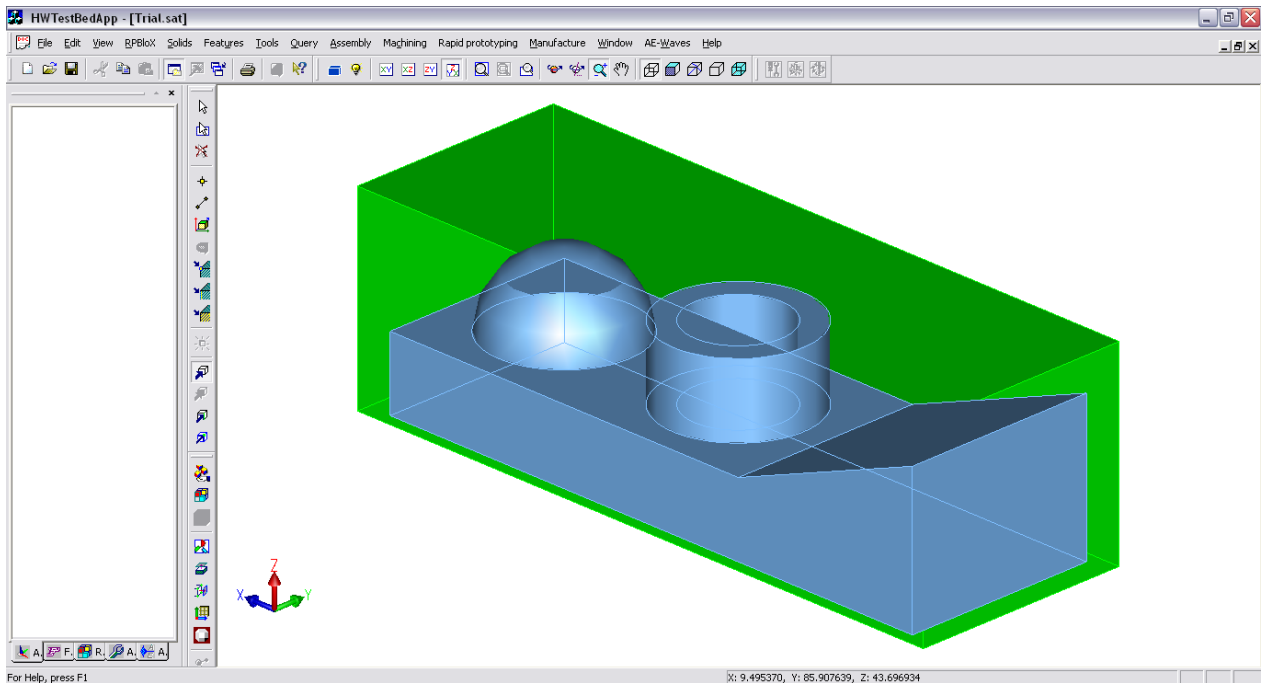


Figura 4.7. Materia prima de forma rectangular.

### 4.3.2 Archivo (File)

La opción “File” sirve para definir una materia prima desde un archivo CAD. La apariencia del cuadro de diálogo ahora se encuentra como lo muestra la imagen de la Figura 4.8. Cuando se selecciona esta opción se activa el botón “Load...” el cual abre un cuadro de diálogo que permite seleccionar el archivo a partir del cual se definirá la materia prima, Figura 4.9. Después de seleccionar el archivo y hacer clic en el botón “Abrir”, y antes de que se visualice en pantalla el modelo seleccionado, se calcula el bounding box de dicho modelo así como su punto de referencia a partir del cual se le aplica una traslación a la posición del punto de referencia del modelo original para finalmente mostrarlo en pantalla. Ahora las dimensiones del bounding box del modelo de la materia prima y la posición de su punto de referencia se actualizan en pantalla en sus respectivos cuadros de texto. El usuario es el encargado de definir la posición y orientación final de la materia prima.

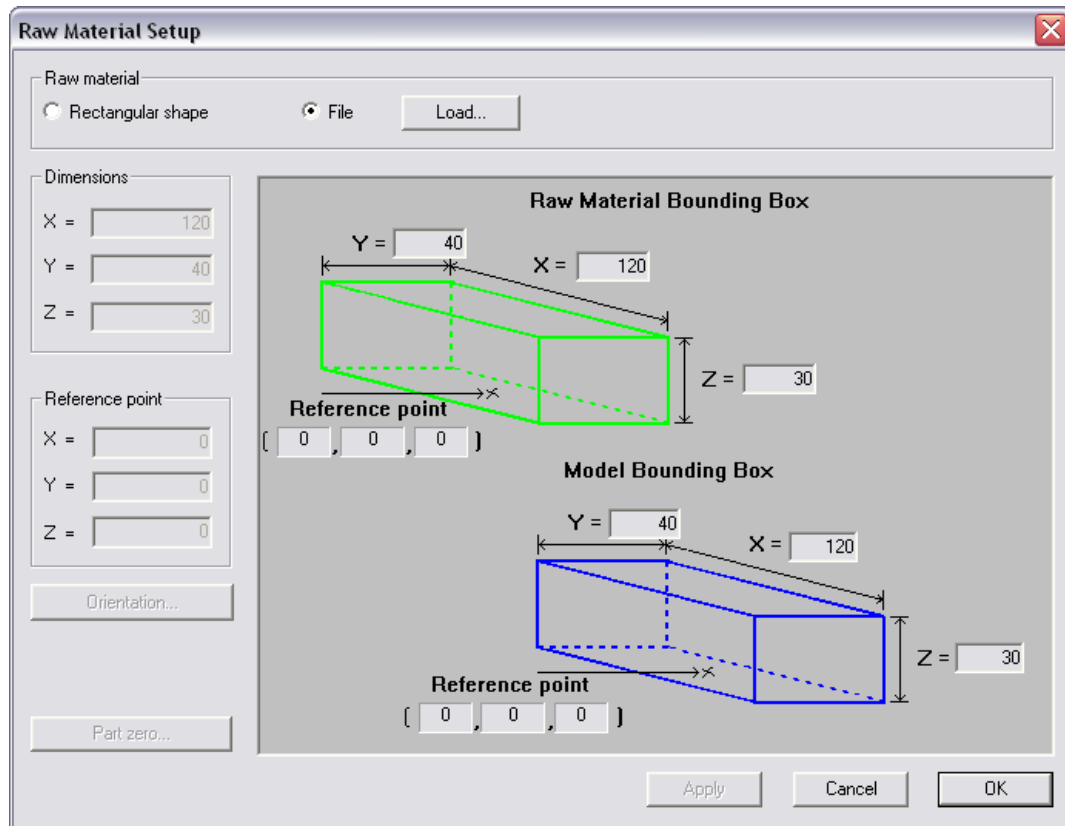


Figura 4.8. Materia prima de forma aproximada.

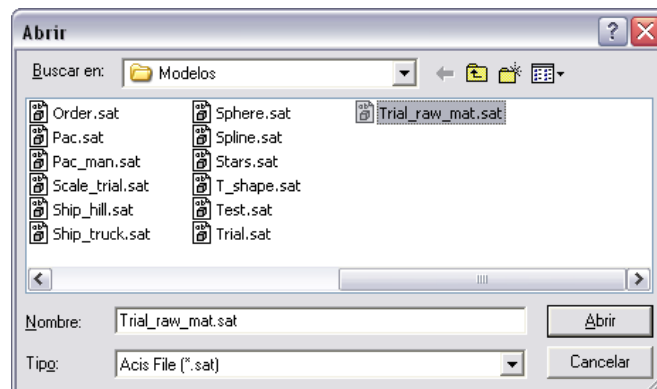


Figura 4.9. Materia prima desde archivo.

Cuando la materia prima se muestra en pantalla, los botones “Orientation...”, “Part Zero” y el grupo “Reference point” se activan ya que dependen del modelo de dicha materia. El botón “Orientation...” tiene como objetivo orientar la materia prima, esto a través del mismo cuadro de diálogo de “Part Setup”, sección 4.2. También el grupo “Reference point” cambia de inactivo a activo, esto para permitir posicionar correctamente el modelo de la materia prima en el espacio cartesiano. Un ejemplo de una materia prima aproximada definida mediante las opciones descritas se muestra en la Figura 4.10.

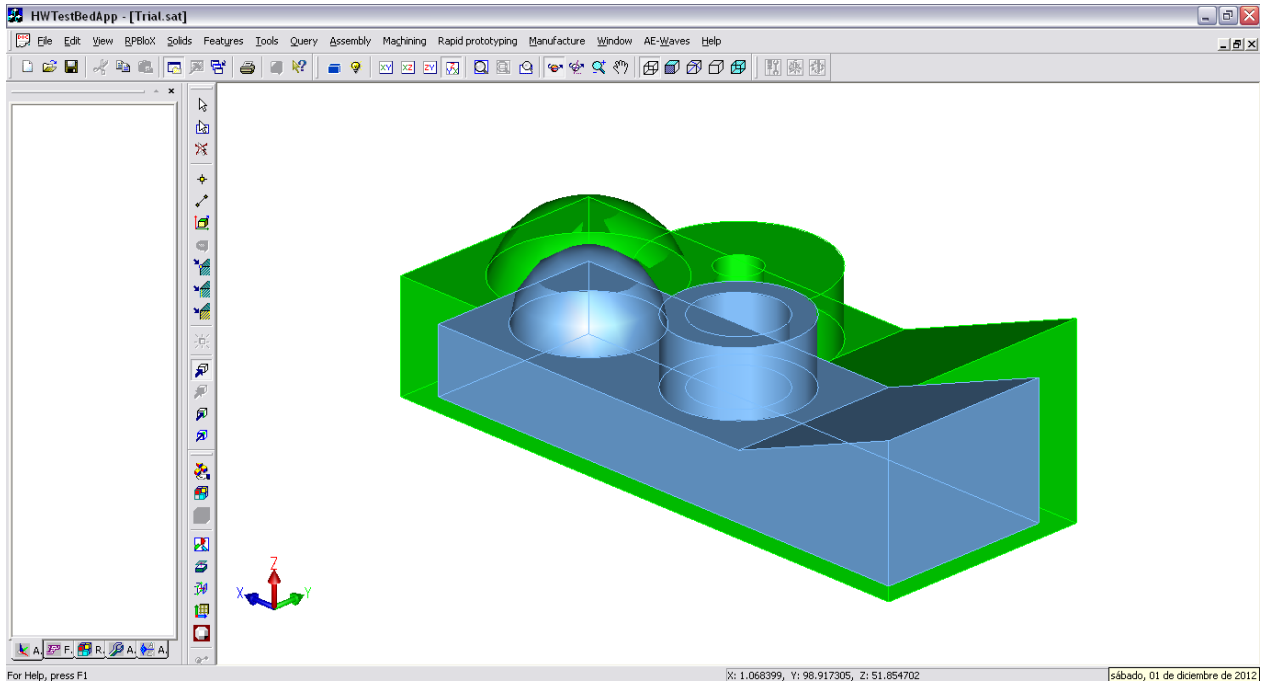


Figura 4.10. Materia prima desde un archivo (forma aproximada).

#### 4.4 Configuración del desbaste y acabado (Rough Setting, Finish Setting)

Al definir la materia prima se activa la opción “Rough Setting” mientras que la opción “Finish Setting” esta activada desde que se configura el modelo en “Part Setup”. En ambas opciones se configuran los parámetros del maquinado. La Figura 4.11 muestra el cuadro de diálogo para la configuración del maquinado. En la parte superior del cuadro se tienen dos pestañas “Tooling System” y “Machining Parameters”.

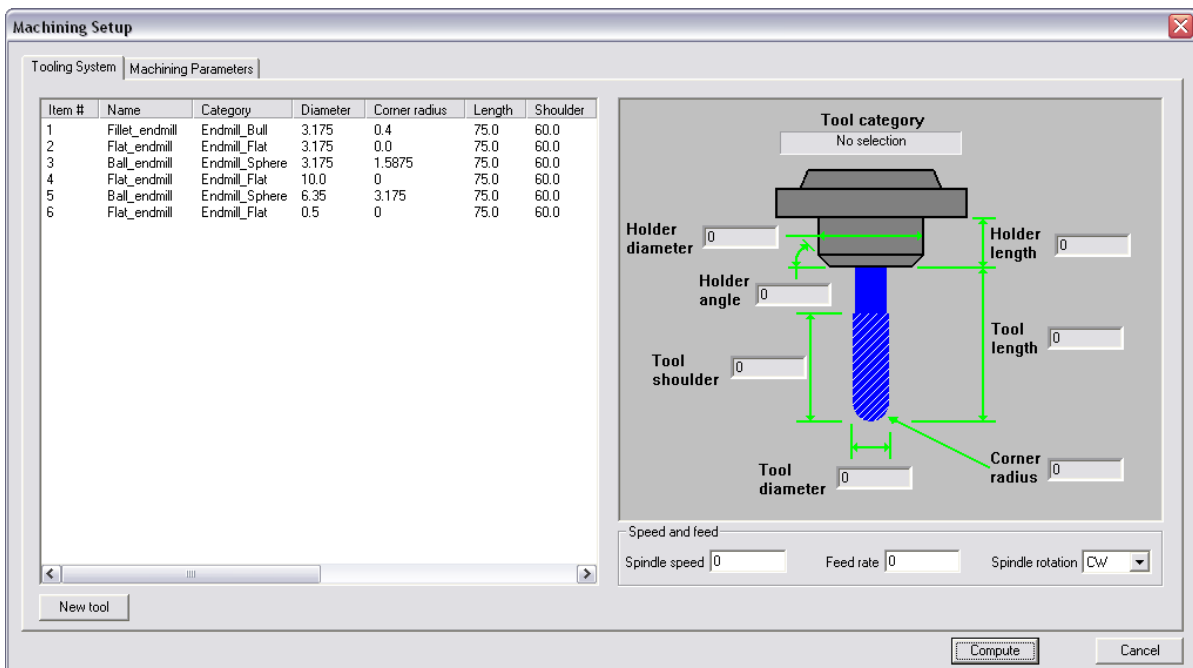


Figura 4.11. Configuración del maquinado.

#### 4.4.1 Sistema de herramientas (Tooling System)

En esta opción se configuran las herramientas y su sistema de sujeción o portaherramientas. Del lado izquierdo del cuadro mostrado en la Figura 4.11 se observa una lista de datos que representa los datos de las diferentes herramientas disponibles por default clasificadas en varios parámetros. Cuando una de ellas puede ser seleccionada y los valores se actualizan en la figura de lado derecho del cuadro de diálogo para poder visualizar los parámetros seleccionados. En la parte inferior de la figura de la herramienta se observa un grupo de opciones con el título “Speed and feed” que también se actualizan al seleccionar una de las herramientas. Los datos de este grupo son “Spindle speed” que es la velocidad de giro del husillo o de la herramienta y “Feed rate” que es el avance de la herramienta. La tercera opción es un combo box donde se selecciona la dirección de giro del husillo, cuenta con dos opciones “CW” giro en sentido horario o “CCW” giro en sentido anti-horario.

Aunque se tienen diferentes herramienta definidas, puede ser que algunos de los parámetros no sean los que desea el usuario o bien la herramienta completa no es la adecuada. Para ello se tiene el botón “New tool” para definir una nueva herramienta. Cuando se hace clic en el botón “New tool” aparece un cuadro de diálogo como el mostrado en la Figura 4.12. El cuadro está dividido en tres grupos de opciones, el primero es para definir la herramienta, el segundo para el portaherramientas y el tercero para los parámetros de la herramienta como velocidades y avances.

Figura 4.12. Definición de nueva herramienta.

#### Tool (Herramienta)

En este grupo de datos se define todo lo relacionado con la herramienta:

- **Name:** nombre de la herramienta.
- **Category:** categoría a la que pertenece la herramienta. Las tres opciones disponibles son:
  - Endmill\_Bull: herramientas de filete
  - Endmill\_Flat: herramientas planas
  - Endmill\_Sphere: herramientas de punta de bola
- **Diameter:** diámetro de la herramienta.
- **Corner radius:** radio de la herramienta en la sección de corte. Para herramientas de filete este radio es mayor a cero y menor al radio de la herramienta. En herramientas planas el

radio es cero y para herramientas de punta de bola el radio es igual al radio de la herramienta.

- **Length:** longitud de la herramienta.
- **Shoulder:** longitud de los filos de corte.
- **# Flutes:** número de filos de la herramienta.
- **Item #:** número de identificación de la herramienta.

### Holder (Portaherramientas)

El holder es el sistema de sujeción de la herramienta, y aunque existen diferentes formas aquí se considera solo una, Figura 4.11, con la cual se pretende pueda adaptarse a las diferentes formas existentes. Los datos para el portaherramientas se explican a continuación:

- **Diameter:** diámetro superior del portaherramientas.
- **Length:** longitud del portaherramientas.
- **Angle:** ángulo del portaherramienta  $\gamma$ .

### Speed and feed (Velocidad y avance)

A partir de los datos definidos para la herramienta y de algunos otros parámetros se puede calcular la velocidad de giro del husillo y la velocidad de avance. Para ello se utiliza el botón llamado “Calculate speed and feed”. La ecuación que se utiliza para el cálculo de la velocidad del husillo es la ecuación (1.1) donde  $\pi$  es una constante, es decir, la ecuación solamente depende del diámetro de la herramienta ( $D$ ) y de la velocidad de corte ( $v$ ) que depende del material que se va a maquinar. El valor para la velocidad de corte para el aluminio utilizando herramientas de carburo es de  $1000 \text{ m/min}$  [62].

El avance de la herramienta se calcula a partir de la ecuación (1.3) y depende de la velocidad del husillo ( $N$ ), del número de filos de la herramienta ( $n$ ) y el avance por diente ( $fz$ ) de la herramienta en ese material de acuerdo al diámetro de la herramienta y el material de la misma. La Tabla 4.1 muestra los valores de avance por diente utilizando herramienta de carburo en aluminio.

$D(mm)$	1	2	3	3.175	4	4.76	5	6	6.35	8
$fz(mm/diente)$	0.013	0.032	0.039	0.040	0.045	0.046	0.046	0.055	0.056	0.063
$D(mm)$	9.525	10	12	12.7	15.875	16	19.05	20	25	
$fz(mm/diente)$	0.069	0.071	0.077	0.079	0.089	0.089	0.097	0.1	0.11	

Tabla 4.1. Avances de herramienta para aluminio, utilizando herramientas de carburo.

Los valores tanto de velocidad de giro del husillo como del avance en el grupo “Speed ad feed” se pueden definir manualmente por parte del usuario. Al crear una nueva herramienta ésta es añadida a la lista del cuadro de diálogo principal para que pueda ser seleccionada y se actualicen los valores en la figura. Además de esto, al hacer clic en “Compute” el sistema preguntará si se desea guardar la herramienta creada para futuros usos a través del cuadro de dialogo mostrado en la Figura 4.13, siempre y cuando se haya definido una nueva herramienta. De esta manera el usuario puede tener disponibles las herramientas personalizadas sin necesidad de crearlas cada vez que realiza una nueva operación.

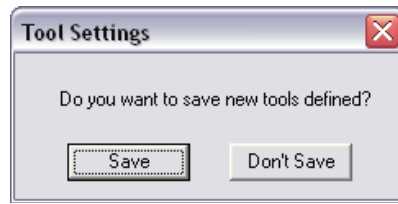


Figura 4.13. Opción para nuevas herramientas creadas.

#### 4.4.2 Parámetros de maquinado (Machining Parameters)

La segunda pestaña “Machinig Parameters” está diseñada para configurar el maquinado que se va a realizar. En esta pestaña se pueden observar dos grupos de opciones: “Roughing parameters” y “Tolerances”, Figura 4.14. El primero de ellos es para definir los parámetros del desbaste y en el segundo se definen parámetros de ambos procesos (desbaste y acabado).

Dos parámetros fundamentales en el desbaste son la profundidad de corte (Depth of cut) y la capa para el acabado (layer to finish). La profundidad de corte particularmente en el desbaste se puede calcular en función del diámetro de la herramienta (sección 2.6.1). La capa de material que se deja para el acabado generalmente es pequeña entre 0.1 y 1 mm aunque no existe un valor establecido. Un tercer parámetro importante es la distancia que habrá entre trayectorias de la herramienta (Stepover). Al igual que la profundidad de corte este parámetro también se puede calcular en función del diámetro de la herramienta (sección 2.6.1).

Cuando se ha seleccionado una herramienta de la lista en la primera pestaña y se hace clic sobre la segunda, los valores de “Depth of cut” y “Stepover” se muestran calculados en función del diámetro de la herramienta seleccionada (ecuaciones (2.12) y (2.14)). La opción de “Layer to finish” también tiene un valor que es constante de 0.7 y que se encuentra del rango 0.1 y 1.0, sin embargo, el usuario puede cambiar el valor de las casillas de acuerdo a su criterio. Tanto la profundidad de corte (“Depth of cut”) como la capa para acabado (“Layer to finish”) solo están activas cuando el cuadro de diálogo se llama desde la opción “Rough Setting”.

La opción “Maximum feed forward error” es el máximo valor que se puede desviar la superficie maquinada de la superficie de diseño. Este parámetro es esencial para determinar el paso en la dirección de maquinado y que es adaptivo (sección 2.5.4). El segundo tipo de error es en la dirección ortogonal y se refiere a la cresta que se va quedar entre dos trayectorias paralelas. En este tipo de error el usuario define la distancia entre trayectorias paralelas “Stepover” y el ángulo de la superficie de mayor valor que debe estar entre 0° y 60° para que la ecuación utilizada sea válida. Con estos dos valores se puede aproximar el error que habrá en una superficie con el ángulo definido a través del botón “Approximate scallop height”. La ecuación (1.14) se utiliza para el cálculo del paso, de la cual se despeja  $h$  para ponerla en función del paso entre trayectorias ( $\delta$ ), el diámetro de la herramienta ( $D$ ) y el ángulo de la superficie ( $\theta$ ), quedando como:

$$h = D - \sqrt{D^2 - \left(\frac{\delta}{\cos \theta}\right)^2}$$

A partir de la aproximación del error, el paso se puede modificar para tener el error dentro de la tolerancia establecida. Para aproximar la altura de la cresta dado un paso, únicamente se puede realizar cuando se utiliza una herramienta de punta de bola o bien cuando el cuadro de diálogo es llamado desde la opción “Finish Setting”.

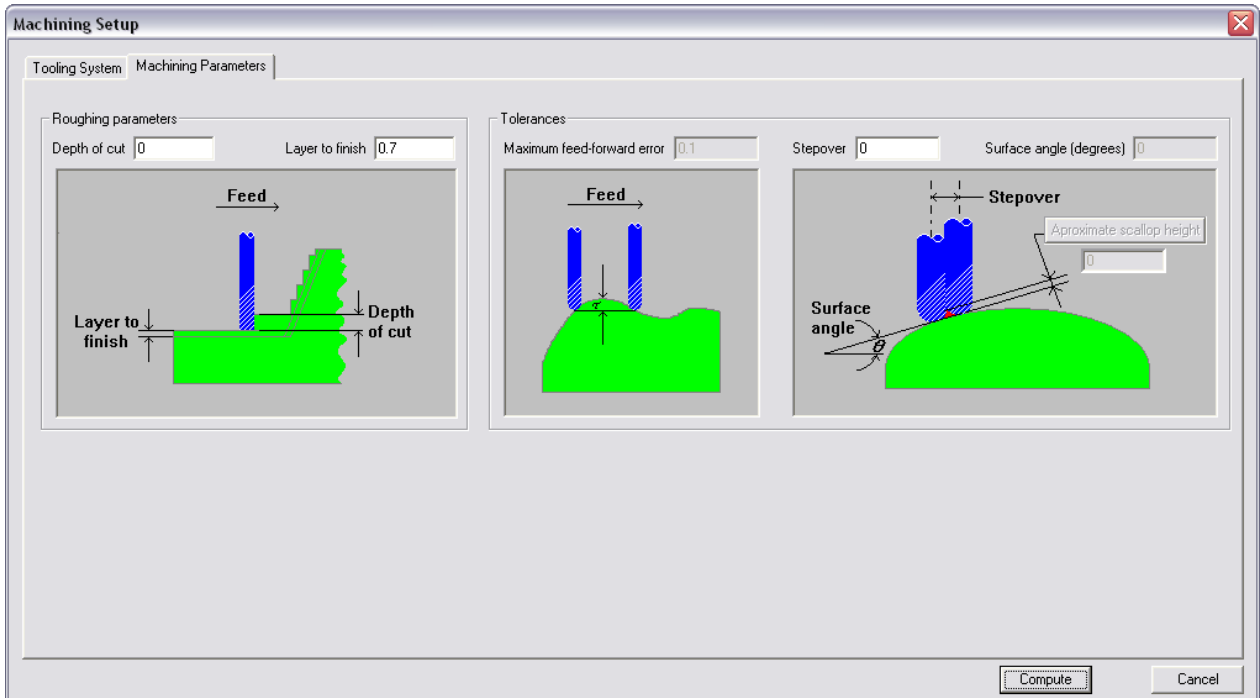


Figura 4.14. Parámetros del maquinado.

Finalmente cuando se han definido y seleccionado todos los parámetros necesarios, se hace clic en el botón “Compute” (calcular), el cual muestra un cuadro de diálogo más donde se resumen los datos con los que se generarán las trayectorias, Figura 4.15. Los datos resumidos son, las características de la herramienta seleccionada, la velocidad del husillo y avance de la herramienta así como los parámetros de maquinado como: tolerancia, paso entre trayectorias, profundidad de corte y capa para acabado. En la parte final del diálogo se muestra un apartado en donde se puede seleccionar el algoritmo con el que se calcularán las trayectorias. Los tres algoritmos que se pueden seleccionar son los presentados en las secciones 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3. En el caso del acabado los tres algoritmos están disponibles, sin embargo, para el desbaste solo se puede utilizar el método que se basa en la discretización de la superficie presentado en la sección 2.4.3.



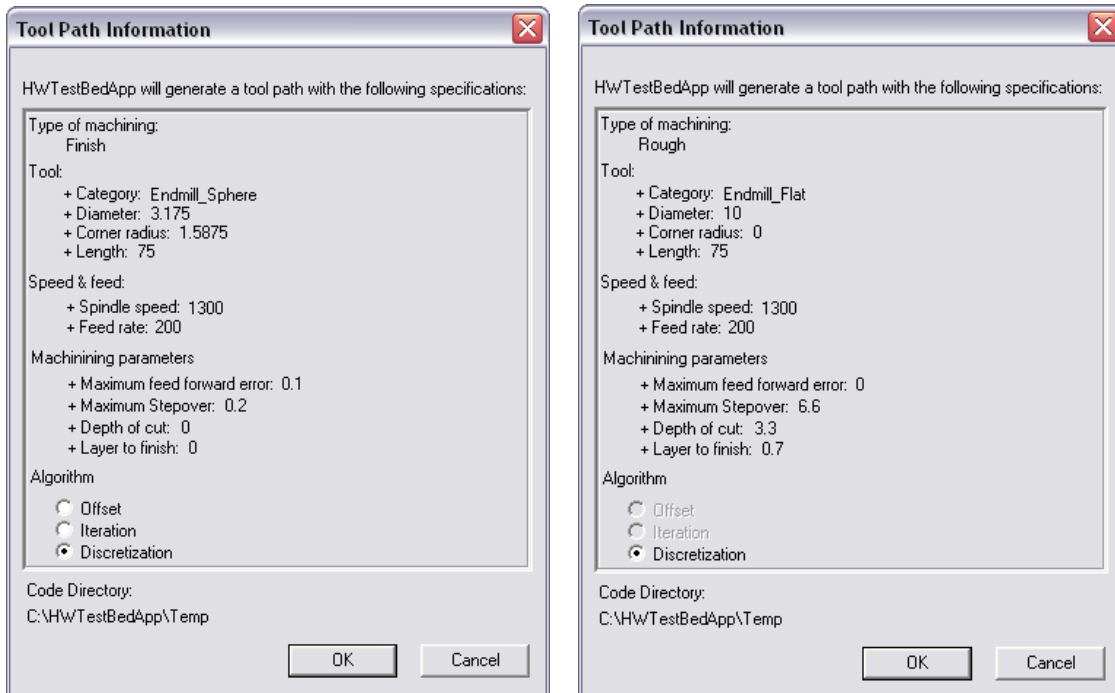


Figura 4.15. Información de la generación de trayectorias: a) acabado, y b) desbaste.

Al hacer clic en el botón “OK” se inicia la generación de trayectorias de herramienta, lo que incluye es la generación de las trayectorias de herramienta ya sea para desbaste o acabado, libres de interferencias y de colisiones, así como la escritura del código de maquinado en un archivo .TXT. Durante cada uno de los procesos mencionados se calcula el tiempo que tarda en su ejecución, para finalmente crear un reporte con los tiempos de cálculo, además del número de segmentos generados, la longitud total de la trayectoria y un tiempo de maquinado aproximado calculado considerando una velocidad de avance constante, a partir de la división de la longitud total de la trayectoria entre la velocidad de avance. La Figura 4.16 muestra un ejemplo del diálogo a través del cual se presenta el resumen de resultados de la generación de trayectorias.

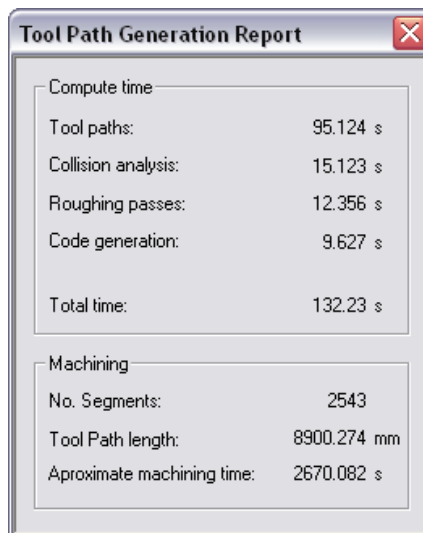


Figura 4.16. Reporte de la generación de trayectorias de herramienta.

#### 4.5 Simulación (Simulation)

Para verificar la validez de las trayectorias de herramienta generadas, se añadió la opción de “Simulation”, mediante la cual es posible la visualización en pantalla de la trayectoria generada. La simulación no solo incluye las trayectorias sino que además incluye la simulación de la herramienta y el sistema de sujeción o portaherramientas. La Figura 4.17 muestra las opciones de la pestaña “Simulation” la cual cuenta con la opción de simular las trayectorias para desbaste (Roughing) o acabado (Finishing), las cuales se activan cuando se han generado las trayectorias y el código. La Figura 4.17b muestra la simulación para acabado (Finishing) activa, debido a que las trayectorias para acabado ya fueron generadas.

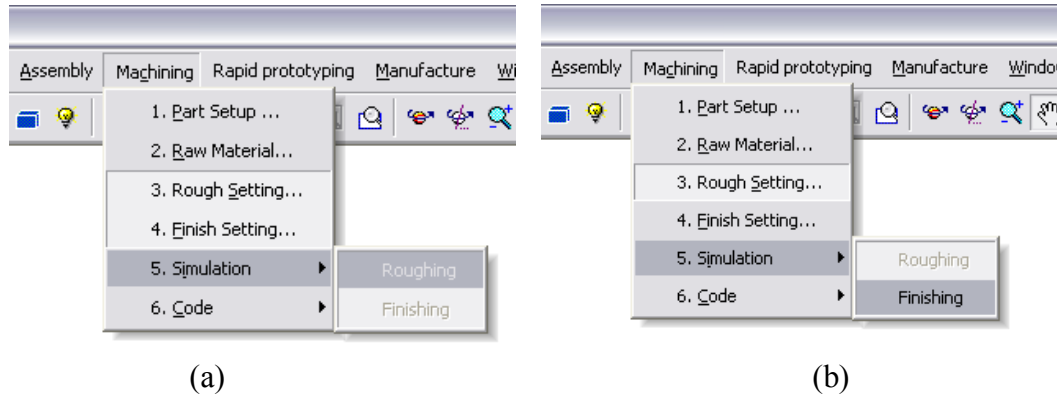


Figura 4.17. Opción “Simulation”.

El modelo del portaherramientas utilizado en la simulación se muestra en la Figura 4.18, el cual corresponde al mostrado en la Figura 2.37 para una herramienta de punta de bola. Para realizar la simulación del portaherramientas los valores se toman directamente de los definidos en el cuadro de diálogo de la Figura 4.11 para tener una representación proporcional a la real.

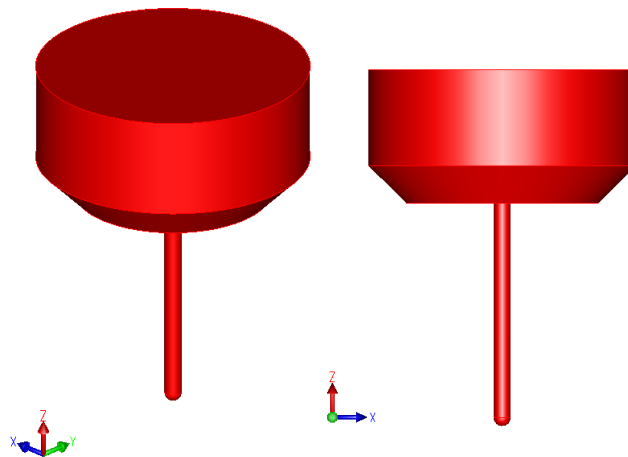


Figura 4.18. Modelo geométrico del portaherramientas.

La simulación completa incluye el portaherramientas moviéndose de posición a posición, representando las trayectorias mediante líneas para poder visualizar detalladamente la ruta y detectar posibles fallas, Figura 4.19.

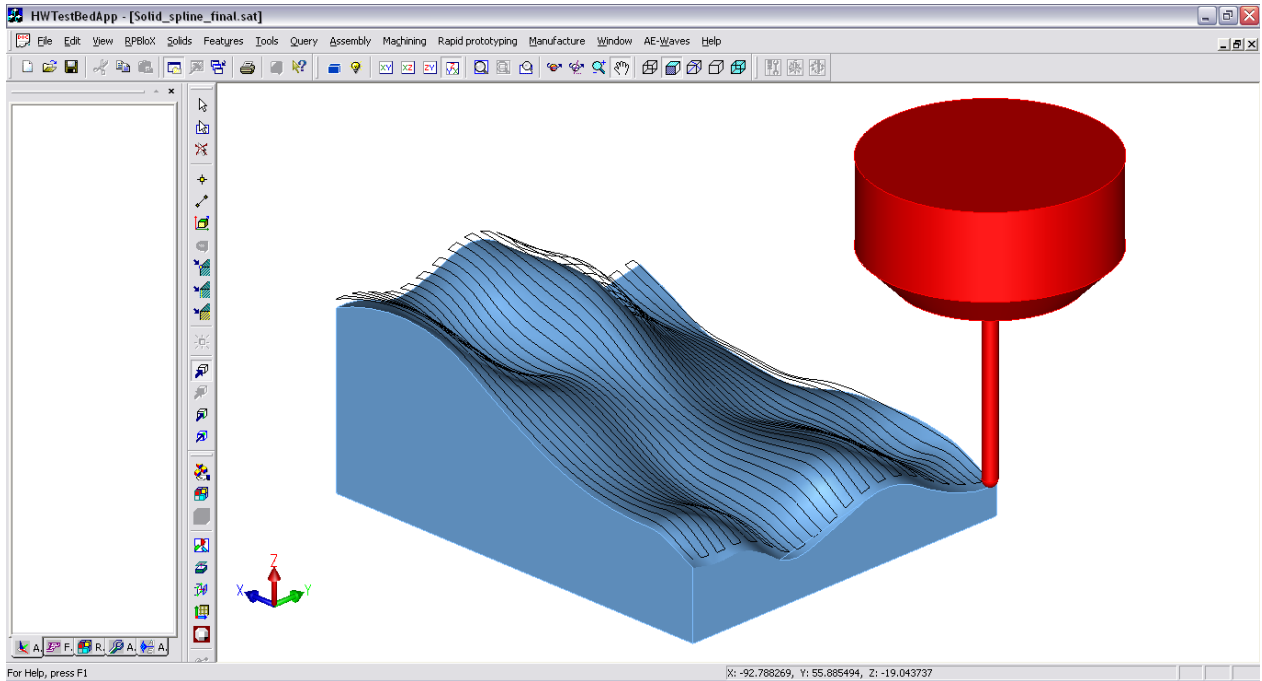


Figura 4.19. Simulación gráfica de las trayectorias de maquinado.

#### 4.6 Código (Code)

El código de maquinado para sistemas CNC y sistemas robóticos se analiza y desarrolla en el Capítulo 3. En él se unen las trayectorias para generar una trayectoria continua en forma de zigzag, y se escriben dentro de un archivo de texto de acuerdo al formato del sistema utilizado. La implementación para esta opción en la interfaz gráfica simplemente consta de las opciones necesarias para visualizar el código, Figura 4.20. La opción principal es “Code” y de despliega para poder seleccionar una de las opciones disponibles “CNC” o “Robot” que a su vez cada una de ellas despliega dos opciones para seleccionar el código para maquinado de desbaste “Roughing” o código para maquinado de acabado “Finishing”. Para una misma pieza el código de desbaste y acabado cambia solo en algunas opciones del encabezado y las trayectorias, siendo la misma estructura. La Figura 4.21 muestra un ejemplo de un código de desbaste generado para un sistema CNC.

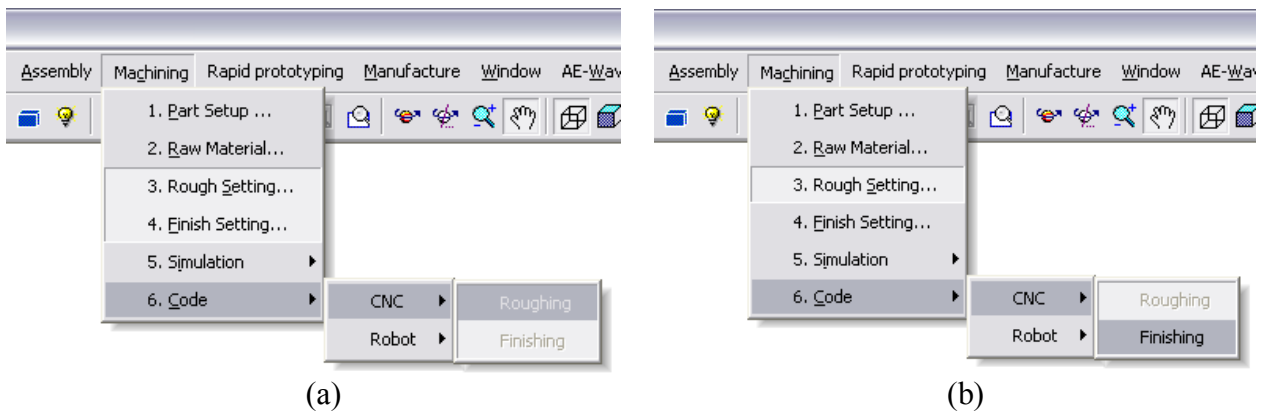


Figura 4.20. Opción “Code->CNC”: a) ningún código generado (opciones inhabilitadas), y b) código generado para acabado (opción “Finishing” habilitada).

```

Rough_CNC_code.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
%
O1234

(                **HWUTestBedApp products**                )
(                MACHINING system                            )
( ----- JOB INFORMATION ----- )
(Name of component:      Gehaeuse.sat)
(File location:         C:\ABME\Temp\Modelos\Gehaeuse.sat)
(NC file location:     C:\HwTestBedApp\Temp\Rough_CNC_code.txt)
(Date:                 15/1/2013 (DD/MM/YY))
(Time:                 18:11:40 (GMT))

N100 G21
N102 G00 G17 G40 G49 G80 G94
N104 G91 G28 Z0.0
N106 G00 G58 G90 X0.0 Y0.0 S1500 M03
N108 G43 H1 Z1.0 M08
N112 G01 X-19.844 Y6.140 Z12.140 F200.000
N114 G01 X-8.776 Y6.140 Z12.140
N116 G00 X-8.776 Y6.140 Z12.140
N118 G00 X0.072 Y6.140 Z12.140
N120 G01 X11.362 Y6.140 Z12.140
N122 G01 X11.362 Y4.050 Z12.140
N124 G01 X-3.928 Y4.050 Z12.140
N126 G00 X-8.776 Y4.050 Z12.140
N128 G00 X-8.776 Y4.050 Z12.140
N...
N...
N...
N...
N...
N...
N2260 G01 X-19.088 Y6.140 Z10.638
N2262 G01 X-19.588 Y6.140 Z0.700
N2264 G01 X-20.788 Y6.140 Z0.700
N2266 G01 X-20.788 Y6.140 Z25.700
N2268 G00 G91 G28 Z0.0 M09
N2270 G28 X0.0 Y0.0
N2272 M30
%

```

Figura 4.21. Código de maquinado para desbaste.

# Capítulo 5

## Análisis y evaluación del sistema

---

Para verificar el funcionamiento del sistema propuesto, en este Capítulo se muestran los resultados obtenidos de la generación de trayectorias de maquinado de seis piezas de forma y complejidad variable, una de las cuales se fabricó utilizando un sistema CNC de tres ejes.

### 5.1 Resultados del sistema

Para evaluar la capacidad y el desempeño del sistema, se seleccionaron seis piezas con forma y complejidad variable. Las pruebas se realizaron basadas en el procedimiento general mostrado en la Figura 2.2 utilizando la plataforma HWTtestBedApp en una PC con procesador Pentium® Dual-Core, CPU a 2.30 GHz y 3 GB de RAM.

Para cada pieza se realizó la planeación del maquinado para desbaste y acabado, y se midió el tiempo que tarda cada una de ellas. Además, también se reporta un estimado del tiempo que tardará el maquinado real si las trayectorias se ejecutan a una velocidad de avance constante. Esta aproximación se calcula dividiendo la longitud total de la trayectoria entre la velocidad de avance de la herramienta. En todos los modelos se utilizó para la generación de trayectorias tanto de desbaste como de acabado el algoritmo de discretización mediante puntos (Capítulo 2). La distancia entre planos de corte utilizada para la discretización de la superficie es constante con un valor de 0.1 mm. La discretización de cada uno de los lados no rectos fue con una tolerancia de 0.0001 mm, y la distancia entre punto y punto no excede 0.01 mm incluyendo a los lados rectos.

#### 5.1.1 Modelo 1: Gehause

El primer modelo probado en el sistema fue el modelo Gehause mostrado en la Figura 5.1. La dimensión del bounding box para este modelo es 122 x 45 x 35 mm, y fue seleccionado por la gran variedad de formas que presenta. Tales formas permiten evaluar la habilidad del sistema para generar trayectorias en modelos con altura variable, agujeros, filetes, formas cilíndricas, además de modelos que presentan zonas donde no existe material.

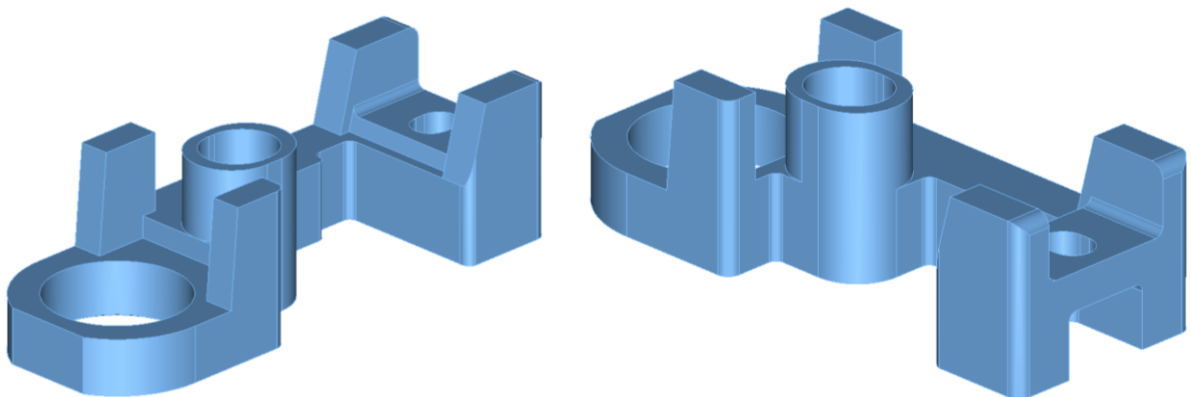


Figura 5.1. Modelo 1: Gehause.

### Desbaste

La materia prima para el modelo Gehaeuse consiste de una forma aproximada, (Figura 5.2), que es el resultado típico de una proceso de forja, inyección de plásticos o bien algún proceso de Prototipado Rápido. La dimensión del bounding box del modelo de la materia prima es de 130 x 54 x 44 mm. Los parámetros utilizados para la generación de trayectorias de la herramienta se muestran en la Tabla 5.1a. La trayectoria de herramienta generada por el sistema contiene 1 348 segmentos con una longitud de 20 844 mm, y el tiempo de maquinado aproximado es de 1hr 44min 13s. El tiempo total de ejecución fue de 276.172 s, distribuido de acuerdo a la Tabla 5.1b.

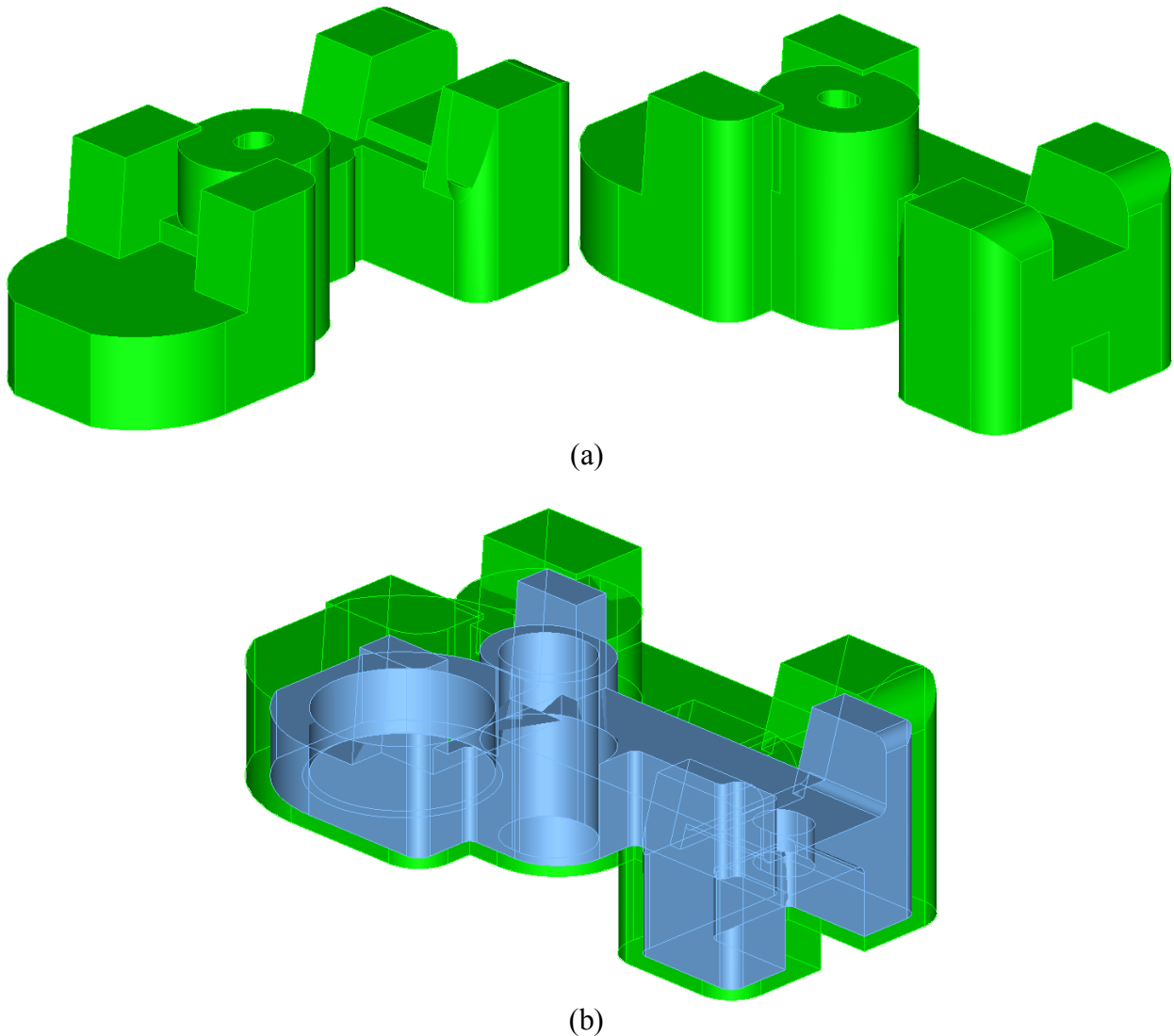


Figura 5.2. Materia prima para el modelo Gehaeuse: a) forma aproximada, y b) materia prima y modelo.

Herramienta	
Categoría	Plana
Diámetro	10.0 mm
Radio de esquina	0 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	-
Paso lateral	6.6 mm
Profundidad de corte	3.3 mm
Capa para acabado	0.7 mm

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	266.594 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0.016 s
Generación de código	9.562 s

Tiempo total	276.172 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	1 348
Longitud de la trayectoria	20 844 mm
Tiempo aproximado de maquinado	1hr 44min 13s

(b)

Tabla 5.1. Información para modelo Gehause: a) parámetros del desbaste, y b) resultados de la generación de trayectorias.

La trayectoria para desbaste se presenta en la Figura 5.3. Esta trayectoria está compuesta por dos tipos de movimientos: el primero es para corte de material y se ejecuta a la velocidad de avance programada (F), y el segundo tiene como objetivo conducir la herramienta para unir los movimientos con corte en una sola trayectoria. El segundo tipo de movimiento se realiza a la velocidad máxima programada del sistema. La Figura 5.4 muestra la descomposición de la trayectoria de desbaste para el modelo Gehause; en la primera imagen se muestra la trayectoria para el arranque de material, y la segunda imagen representa la trayectoria para conectar las trayectorias de corte y formar un zigzag continuo. Al unirse ambas en una sola, se obtiene el resultado mostrado en la tercera imagen. En general todas las trayectorias de desbaste presentadas en este trabajo están compuestas de esta manera.

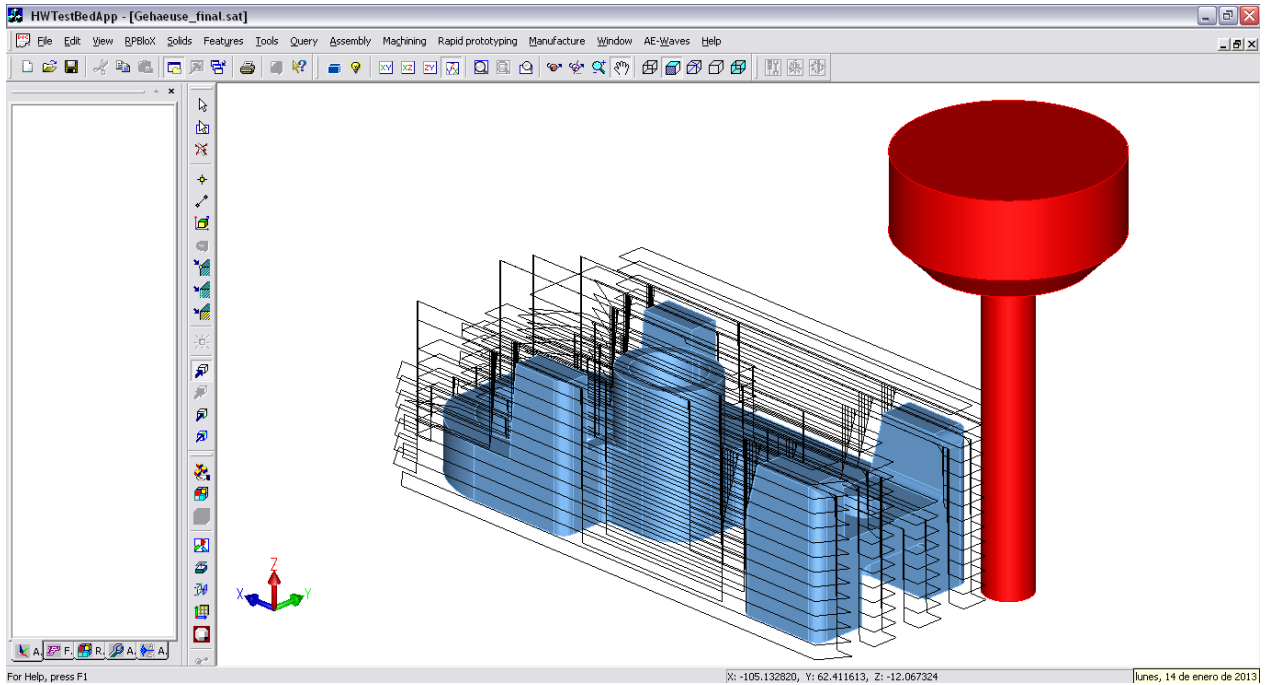


Figura 5.3. Trayectorias para desbaste de modelo Gehause.

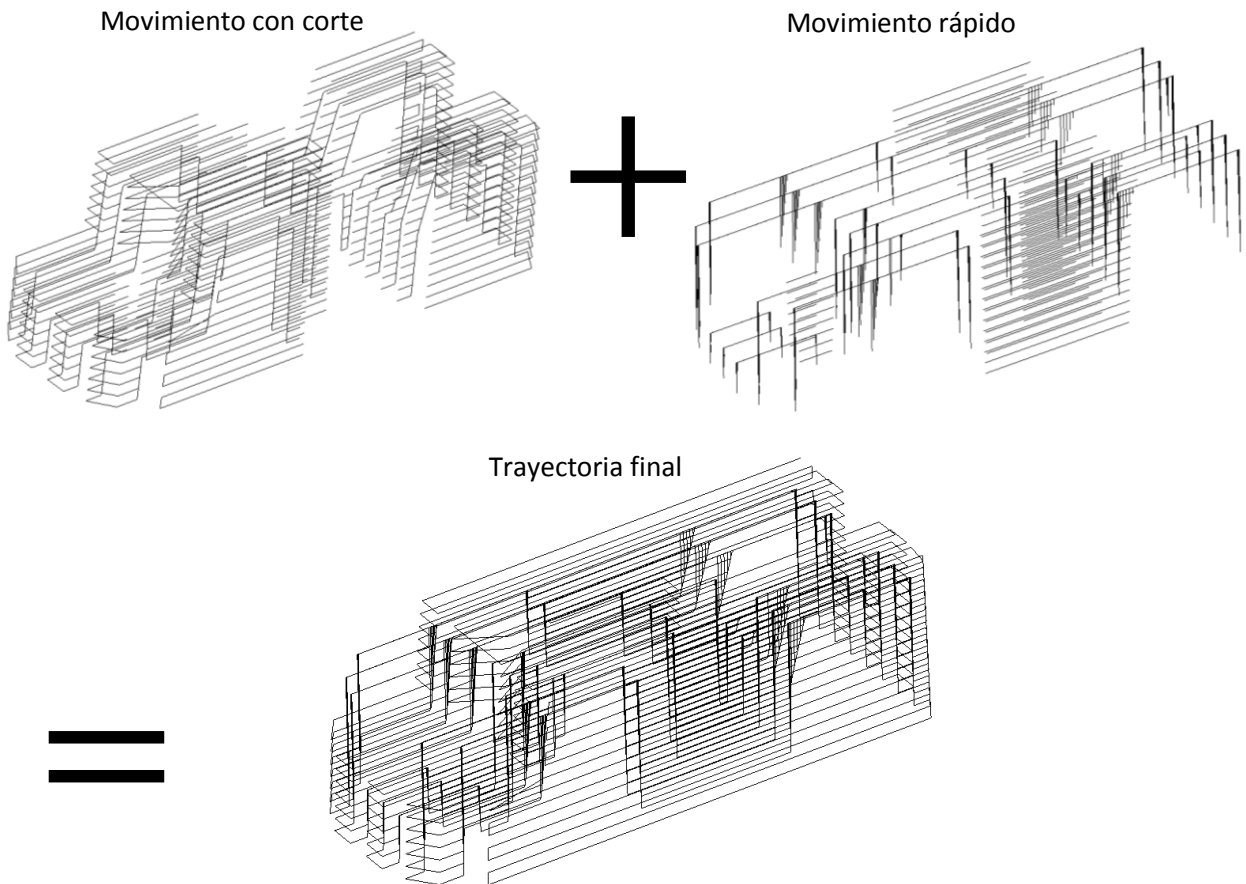


Figura 5.4. Descomposición de la trayectoria de desbaste para el modelo Gehause.



### Acabado

Las trayectorias de acabado se generan directamente sobre el modelo final de acuerdo a los parámetros presentados en la Tabla 5.2a. El resultado muestra que el número de segmentos generados fue de 8 218 con una longitud total de la trayectoria de 26 306 mm. El tiempo estimado de maquinado fue de 2hr 11min 32s. El tiempo que tardó el sistema en la ejecución del proceso completo fue de 805.453 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.2b. El tiempo de cálculo de las colisiones es cero porque la herramienta tiene una longitud mayor al bounding box del modelo en la dirección de Z y por tanto no existe posibilidad de colisión. En el caso del cálculo de las pasadas el tiempo de cálculo también es cero debido a que solo aplica para desbaste. Finalmente la trayectoria para acabado se muestra en la Figura 5.5.

Herramienta	
Categoría	Esférica
Diámetro	6.35 mm
Radio de esquina	3.175 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1 300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	0.05 mm
Paso lateral	0.5 mm
Profundidad de corte	-
Capa para acabado	-

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	802.656 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0 s
Generación de código	2.797 s

Tiempo total	805.453 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	8 218
Longitud de la trayectoria	26 306 mm
Tiempo aproximado de maquinado	2hr 11min 32s

(b)

Tabla 5.2. Información de modelo Gehause: a) parámetros del acabado, b) resultados de la generación de trayectorias.

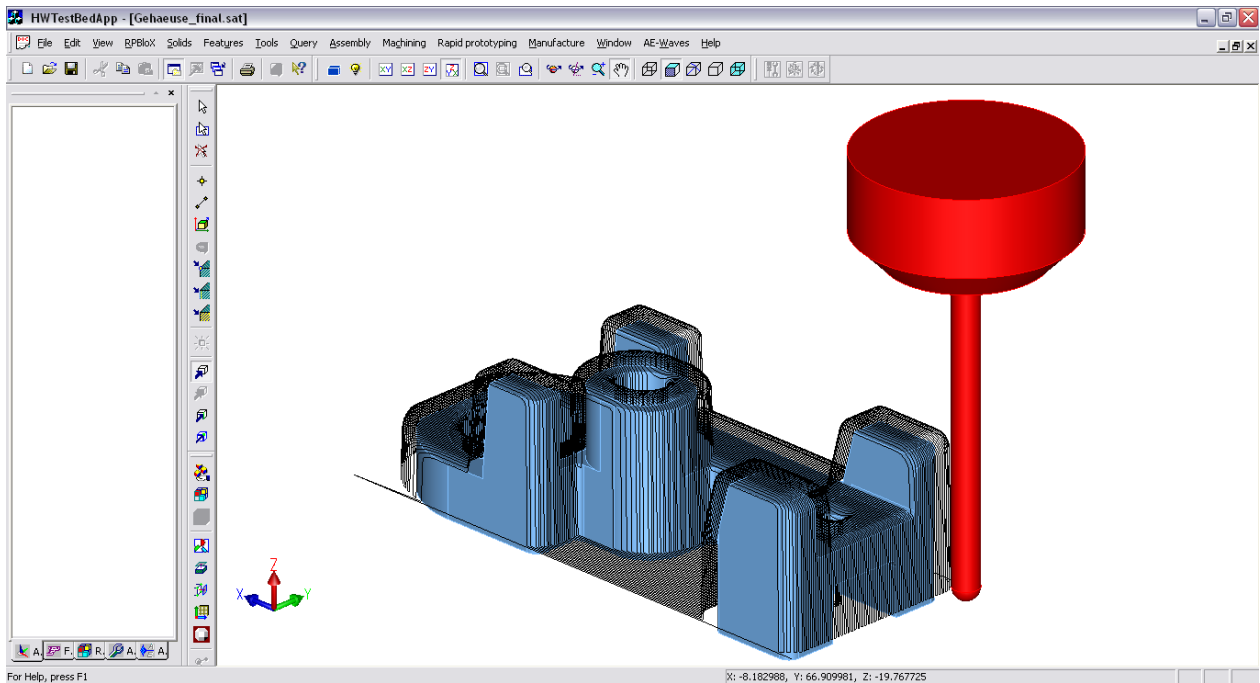


Figura 5.5. Trayectoria de acabado para el modelo Gehause.

### 5.1.2 Modelo 2: Molde

El segundo modelo de prueba corresponde al molde que se muestra en la Figura 5.6. Este modelo fue seleccionado por las características geométricas de paredes delgadas formadas por curvas irregulares. La dimensión del bounding box para este modelo es de 114 x 106 x 27 mm.

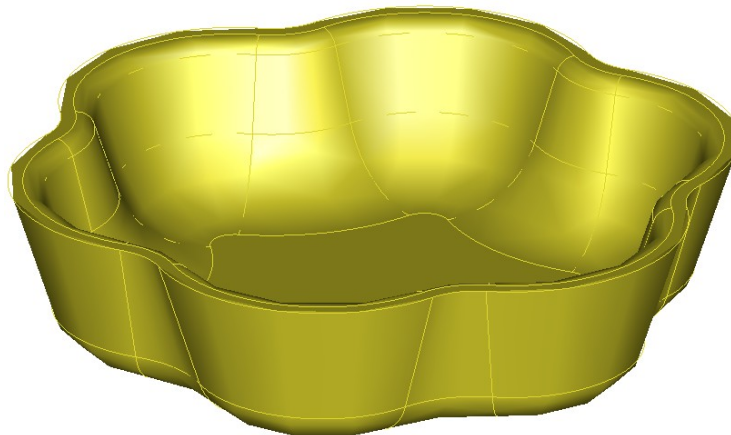


Figura 5.6. Modelo 2: Molde.

#### Desbaste

La materia prima para el Molde es una forma aproximada compuesta por cubos (modelo octree) mostrada en la Figura 5.7, la cual tiene un bounding box de 154 x 146 x 47 mm. Los parámetros de entrada utilizados para la generación de trayectorias de la herramienta se muestran en la Tabla 5.3a. El resultado de la trayectoria de acabado generada muestra que está compuesta de 3 165 segmentos con una longitud total de 55 473 mm, el tiempo de maquinado aproximado es de 4h 37min 21s. El tiempo total de ejecución fue de 640.078 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.3b.

La trayectoria final para el desbaste se muestra en la Figura 5.8, la cual consta tanto de movimientos con corte a velocidad programada como de movimientos rápidos.

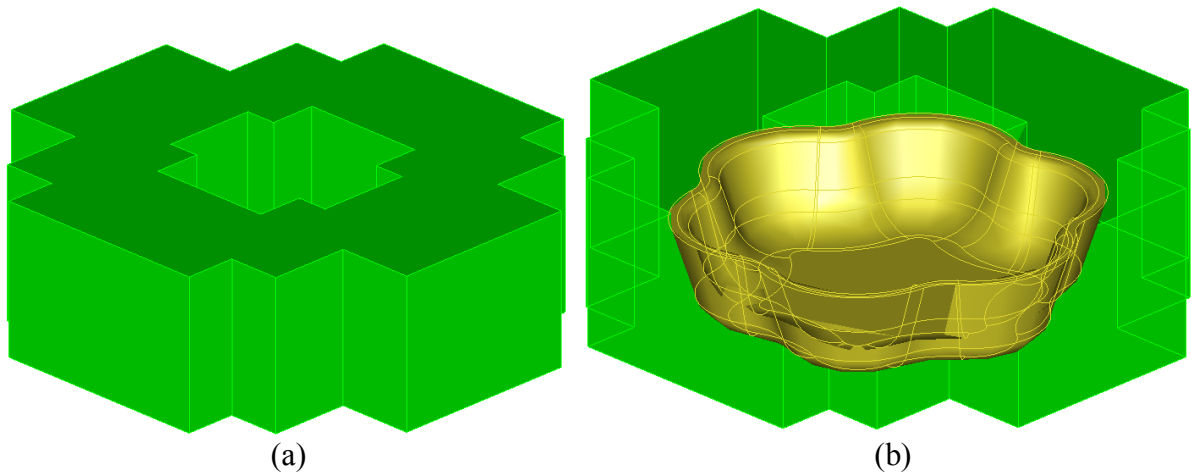


Figura 5.7. Materia prima para el Molde: a) modelo octree, y b) materia prima y modelo.

Herramienta	
Categoría	Plana
Diámetro	10.0 mm
Radio de esquina	0 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	-
Paso lateral	6.6 mm
Profundidad de corte	3.3 mm
Capa para acabado	0.7 mm

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	634.796 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0.047 s
Generación de código	5.235 s

Tiempo total	640.078 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	3165
Longitud de la trayectoria	55 473 mm
Tiempo aproximado de maquinado	4hr 37min 21s

(b)

Tabla 5.3. Información para el modelo del Molde: a) parámetros del desbaste, b) resultados de la generación de trayectorias.

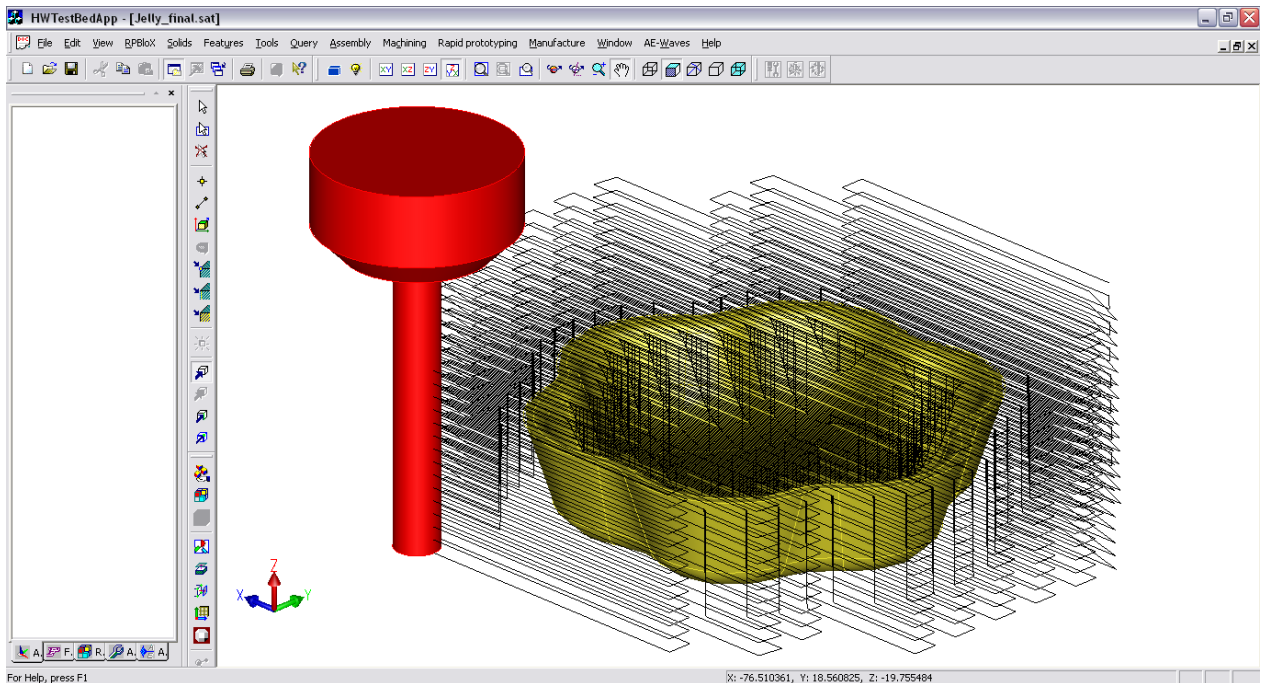


Figura 5.8. Trayectorias de desbaste para el Molde.

### Acabado

Para las trayectorias de acabado se utilizaron los parámetros presentados en la Tabla 5.4a. El número de segmentos en la trayectoria fue de 27 276 con una longitud total de 42 492 mm, el tiempo de maquinado aproximado para fabricar la pieza fue de 3hr 32min 27s. El tiempo total que tardó el sistema en el cálculo de las trayectorias fue de de 590.859 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.4b. El resultado de las trayectorias se muestra en la Figura 5.9.

Herramienta	
Categoría	Esférica
Diámetro	3.175 mm
Radio de esquina	1.5875 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	0.05 mm
Paso lateral	0.25 mm
Profundidad de corte	-
Capa para acabado	-

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	567.5 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0 s
Generación de código	23.359 s

Tiempo total	590.859 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	27 276
Longitud de la trayectoria	42 492 mm
Tiempo aproximado de maquinado	3hr 32min 27s

(b)

Tabla 5.4. Información para el modelo del Molde: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias.

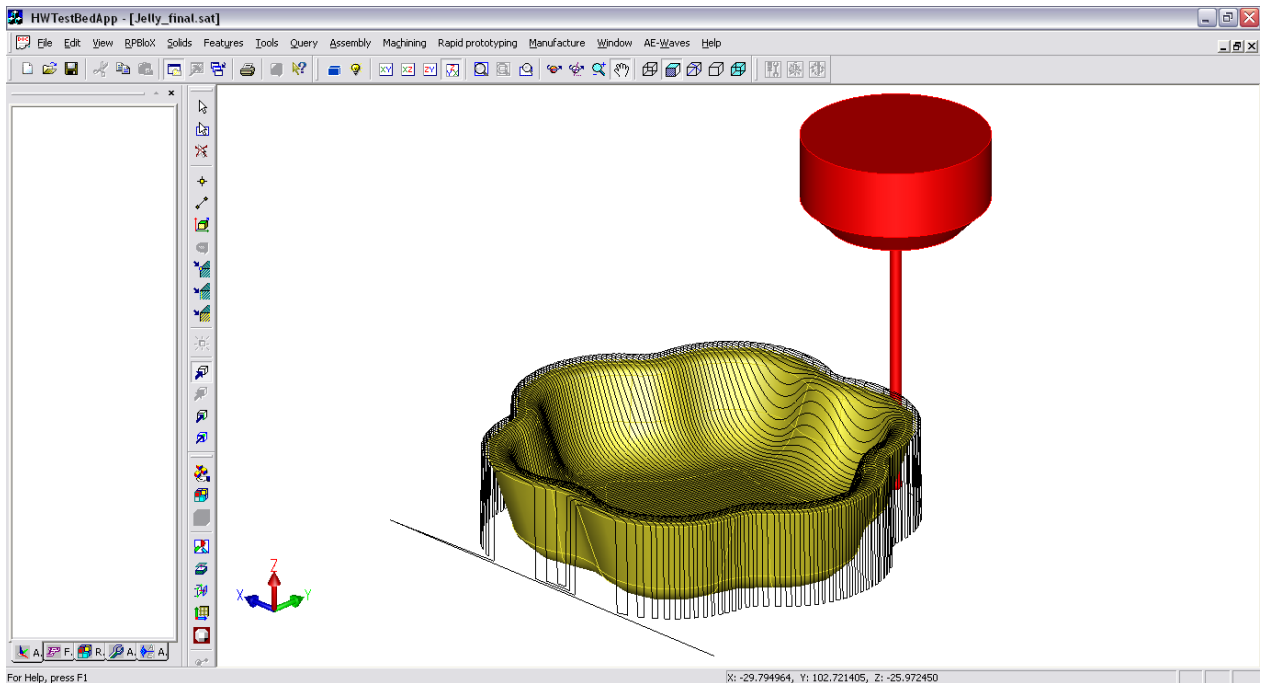


Figura 5.9. Trayectorias de acabado para el Molde.

### 5.1.3 Modelo 3: Camión

El tercer modelo probado fue un camión, Figura 5.10, con un bounding box de 123 x 62 x 62 mm. Este modelo es más complejo que los anteriores ya que contiene una gran variedad de características geométricas tales como formas salientes (cantilever), cavidades, paredes delgadas y detalles pequeños.

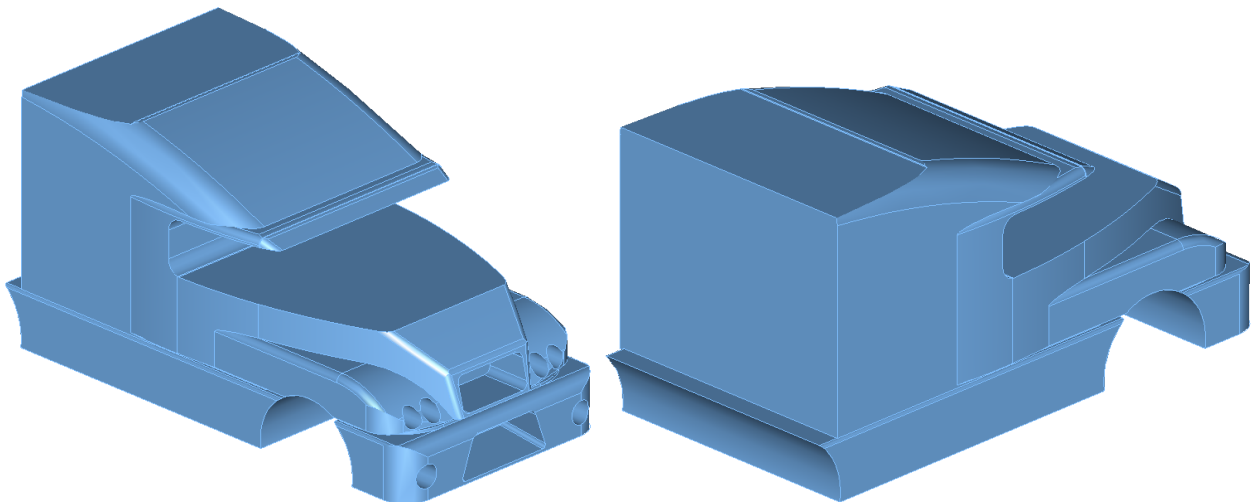


Figura 5.10. Modelo 3: Camión.

### Desbaste

La materia prima corresponde a una forma aproximada por cubos (modelo octree), Figura 5.11, con un bounding box de 156 x 92 x 73 mm. Se utilizaron los parámetros de maquinado mostrados en la Tabla 5.5a para generar las trayectorias de desbaste. Los resultados muestran que la trayectoria está compuesta de 2 919 segmentos con una longitud total de 56 670 mm, y que se

requiere un tiempo aproximado de 4hr 43min 20s para recorrerla a la velocidad de avance programada. El tiempo total de ejecución fue de 421.515 s distribuido de acuerdo a la Tabla 5.5b. Finalmente, la trayectoria de desbaste se muestra en la Figura 5.12.

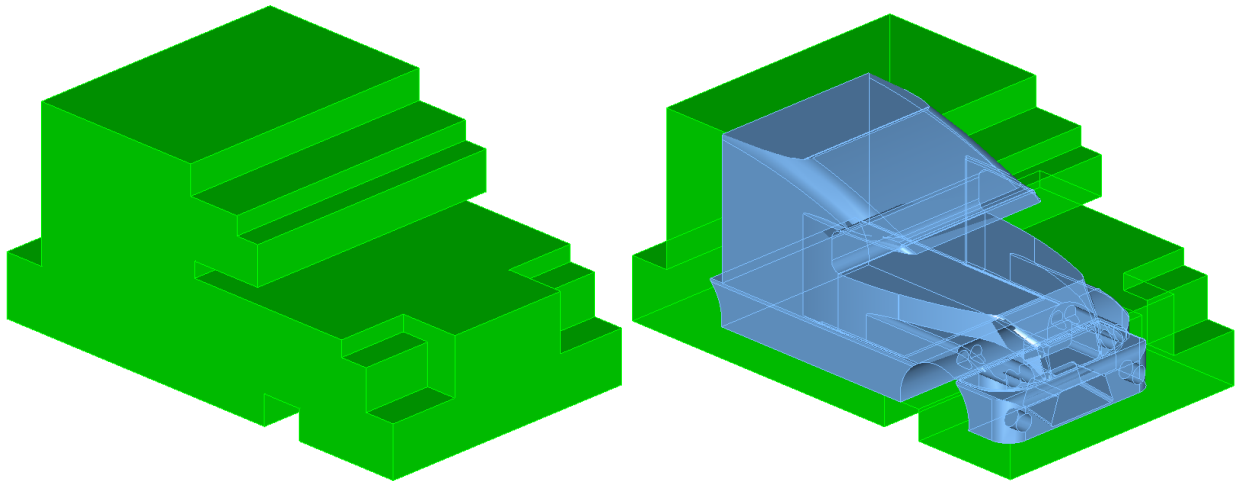


Figura 5.11. Materia prima para el Camión.

Herramienta	
Categoría	Plana
Diámetro	10.0 mm
Radio de esquina	0 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	-
Paso lateral	6.6 mm
Profundidad de corte	3.3 mm
Capa para acabado	0.7 mm

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	410.375 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0.047 s
Generación de código	11.093 s

Tiempo total	421.515 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	2 919
Longitud de la trayectoria	56 670 mm
Tiempo aproximado de maquinado	4hr 43min 20s

(b)

Tabla 5.5. Información para el modelo del Camión: a) parámetros de las trayectorias de maquinado, b) resultados de la generación de las trayectorias para desbaste.

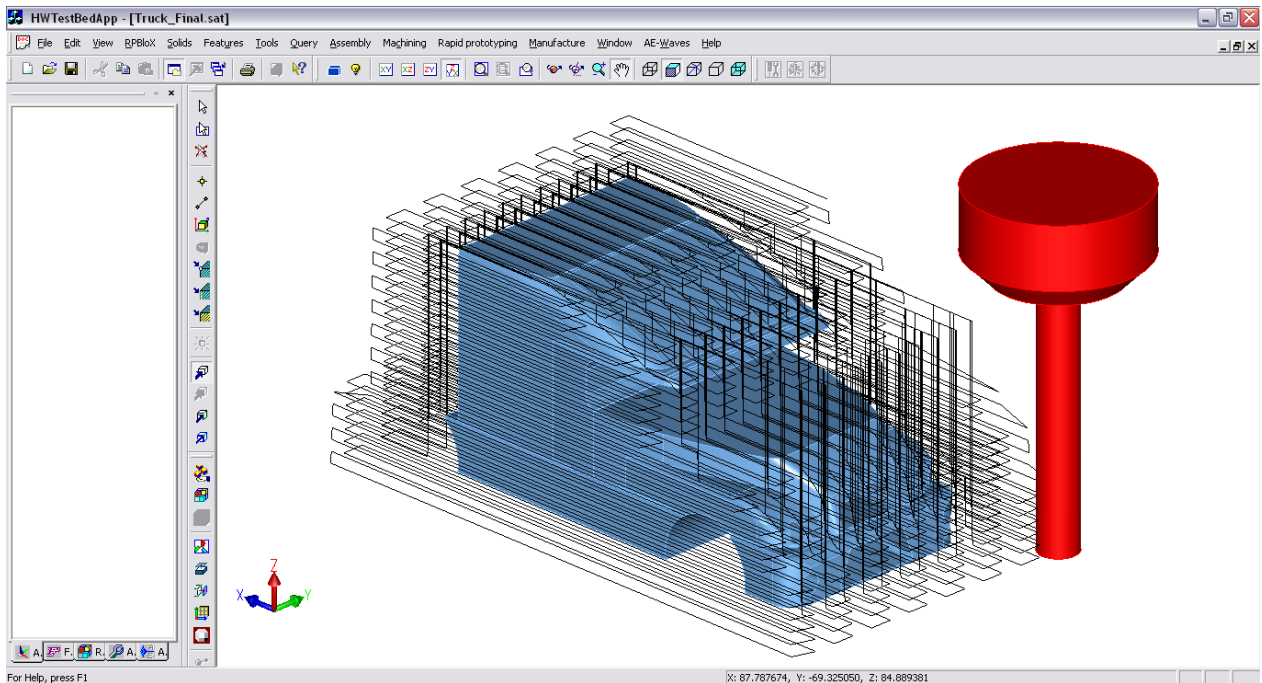


Figura 5.12. Trayectorias de desbaste para el modelo del Camión.

### Acabado

Para el acabado se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla 5.6a. El número de segmentos de la trayectoria fue de 22 770 con una longitud total de 30 341 mm, y un tiempo aproximado de maquinado de 2hr 31min 42s. Para generar las trayectorias el sistema se tardó un tiempo total de 1 167.453 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.6b. La trayectoria para acabado se presenta en la Figura 5.13.

Herramienta	
Categoría	Esférica
Diámetro	6.35 mm
Radio de esquina	3.175 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	0.05 mm
Paso lateral	0.5 mm
Profundidad de corte	-
Capa para acabado	-

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	1 150.593 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0 s
Generación de código	16.86 s

Tiempo total	1 167.453 s
--------------	-------------

Información del maquinado	
Número de segmentos	22 770
Longitud de la trayectoria	30 341 mm
Tiempo aproximado de maquinado	2hr 31min 42s

(b)

Tabla 5.6. Información para el modelo del Camión: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias.

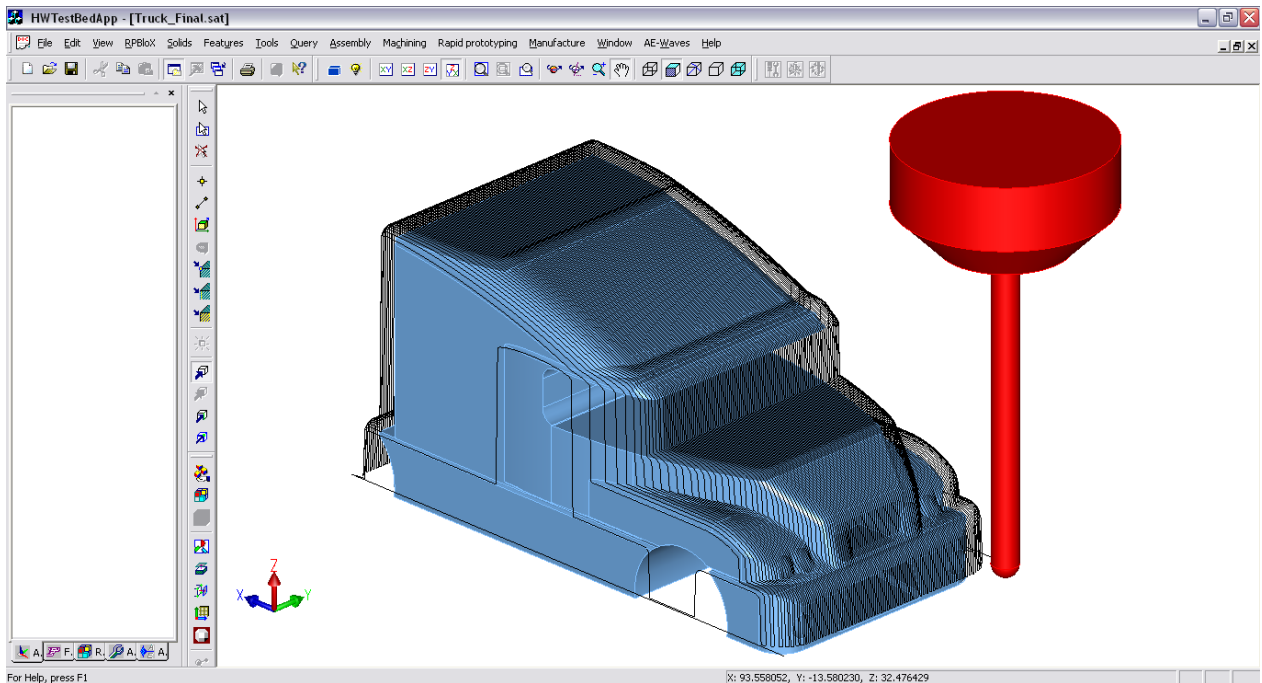


Figura 5.13. Trayectorias de acabado para el modelo del Camión.

#### 5.1.4 Modelo 4: Sello

El cuarto modelo probado fue un sello el cual tiene un bounding box de 110 x 130 x 95 mm, Figura 5.14. El objetivo de utilizar este modelo es demostrar la capacidad del sistema para generar trayectorias libres de colisiones entre el portaherramientas y la pieza de trabajo. El modelo se eligió por tener una altura mayor a la longitud típica de una herramienta, lo cual obliga a re-calcular las posiciones que presenten colisiones.

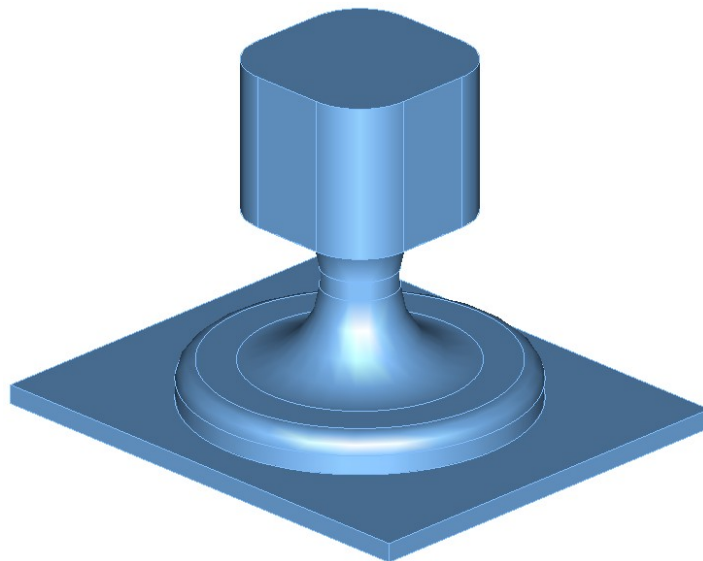


Figura 5.14. Modelo 4: Sello.



**Desbaste**

La materia prima para el modelo consiste de un bloque rectangular, Figura 5.15, con un bounding box de 134 x 114 x 95 mm. Los parámetros utilizados para la generación de trayectorias se muestran en la Tabla 5.7a. Las trayectorias de herramienta generadas contiene 3 345 segmentos con una longitud 119 032 mm y el tiempo de maquinado aproximado es de 9hr 55min 9s. El tiempo total de ejecución fue de 603.907 s, distribuido como de acuerdo a la Tabla 5.7b. Las trayectorias generadas se muestran en la Figura 5.16.

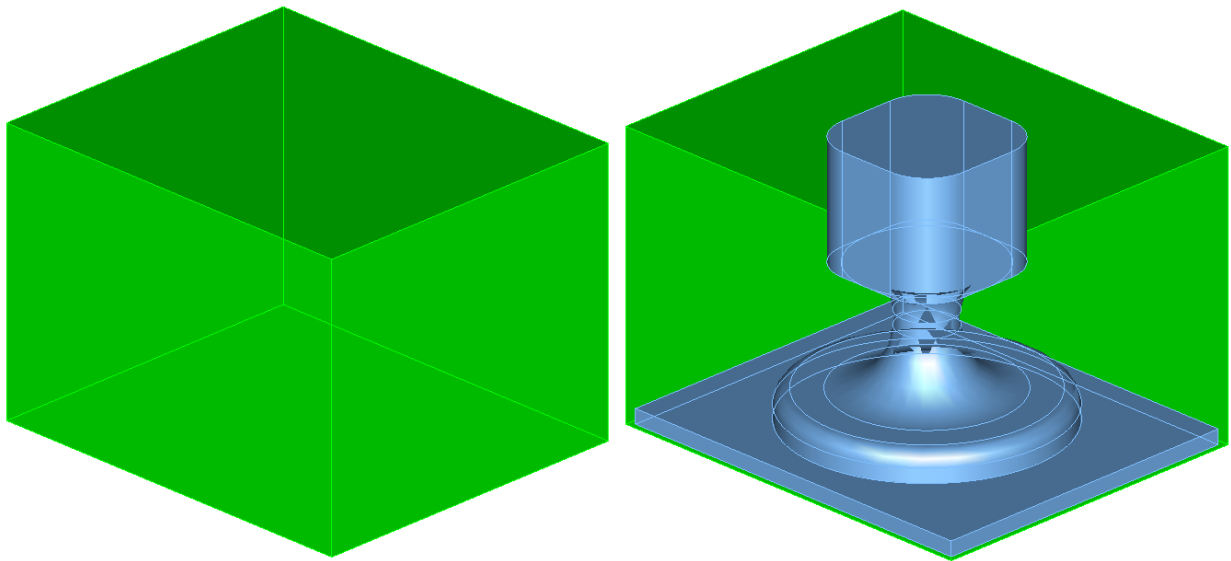


Figura 5.15. Materia prima para el modelo del Sello.

Herramienta	
Categoría	Plana
Diámetro	10.0 mm
Radio de esquina	0 mm
Longitud	50.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	-
Paso lateral	6.6 mm
Profundidad de corte	3.3 mm
Capa para acabado	0.7 mm

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	338.72 s
Colisiones	250.734 s
Pasadas de desbaste	0.046 s
Generación de código	14.407 s

Tiempo total	603.907 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	3 345
Longitud de la trayectoria	119 032 mm
Tiempo aproximado de maquinado	9hr 55min 9s

(b)

Tabla 5.7. Información para el modelo del Sello: a) parámetros del desbaste, b) resultados de la generación de trayectorias.

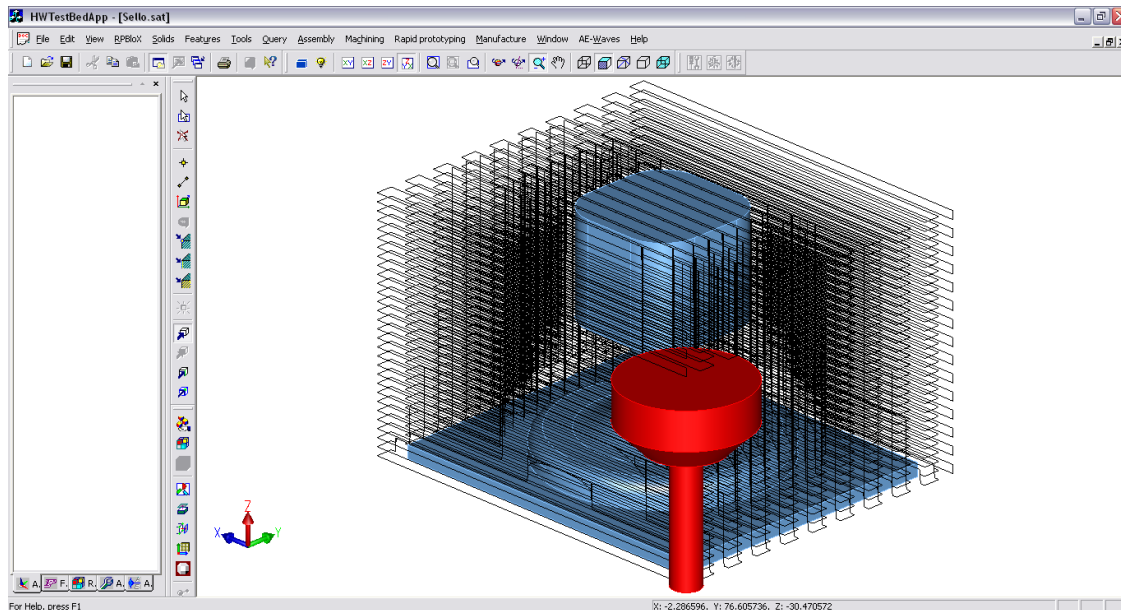


Figura 5.16. Trayectorias de desbaste para el modelo del Sello.

### Acabado

Para la generación de las trayectorias de acabado se utilizaron los parámetros presentados en la Tabla 5.8a. El número de segmentos fue de 6 478 con una longitud total de 27 265 mm. El tiempo de maquinado aproximado fue de 2hr 16min 19s. El tiempo total de ejecución fue de 1 735.6 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.8b. Las trayectorias de acabado se muestran en la Figura 5.17, en donde se puede observar claramente como el algoritmo de colisiones re-calcula las posiciones que presentan colisión, elevando dicha posición hasta que estén libres. En la Figura 5.17a se muestra la vista isométrica del modelo y las trayectorias, y en la Figura 5.17b se muestra la vista lateral, donde se observa que las posiciones re-calculadas se encuentran lejos del modelo.

Herramienta	
Categoría	Esférica
Diámetro	3.175 mm
Radio de esquina	1.5875 mm
Longitud	50.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	0.05 mm
Paso lateral	1 mm
Profundidad de corte	-
Capa para acabado	-

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

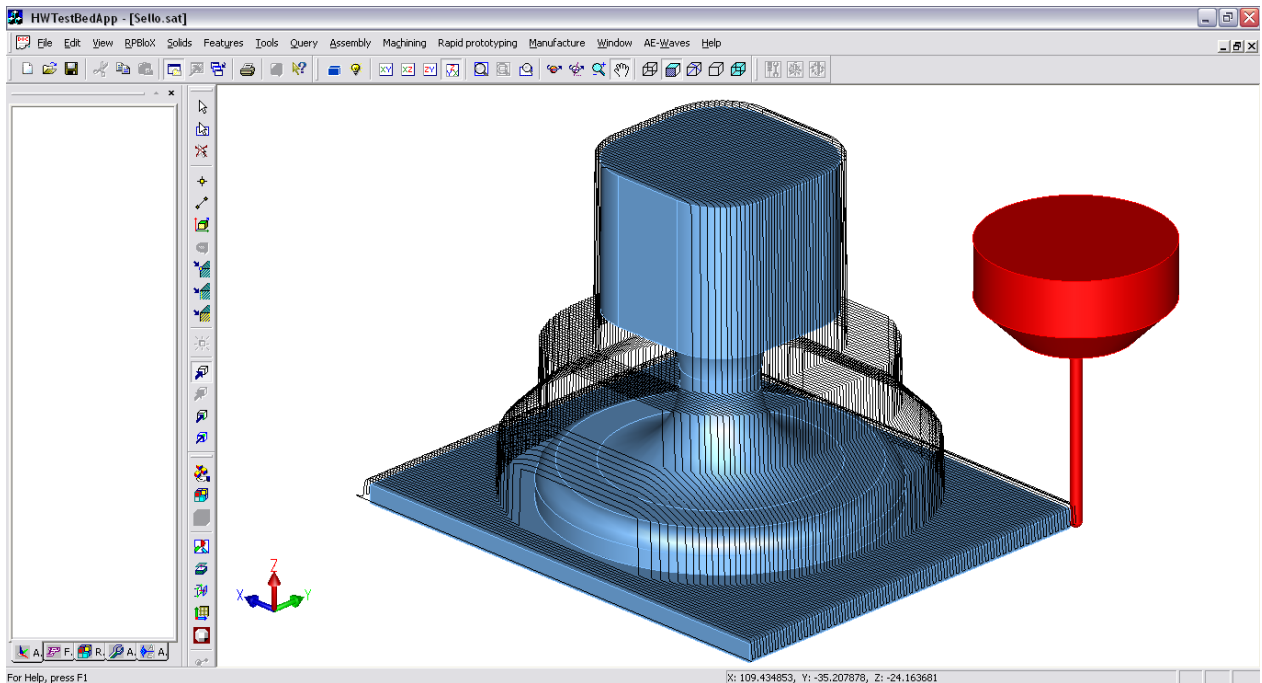
Tiempos de cálculo	
Trayectorias	295.891 s
Colisiones	1 426.015 s
Pasadas de desbaste	0 s
Generación de código	13.656 s

Tiempo total	1 735.562 s
--------------	-------------

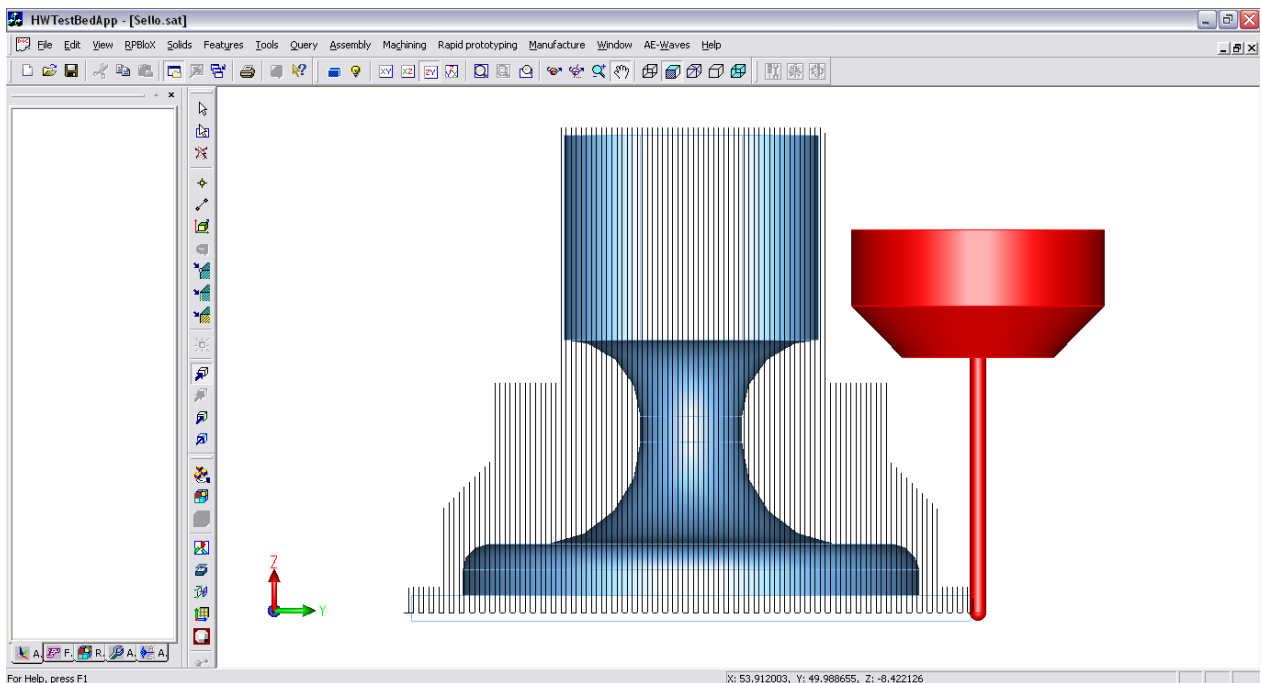
Información del maquinado	
Número de segmentos	6 478
Longitud de la trayectoria	27 265 mm
Tiempo aproximado de maquinado	2hr 16min 19s

(b)

Tabla 5.8. Información para el modelo del Sello: a) parámetros del maquinado, b) resultados de la generación de trayectorias.



(a)



(b)

Figura 5.17. Trayectorias de acabado para el Sello: a) vista isométrica, y b) vista lateral.

### 5.1.5 Modelo 5: Superficie de forma libre

El quinto modelo, Figura 5.18, contiene superficies de forma libre, es decir, superficies que no pueden ser representadas por medio de una ecuación. También se les conoce como superficies esculpidas por la forma tan similar en cómo se generan. La dimensión del bounding box es 93 x

80 x 42 mm y el objetivo de utilizar este modelo fue probar la habilidad del sistema para generar las trayectorias en componentes con superficies de forma libre.

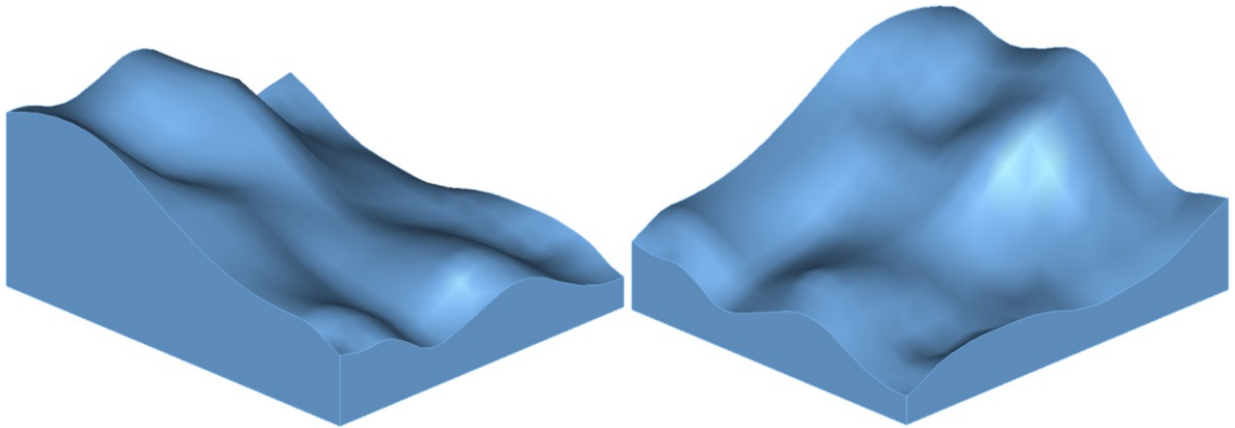


Figura 5.18. Modelo 5: Superficie de forma libre.

### Desbaste

La materia prima consiste de un bloque de forma rectangular, Figura 5.19, con un bounding box de 95 x 81 x 43 mm. Los parámetros para el desbaste se presentan en la Tabla 5.9a. El resultado muestra que el desbaste está compuesto por 3 473 segmentos con una longitud total de 30 308 mm, además el tiempo de maquinado aproximado es de 2hr 31m 32s. La ejecución del proceso completo fue de 198.92 s, distribuido de acuerdo a la Tabla 5.9b. La trayectoria final para el desbaste se muestra en la Figura 5.20.

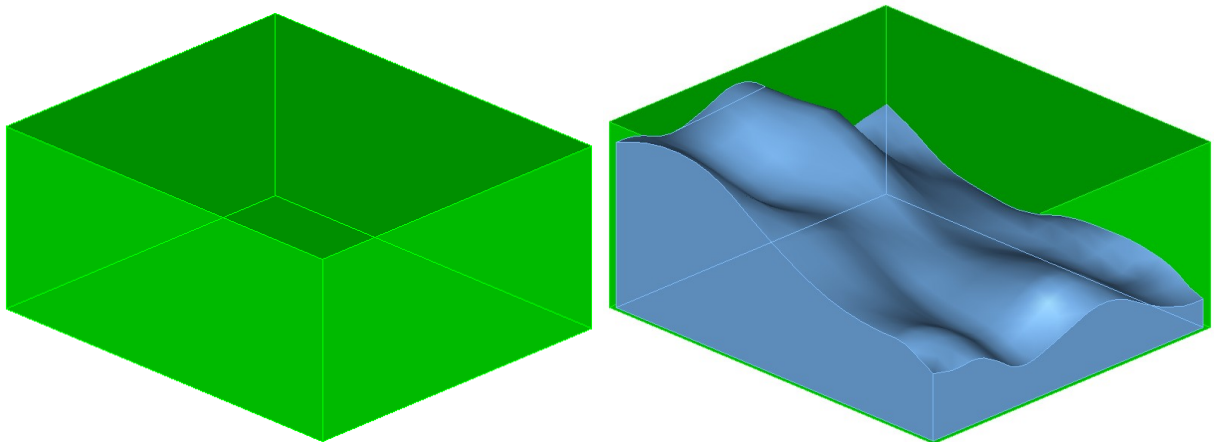


Figura 5.19. Materia prima para el modelo de superficie de forma libre.

Herramienta	
Categoría	Plana
Diámetro	10.0 mm
Radio de esquina	0 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	-
Paso lateral	6.6 mm
Profundidad de corte	3.3 mm
Capa para acabado	0.7 mm

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	195.175 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0.32 s
Generación de código	3.125 s

Tiempo total	198.922 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	3 473
Longitud de la trayectoria	30 308 mm
Tiempo aproximado de maquinado	2hr 31m 32s

(b)

Tabla 5.9. Información para el modelo de superficie de forma libre: a) parámetros del desbaste, y b) resultados de la generación de trayectorias.

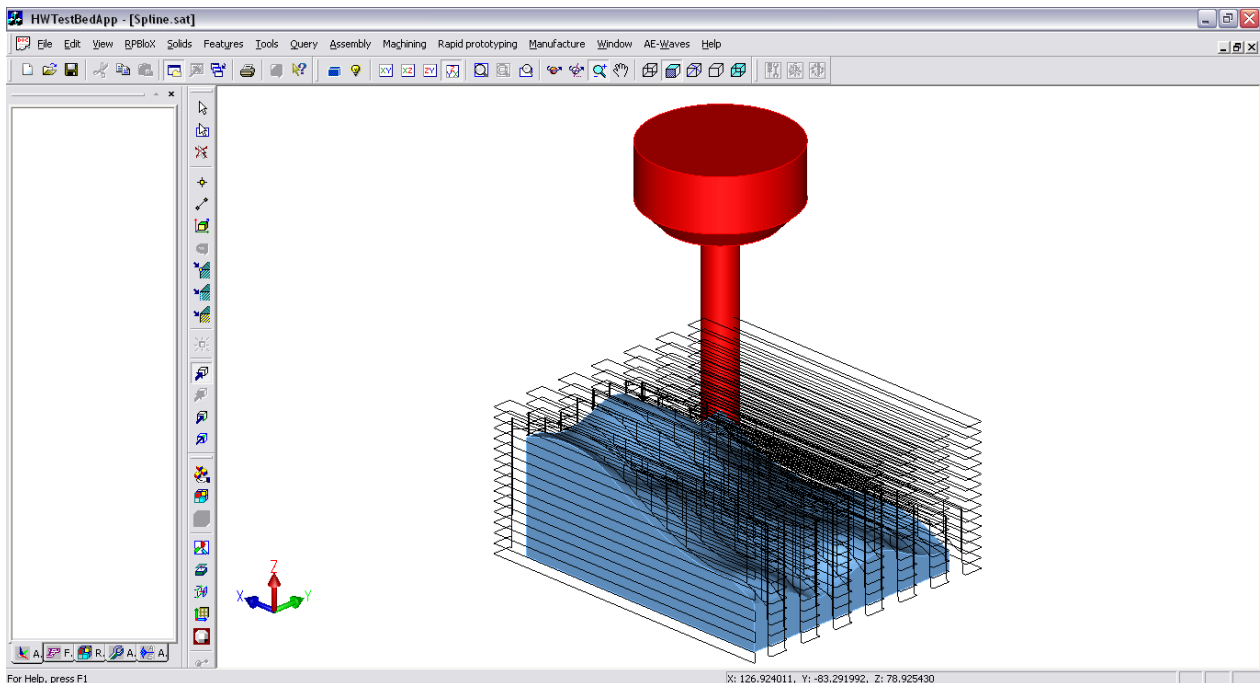


Figura 5.20. Trayectorias de desbaste para el modelo de superficie de forma libre.

### Acabado

Para la generación de las trayectorias de acabado se utilizaron los parámetros presentados en la Tabla 5.10a. El número de segmentos fue de 33 882 y una longitud total de 24 625 mm. El maquinado real tardaría 2hr 3min 7s. Finalmente el tiempo total de ejecución fue de 1089.61 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.10b.

Herramienta	
Categoría	Esférica
Diámetro	6.35 mm
Radio de esquina	3.175 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	0.05 mm
Paso lateral	0.5 mm
Profundidad de corte	-
Capa para acabado	-

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	1 086.57 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0 s
Generación de código	3.453 s

Tiempo total	1 089.61 s
--------------	------------

Información del maquinado	
Número de segmentos	33 882
Longitud de la trayectoria	24 625 mm
Tiempo aproximado de maquinado	2hr 3min 7s

(b)

Tabla 5.10. Información para el modelo de superficie de forma libre: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias.

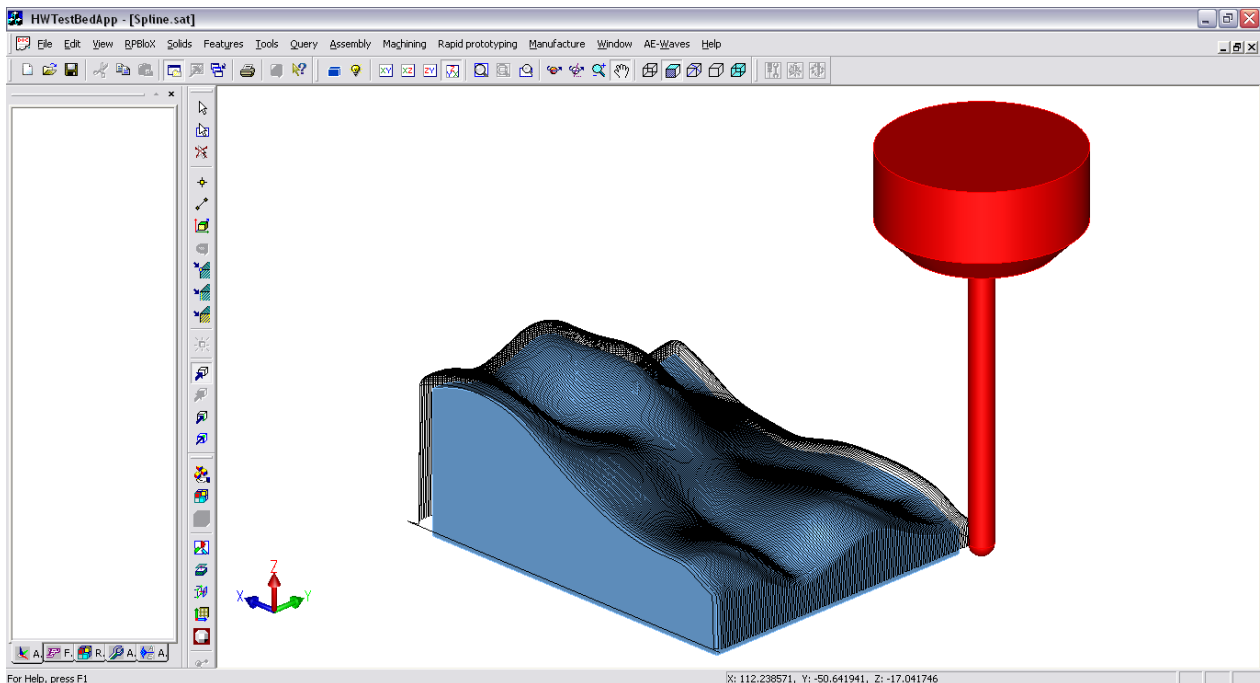


Figura 5.21. Trayectorias de acabado para el modelo de superficie de forma libre.

### 5.1.6 Modelo 6: Trial

El último modelo utilizado fue el Trial, Figura 5.22, el cual tiene una dimensión del bounding box de 120 x 40 x 30 mm. Este modelo fue seleccionado porque permite evaluar el sistema en superficies curvas (esfera), superficies cilíndricas, paredes verticales y planos inclinados.

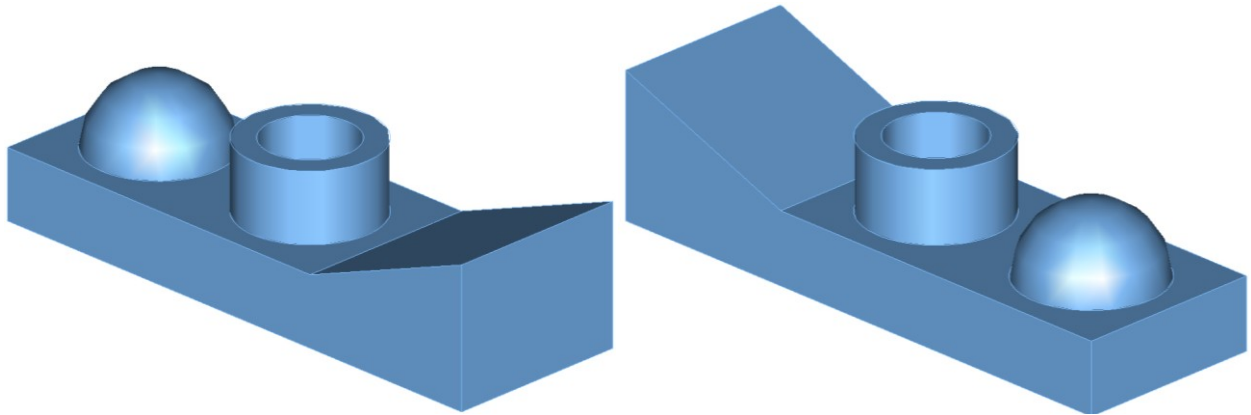


Figura 5.22. Modelo 6: Trial.

El modelo Trial también se maquinó para validar las trayectorias generadas por el sistema. Para realizar el maquinado se utilizó una máquina CNC de la marca LEADWELL modelo MCV-550S con un sistema de control Fanuc. El sistema utilizado es aproximadamente de los años 80, como se puede observar en la Figura 5.23.



Figura 5.23. Sistema de fresado CNC utilizado para el maquinado del modelo Trial.

### Desbaste

Para el modelo Trial se utilizó una materia prima de forma rectangular con un bounding box de 140 x 50 x 30 mm. En la Figura 5.24 se muestra la materia prima virtual y real utilizada para el maquinado. El material utilizado para el maquinado real fue una resina comercial debido a que se puede maquinar a altas velocidades sin que el equipo o herramienta sufran algún daño.

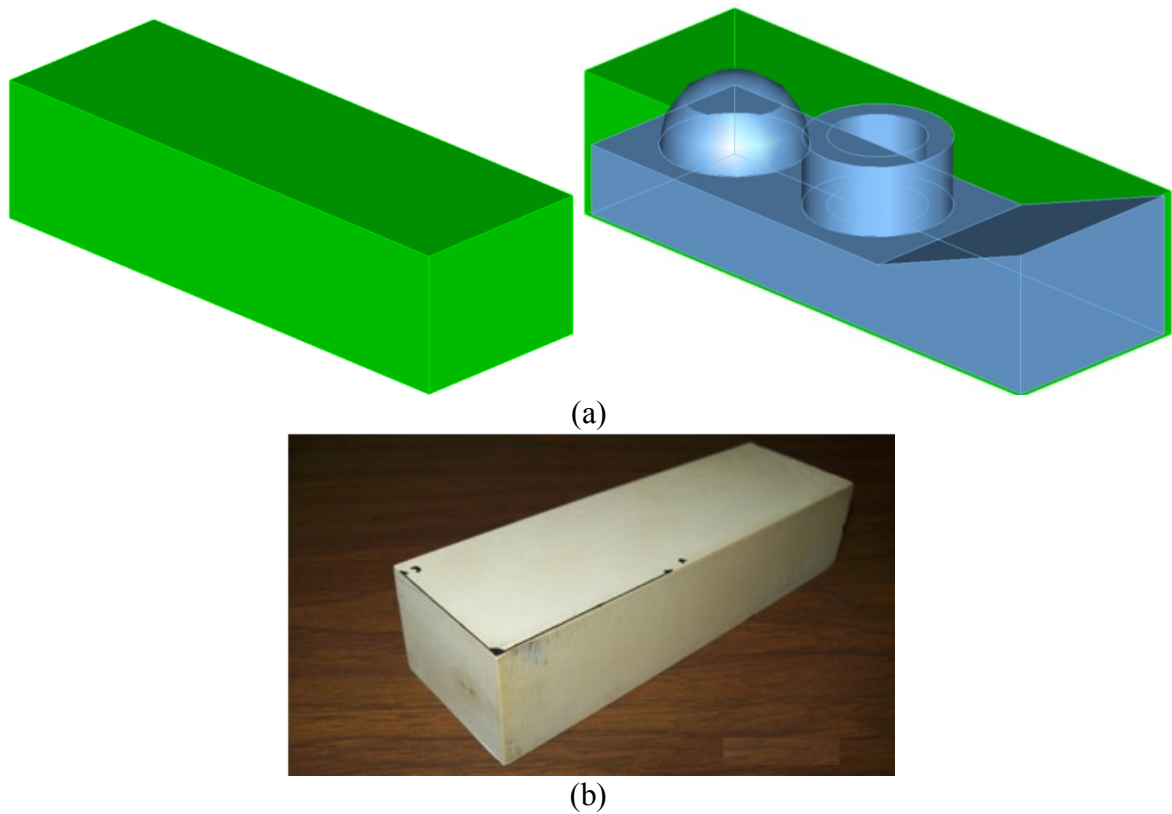


Figura 5.24. Materia prima para el modelo Trial: a) materia prima virtual, y b) materia prima real.

Los parámetros para el desbaste son los mostrados en la Tabla 5.11a. La herramienta real utilizada para esta operación se muestra en la Figura 5.25.

Herramienta	
Categoría	Plana
Diámetro	10.0 mm
Radio de esquina	0 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	-
Paso lateral	6.6 mm
Profundidad de corte	3.3 mm
Capa para acabado	0.7 mm

Algoritmo	
Discretización	-

(a)

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	133.868 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0.1 s
Generación de código	1.032 s

Tiempo total	135 s
--------------	-------

Información del maquinado	
Número de segmentos	1 579
Longitud de la trayectoria	17 797 mm
Tiempo aproximado de maquinado	1hr 25min 54s

(b)

Tabla 5.11. Información para el modelo Trial: a) parámetros del desbaste, b) resultados de la generación de trayectorias.





Figura 5.25. Herramientas de corte plana para desbaste, 10mm.

Las trayectoria generada para el desbaste se muestra en la Figura 5.26, la cual está compuesta por 1 579 segmentos con una longitud total de 17 797 mm y un tiempo de maquinado aproximado de 1hr 25min 54s. El tiempo total de ejecución fue de 135 s, distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.11b.

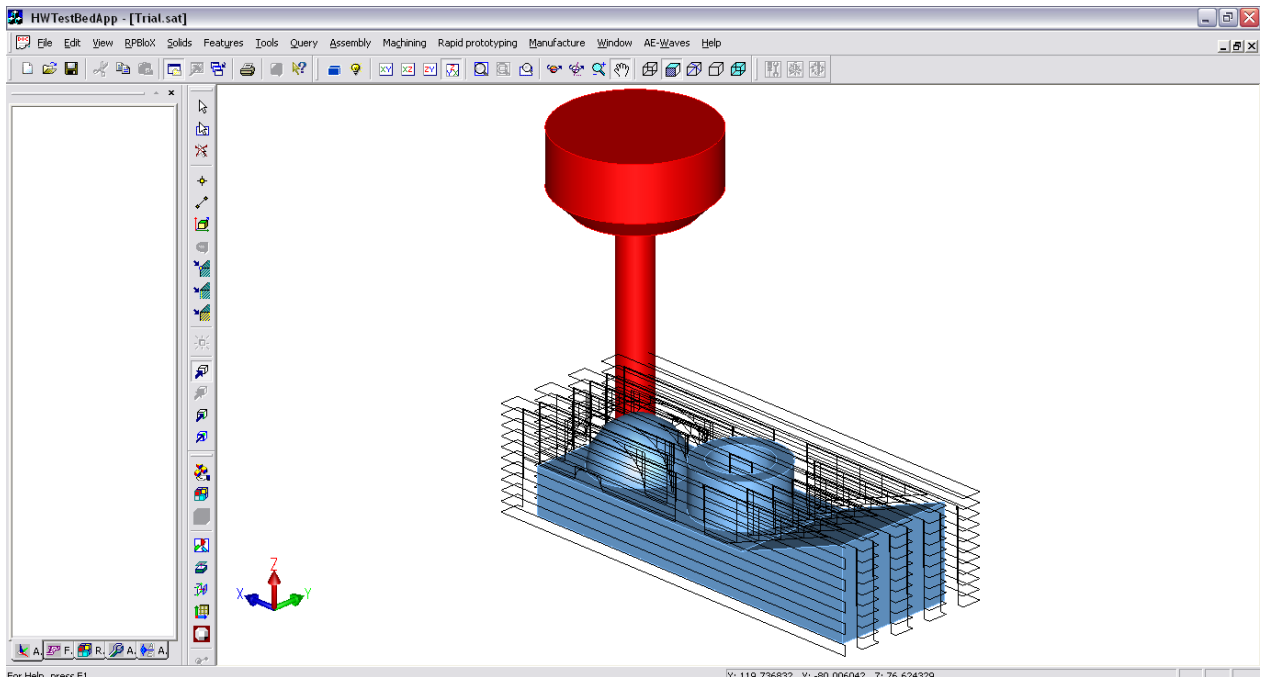


Figura 5.26. Trayectorias de desbaste para el modelo Trial.

Con la trayectoria generada en el sistema mostrada en la Figura 5.26 se realizó el maquinado real de la pieza utilizando el código CNC generado. En la Figura 5.27 se muestran algunas fotografías en secuencia tomadas durante el maquinado de desbaste. Cabe mencionar que por razones de seguridad, el maquinado se realizó utilizando solo movimiento a velocidad programada (G1) con el fin de actuar rápidamente en caso de algún error. Este ajuste no afecta para nada las

trayectorias, solamente que donde se ejecuta un movimiento rápido se sustituye por un movimiento a velocidad programada.

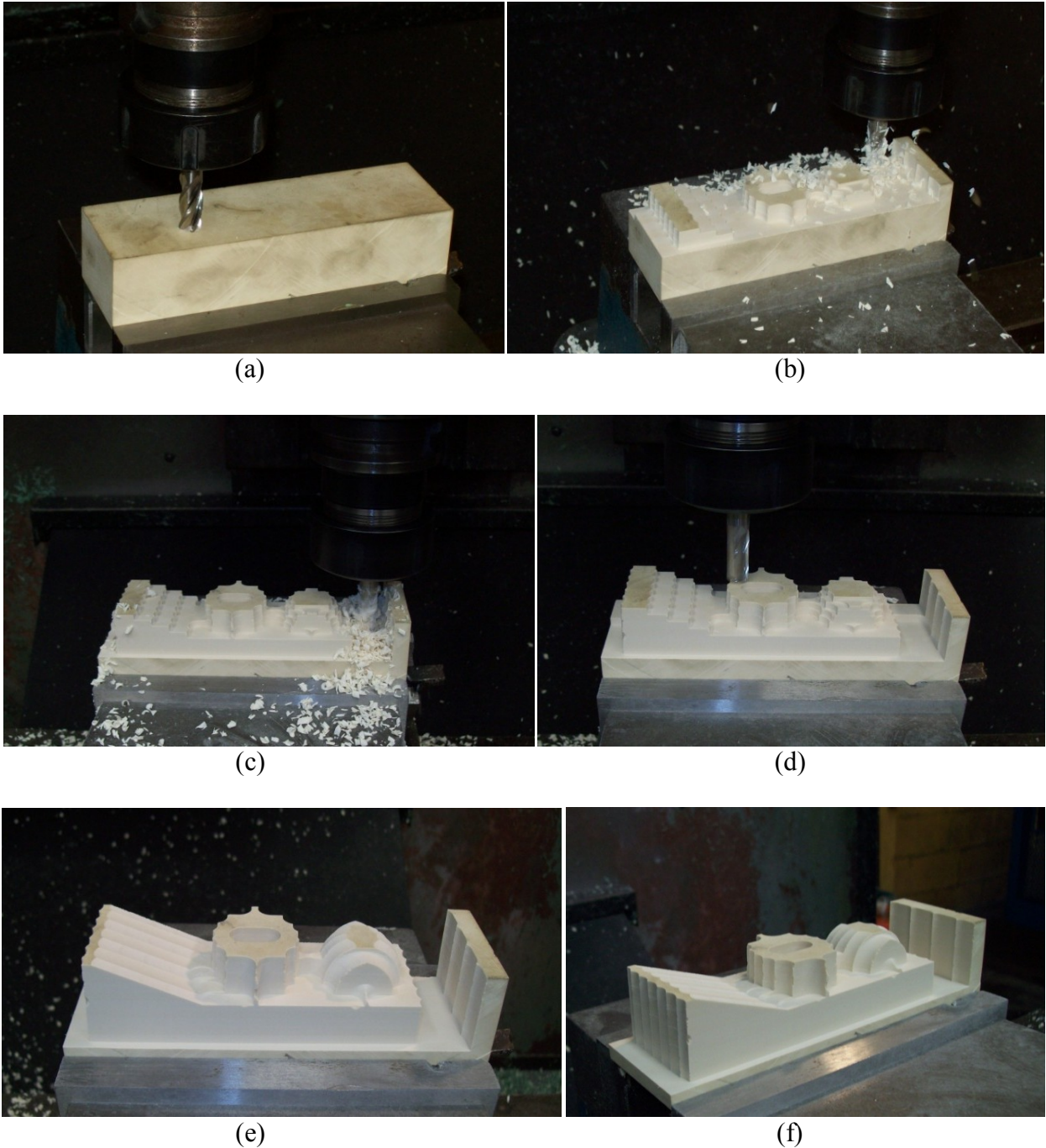


Figura 5.27. Maquinado de desbaste: a) materia prima, b) después de 3 capas de maquinado, c) después de 4 capas de maquinado, d) después de penúltima capa de acabado, e) y f) después de la remoción del efecto escalera, última capa de maquinado.

### Acabado

Para el acabado se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla 5.12a. El número de segmentos fue de 14 779 con una longitud total de 24 457 mm. De acuerdo al sistema, el tiempo

aproximado que tardará en maquinarse la pieza será de 2hr 2min 17s. El tiempo total de ejecución fue de 950.05 s distribuidos de acuerdo a la Tabla 5.12b. La herramienta utilizada para el maquinado real de acabado se muestra en la Figura 5.28.

Herramienta	
Categoría	Esférica
Diámetro	6.35 mm
Radio de esquina	3.175 mm
Longitud	75.0 mm

Velocidad y avance	
Velocidad husillo	1300 rpm
Avance	200 mm/min

Parámetros del maquinado	
Error en dirección de maquinado	0.05 mm
Paso lateral	0.4 mm
Profundidad de corte	-
Capa para acabado	-

Algoritmo	
Discretización	-

Tiempos de cálculo	
Trayectorias	948.922 s
Colisiones	0 s
Pasadas de desbaste	0 s
Generación de código	1.125 s

Tiempo total	950.047 s
--------------	-----------

Información del maquinado	
Número de segmentos	14 779
Longitud de la trayectoria	24 457 mm
Tiempo aproximado de maquinado	2hr 2min 17s

(a)

(b)

Tabla 5.12. Información para el modelo Trial: a) parámetros del acabado, y b) resultados de la generación de trayectorias.



Figura 5.28. Herramienta de punta de bola para acabado, 6.35mm.

Las trayectorias de acabado se muestran en la Figura 5.29. El código generado a partir de esta trayectoria fue utilizado para el maquinado real de acabado. Cabe mencionar que el código que se genera es para ser utilizado directamente en máquinas con control Fanuc, por lo que no se generó ningún error al correr el maquinado en el sistema CNC. La secuencia del maquinado de acabado se muestra a través de las fotografías mostradas en la Figura 5.30.

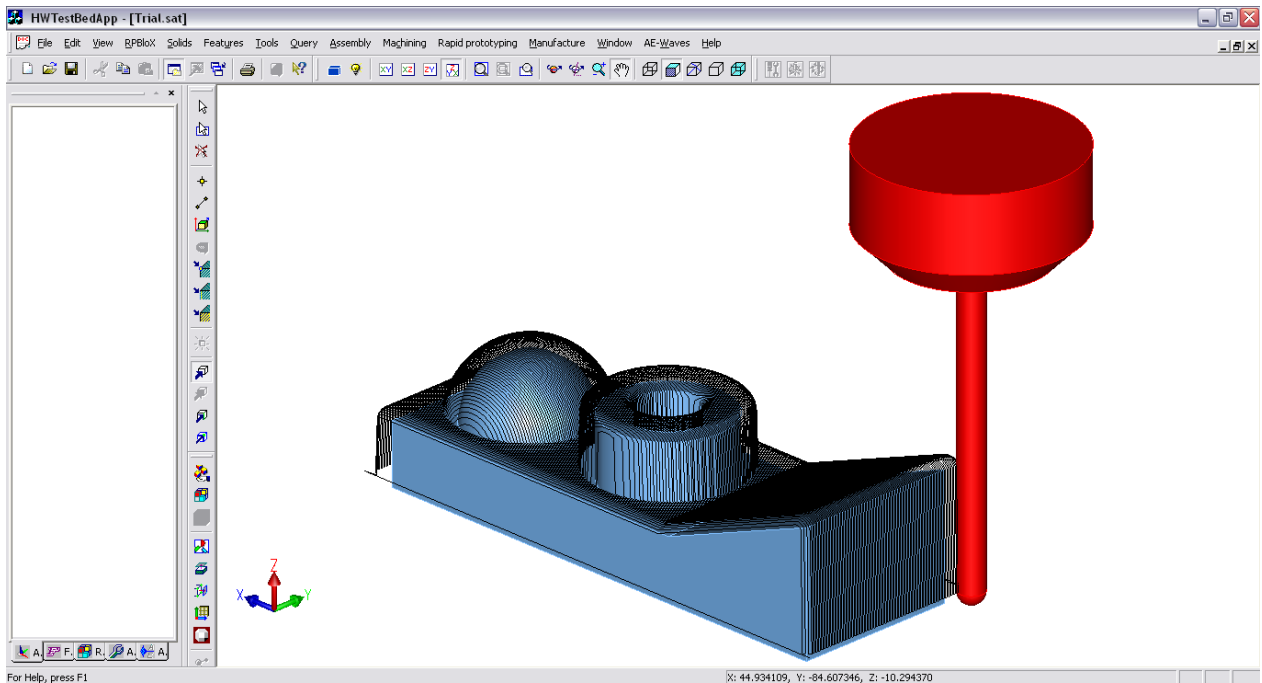
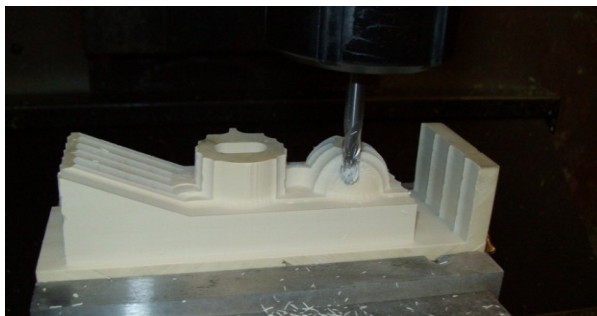
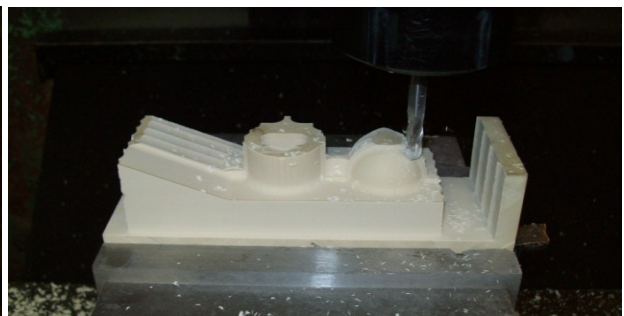


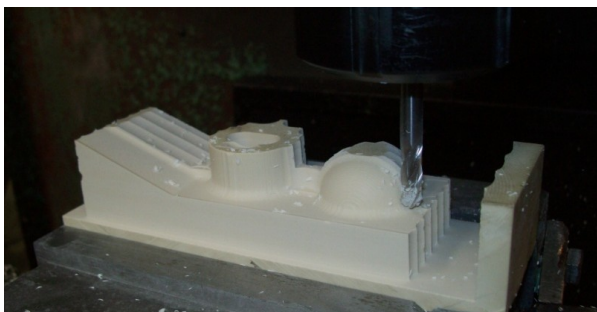
Figura 5.29. Trayectorias de acabado para el modelo Trial.



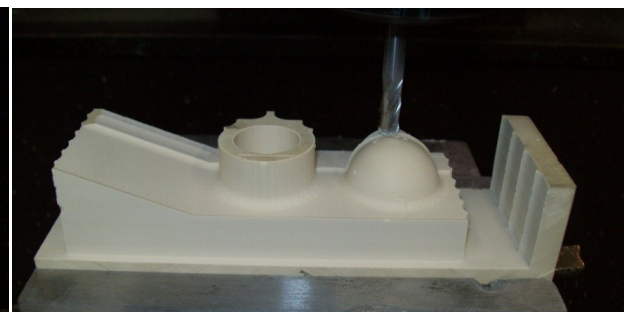
(a)



(b)



(c)



(d)

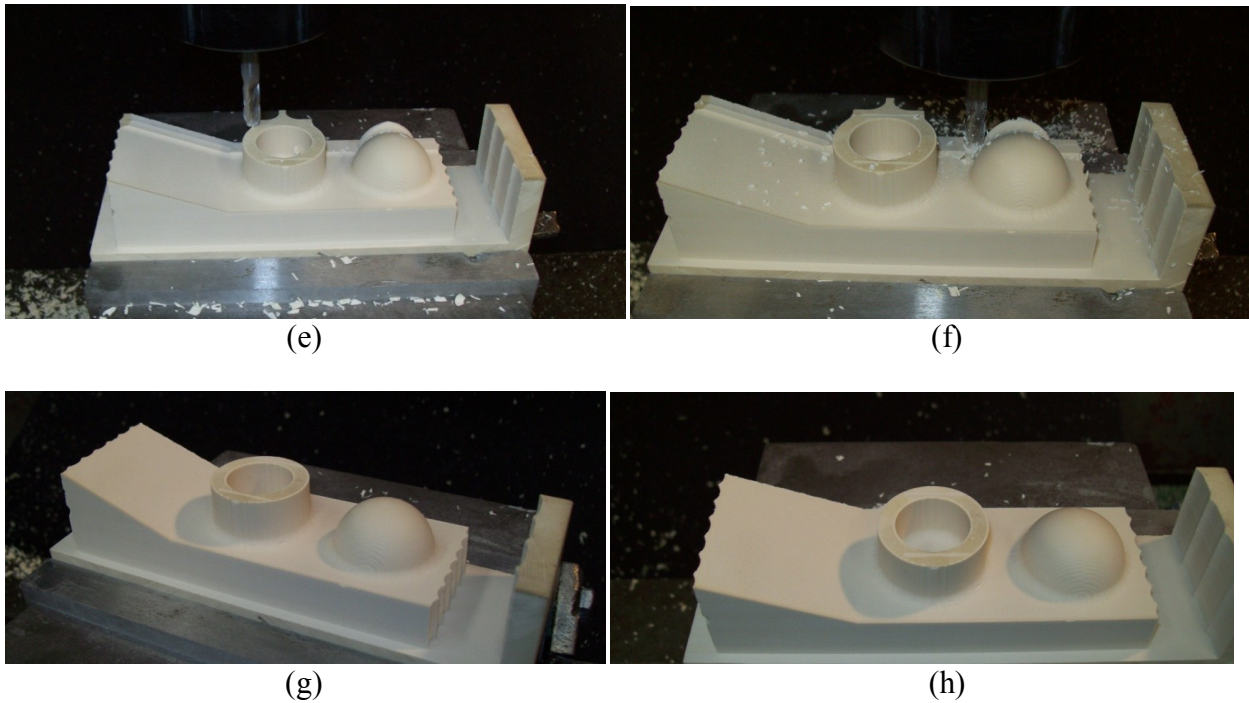


Figura 5.30. Etapas durante el maquinado de acabado: a) y b) después de un cuarto de modelo maquinado, c) y d) después de la mitad del modelo maquinado, e) y f) después de tres cuarto de modelo maquinado, g) y h) modelo completamente maquinado.

### Medición

Finalmente para validar el maquinado y las tolerancias establecidas durante la generación de las trayectorias, se realizó la medición geométrica de la pieza maquinada. La Figura 5.31 muestra la máquina de medición por coordenadas (MMC) de la marca ZEISS modelo Vista 1620-14 DCC utilizada para realizar dichas mediciones.



Figura 5.31. Máquina de medición por coordenadas.

Para comparar las dimensiones finales de la pieza maquinada con las del modelo CAD original, se realizó la Tabla 5.13, donde la primera columna representa la característica a medir (Figura 5.32), la segunda la dimensión teórica obtenida directamente del modelo virtual, la tercera contiene las dimensiones obtenidas de la medición, y la última muestra el error entre lo teórico y lo real. Recordando que la tolerancia especificada fue de 0.05mm, se puede observar que la altura del cilindro es el menor error debido a que en el maquinado de planos horizontales se puede controlar mejor el error. En el caso del diámetro interior, diámetro exterior y diámetro de la esfera, el error es un poco mayor al doble de la tolerancia especificada error, lo cual se puede explicar teniendo en cuenta que la tolerancia fue de 0.05 mm para la superficie; sin embargo, en las características mencionadas son dos lados maquinados los que se midieron, es decir, la tolerancia de 0.05 mm por cada lado, lo cual lleva a que el error máximo esperado sería del doble de este valor (0.1 mm). Finalmente el error en la distancia entre el centro de la esfera y el cilindro es muy bajo debido a que la superficie está cubierta por un error casi constante, por lo tanto los centros se mantienen muy cerca de las posiciones del modelo virtual.

Característica	Dimensión teórica	Dimensión real	Error
Altura cilindro ( $h$ )	15.000 mm	15.0652 mm	0.0652 mm
Diámetro interior cilindro ( $d_i$ )	20.000 mm	20.1348 mm	0.1348 mm
Diámetro exterior cilindro ( $d_e$ )	30.000 mm	29.8736 mm	0.1264 mm
Diámetro esfera ( $d_s$ )	30.000 mm	29.8790 mm	0.1210 mm
Ángulo entre planos ( $\theta$ )	159.4439°	159.5207°	0.0768°
Distancia cilindro-esfera ( $d_c$ )	40.000 mm	40.0220 mm	0.0220 mm

Tabla 5.13. Análisis de dimensiones medidas y reales.

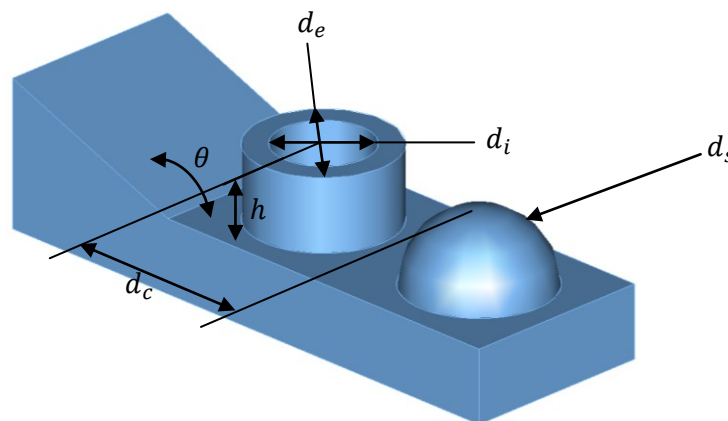


Figura 5.32. Características medidas en el modelo Trial.

En resumen el máximo error medido en el modelo fue de 0.1348 mm, considerando dos superficies maquinadas. Si el error se divide entre dos se obtiene un error de 0.0674 mm para cada una de las superficies maquinadas. La tolerancia especificada fue de 0.05 mm para el modelo, por lo cual el error de maquinado final se obtiene de la diferencia del máximo error obtenido para la superficie (0.0674 mm) y la tolerancia especificada (0.05 mm), dando como resultado un error final de 0.0174 mm. Este error se puede explicar considerando la suma del error generado durante el cálculo de las trayectorias de herramienta, el error debido a la antigüedad de la máquina CNC (cuya precisión no está garantizada debido a factores como el

desgaste de los elementos mecánicos) y del error generado durante la medición debido a la cantidad de datos sensados, capacidad de la máquina MMC y la habilidad del operador. En la Figura 5.32 se pueden observar diferentes posiciones para la toma de datos a partir de los cuales se obtuvieron las medidas de interés.

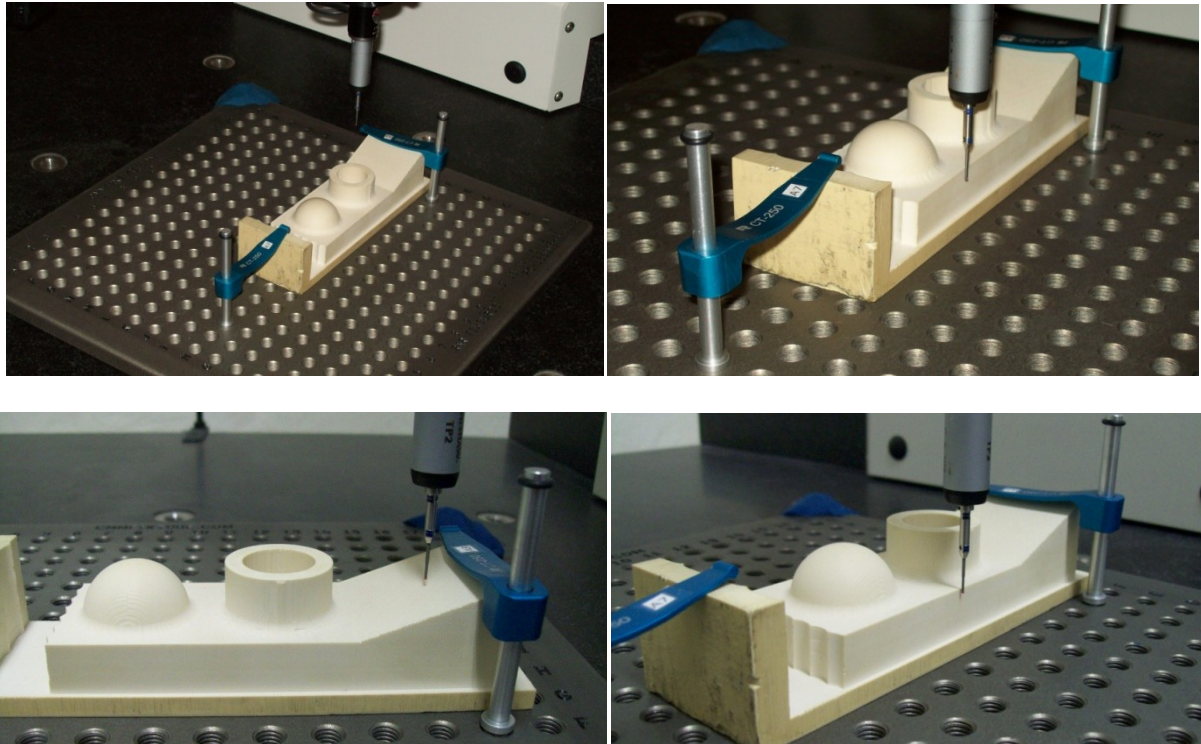


Figura 5.33. Registro de datos en la máquina de medición por coordenadas (MMC).

## 5.2 Discusión

La generación de trayectorias de herramienta para el maquinado de modelos 3D a partir de formas aproximadas y rectangulares fue posible. La habilidad y desempeño del sistema se probó mediante la generación de trayectorias de herramienta para seis modelos de geometría y complejidad variable. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.14 y se discuten en las siguientes secciones.

### 5.2.1 Trayectorias de herramienta

Los resultados de las trayectorias de herramienta muestran que la discretización se realizó de manera adecuada de acuerdo a la calidad de la aproximación de la superficie especificada. La distancia entre planos de discretización fue de 0.1 mm para todos los modelos, lo que significa que para modelos con cambios de dirección suaves como el modelo de superficie de forma libre (Spline), las trayectorias se generan con el error dentro de la tolerancia programada debido a que la mayor pendiente es menor a 60 grados y la herramienta remueve material con la parte esférica, Figura 5.34a. Sin embargo, para modelos con superficies verticales como el Gehause, Trial y Truck, el máximo error con el que se generan las trayectorias es el valor del paso entre planos, como se muestra en la Figura 5.34b, donde se observa que esta zona es maquinada por el cuerpo de la herramienta y no por la parte esférica de corte, teniendo una máxima penetración igual al valor de la distancia entre planos de discretización.

Proceso	Operación	Modelo					
		Gehaeuse	Molde	Camión	Sello	Superficie forma libre	Trial
Bounding box (mm)	-	122x45x35	114x106x27	123x62x62	110x130x95	93x80x42	120x40x30
No. Planos de discretización		450	1 060	620	1 300	800	400
Paso lateral (mm)	Desbaste	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
	Acabado	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.4
No. Planos de cálculo de trayectorias	Desbaste	7	17	10	20	13	7
	Acabado	90	212	124	130	160	100
Diámetro herramienta (mm)	Desbaste	10	10	10	10	10	10
	Acabado	6.35	3.175	6.35	3.175	6.35	6.35
Trayectorias (s)	Desbaste	266.594	634.796	410.375	338.72	195.125	133.868
	Acabado	802.656	567.5	1 150.5	295.891	1 086.57	948.622
Colisiones (s)	Desbaste	0	0	0	250.734	0	0
	Acabado	0	0	0	1 426.01	0	0
Pasadas (s)	Desbaste	0.016	0.047	0.047	0.046	0.32	0.1
	Acabado	0	0	0	0	0	0
Generación de código (s)	Desbaste	9.562	5.235	11.093	14.407	3.125	1.032
	Acabado	2.797	23.359	16.86	13.656	3.453	1.125
Tiempo total (s)	Desbaste	276.172	640.078	421.515	603.907	198.922	135
	Acabado	805.453	590.859	1 167.45	1 735.56	1 089.61	950.047
No. Segmentos	Desbaste	1 348	3 165	2 919	3 345	3 473	1579
	Acabado	8 218	27 276	22 770	6 478	33 882	14 779
Longitud de trayectoria (mm)	Desbaste	20 844	55 473	56 670	119 032	30 308	17 797
	Acabado	26 396	42 492	30 341	27 265	24 625	24 457
Tiempo promedio por plano de trayectoria (s)	Desbaste	38.08	37.34	41.035	16.936	15.01	19.124
	Acabado	8.9184	2.677	9.278	2.276	6.80	9.48

Tabla 5.14. Resumen de resultados obtenidos de las pruebas.



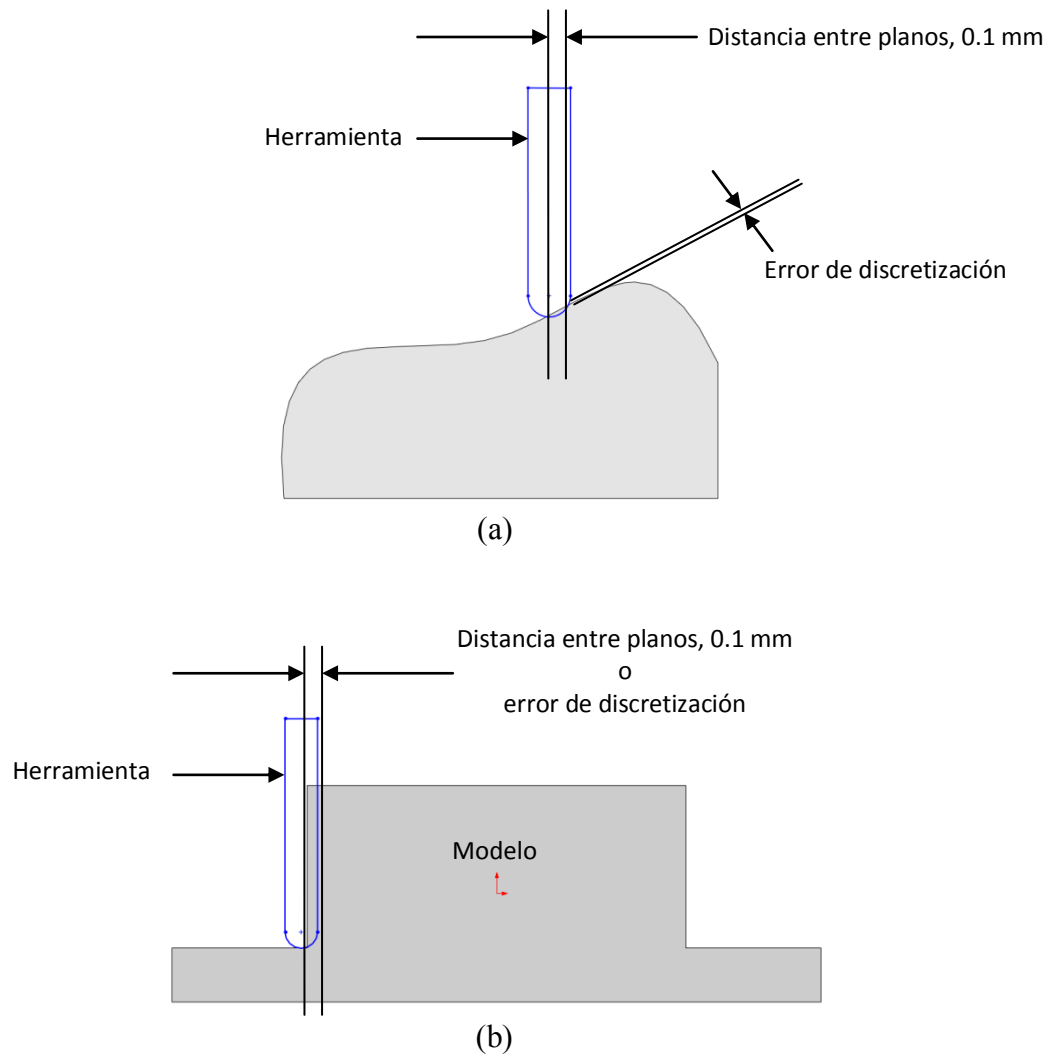


Figura 5.34. Máximo error de discretización.

La última fila de la Tabla 5.14 muestra el tiempo promedio del cálculo de una trayectoria de herramienta. Este tiempo se calcula dividiendo el tiempo que tarda la generación de las trayectorias (fila 6) entre el número de planos de trayectoria (fila 4). De la Tabla 5.14 se puede observar que el tiempo promedio para desbaste de los modelos Gehause, Molde y Camión es muy similar, sin embargo, para los modelos Sello, superficie de forma libre y Trial el tiempo es muy similar entre ellos pero casi la mitad del tiempo promedio de los tres primeros, aun cuando la dimensión del bounding box en la dirección  $X$  es muy similar en todos los modelos. Esta diferencia en los tiempos se debe a que para los primeros tres modelos se calculan la trayectorias sobre la materia prima de forma aproximada y sobre el modelo final, es decir el tiempo total es la suma de los dos cálculos. En cambio para los tres modelos finales se utiliza una materia prima de forma rectangular para la cual las trayectorias se calculan numéricamente a partir de la dimensión de su bounding box y su posición en el sistema global de coordenadas, lo cual es un proceso muy rápido.

Por otra parte, en el acabado sucede algo diferente que en el desbaste. En este caso los tiempos por planos para los modelos Gehause, Camión, Superficies de forma libre y Trial son muy

similares, pero en los modelos del Sello y el Molde el tiempo es significativamente inferior que los otros cuatro modelos. Lo anterior se debe a que los modelos del Sello y el Molde utilizan una herramienta menor que los otros, y cuando se generan las trayectorias se leen todos los planos que están dentro del área proyectada de la herramienta, por lo tanto entre más pequeña sea la herramienta menos planos se tienen que leer y el tiempo es menor.

Durante la generación de las trayectorias se define el paso entre trayectorias de herramienta basado en el error calculado para la cresta, sin embargo, solo se puede calcular para superficies con pendientes menores a  $60^\circ$ . En el caso de superficies con pendientes mayores el utilizar un paso constante genera una distribución no uniforme del error debido a la cresta, como se puede observar en la Figura 5.35. Al igual que durante la discretización este error es máximo cuando el modelo presenta superficies verticales. En ambos casos esto se resuelve utilizando un paso más pequeño entre planos, sin embargo esto incrementa el tiempo de cálculo además de que no es necesario en todo el modelo sino solo donde se requiere. La solución es utilizar un paso adaptivo entre planos paralelos, tanto para la discretización como para las trayectorias.

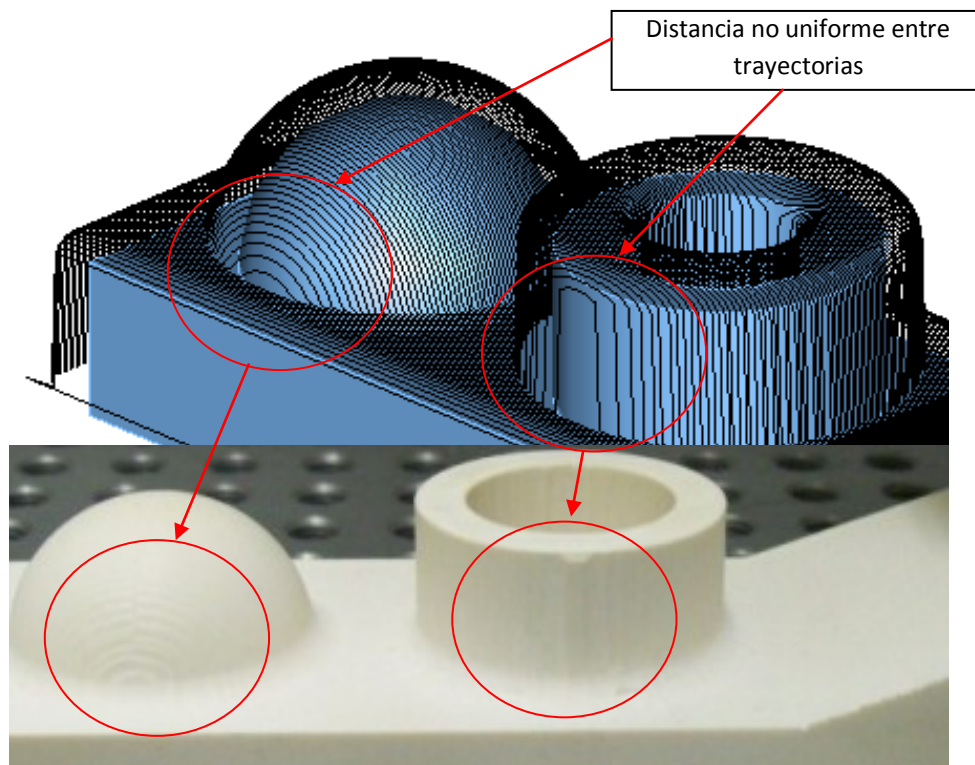


Figura 5.35. Distribución no uniforme de la cresta en el maquinado de acabado.

### 5.2.2 Análisis de colisiones

El análisis de colisiones se realizó para todos los modelos, verificándose su correcto funcionamiento con el modelo del Sello, el cual tiene una altura mayor que la longitud de la herramienta y por lo tanto las posiciones de la herramienta que presentan colisiones son recalculadas para evitar la colisión, Figura 5.17. El tiempo de recálculo de las posiciones es elevado (mayor al cálculo de las posiciones) ya que para reposicionar se utiliza la misma técnica que para la generación de trayectorias pero con área proyectada correspondiente al portaherramientas, la cual es mayor que la correspondiente al diámetro de la herramienta.

### 5.2.3 Generación de pasadas de herramienta (desbaste)

Las pasadas de desbaste calculadas para la herramienta funcionaron de manera correcta en todos los modelos; en ninguno caso se presentaron trayectorias que interfirieran con el material de la pieza final. Además de esto, se logró eliminar el efecto escalera que se obtiene como resultado del maquinado en capas, incluyendo como pasada de desbaste final la trayectoria que se calcula inicialmente para el desbaste y a partir de la cual se calculan las pasadas. Aunque se define una capa de acabado de un valor definido, dicha capa no es constante debido a factores como la distancia entre trayectorias paralelas y paso en la dirección de maquinado, dejando una especie de marcas en surcos; sin embargo se mantiene la condición de no remover material que forma parte de la pieza final.

Por otro lado, se puede observar en los resultados de la Tabla 5.14 que el tiempo de cálculo de las pasadas de desbaste es muy bajo comparado con las demás funciones. Esto se debe a que el algoritmo es completamente numérico y está basado en la intersección de líneas. El tiempo máximo para la generación de las pasadas correspondió al modelo con superficie de forma libre debido a que contiene el mayor número de segmentos.

### 5.2.4 Código de maquinado

El código de maquinado generado utiliza solo interpolación lineal con movimientos a velocidad programada (G01) y movimientos con velocidad máxima (G00). En los modelos utilizados el código de maquinado se generó de manera correcta, verificándose mediante el maquinado real del modelo Trial. El código generado está escrito para controles Fanuc. Para el modelo Trial solamente se utilizaron movimientos con velocidad programada (G01), esto con el fin de actuar rápidamente en caso de algún error del programa o código CNC durante la ejecución.

El código de maquinado generado en el sistema es genérico para máquinas CNC con control Fanuc, por lo que es necesario realizar algunos ajustes al código según la máquina utilizada. Uno de estos ajustes fue el cambio de la posición de la herramienta, ya que por default está programado para utilizar la herramienta ubicada en la posición 1, H1, y en el caso particular de la máquina utilizada la herramienta se colocó en la posición número 6 (H6), y previamente se le asociaron los valores de compensación del radio y longitud de la herramienta a dicha posición. Otro ajuste fue la configuración del cero pieza o coordenadas de trabajo para que coincidiera con el utilizado en el programa propuesto, dichas coordenadas de trabajo se ubicaron en la posición G57. Originalmente el código utiliza la posición de coordenadas de trabajo por el código G58, por lo que se cambió por el G57 que es donde se guardaron las coordenadas de trabajo. Tanto la velocidad de avance como el giro del husillo también se modificaron de acuerdo a la experiencia de las personas que auxiliaron en el proceso de maquinado.

El tiempo estimado por el sistema para el maquinado de desbaste fue de 1hr 25min 54s y el tiempo real de maquinado fue 47 min, prácticamente la mitad del tiempo estimado. Una de las principales razones de esta diferencia es porque el tiempo estimado se calcula en base a una velocidad de avance constante, sin embargo durante el maquinado la velocidad de avance se fue modificando por medio del control manual del avance de acuerdo a experiencia de las personas que auxiliaron en el maquinado. Por otro lado, el tiempo estimado de maquinado para el acabado fue de 2hr 2min 17s, y el tiempo real de este maquinado fue 3hr 7min. A diferencia del desbaste, en el acabado el tiempo real fue mayor al calculado. En esta operación la velocidad de avance no se modificó manualmente, es decir, se utilizó la programada. En el caso particular del acabado la

esfera y las aristas del cilindro del modelo maquinado (Trial) están aproximadas por una gran cantidad de segmentos lineales, por lo que el control de la máquina CNC tiene que calcular la velocidad de los motores en cada dirección para que el movimiento resultante se ejecute a la velocidad programada. Además, la máquina CNC se acelera y desacelera en cada segmento, tardando más tiempo del calculado.

Finalmente la pieza maquinada se midió en una máquina de medición por coordenadas y se obtuvo que el máximo error obtenido en el modelo fue de 0.0174 mm considerando la tolerancia especificada. Las principales causas de este error pueden ser: el error de cálculo en la generación de las trayectorias de la herramienta; la antigüedad de la máquina CNC y por consecuencia el desgaste de los elementos mecánicos; el error generado durante la medición debido a la cantidad de datos sensados, la capacidad de la máquina MMC y la habilidad del operador de la máquina.

# Conclusiones

---

Con el presente trabajo de tesis se logró desarrollar un sistema para la generación automática de trayectorias de herramienta para el maquinado de piezas o componentes a partir de materia prima con forma regular o con forma aproximada a la final (near net shape). Varios algoritmos para la generación de trayectorias, tanto para maquinado de desbaste como maquinado de acabado, fueron propuestos y evaluados, identificándose ventajas y desventajas de cada uno de ellos. También se desarrolló el algoritmo para la generación del código CNC correspondiente a las trayectorias de herramienta. La implementación de todos los algoritmos se realizó en la plataforma HWTesBedApp, la cual está hecha en el lenguaje Visual C++ y utiliza ACIS® como modelador geométrico. Para probar el sistema y evaluar su desempeño se seleccionaron seis modelos de forma y complejidad variable, uno de los cuales se llevó hasta el maquinado real en un sistema CNC. Los resultados demostraron que el sistema desarrollado es efectivo y por lo tanto puede ser utilizado para la manufactura CNC de componentes a partir de formas regulares o aproximadas de materia prima. Es importante mencionar que aun cuando el sistema desarrollado considera la generación del código CNC, las trayectorias de maquinado pueden ser exportadas para su uso en cualquier otra aplicación tal como prototipado rápido o sistemas robóticos.

Algunas de las conclusiones más relevantes de este trabajo se resumen a continuación:

## a) Generación de trayectorias de herramienta

Se presentaron y desarrollaron tres métodos para el cálculo de las trayectorias de herramienta, los cuales fueron:

1. Offset del modelo CAD
2. Posicionamiento por iteración
3. Discretización de la superficie

De la implementación y análisis de los tres métodos, se obtuvo que los dos primeros solo funcionan para piezas sencillas, además de presentar la desventaja de tener un tiempo de procesamiento muy elevado cuando el número de posiciones es grande. Esto se debe principalmente a que ambos métodos están basados en operaciones booleanas. De la misma manera, también presentan el inconveniente de solo poder ser utilizados con herramienta de punta de bola. Ambos métodos resultaron ser opciones poco eficientes para el cálculo de las trayectorias.

El tercer método está basado en la discretización de la superficie del modelo por medio de puntos, a partir de los cuales se realiza el cálculo de las posiciones de la herramienta así como el análisis de colisiones. Con este método el tiempo de cálculo para gran cantidad de posiciones es bajo comparado con los dos primeros métodos. Además se logró la flexibilidad de utilizar tres tipos de herramientas, punta de bola, plana y filete, con solamente cambiar un parámetro. La funcionalidad del algoritmo se demostró mediante el cálculo de trayectorias tanto de desbaste como de acabado de seis modelos diferentes. Los resultados se validaron mediante el maquinado real de un componente utilizando las trayectorias calculadas con este método.

**b) Generación de pasadas de desbaste**

La generación de pasadas de desbaste se basa en la intersección de segmentos de líneas rectas que forma la trayectoria generada sobre el modelo y líneas horizontales que representan las pasadas. El tiempo de procesamiento resultó muy bajo debido a que el proceso es completamente numérico. Además de esto, se logró eliminar el efecto escalera que se obtiene como resultado del maquinado en capas, incluyendo como pasada de desbaste final la trayectoria que se calcula inicialmente para el desbaste y a partir de la cual se calculan las pasadas.

**c) Análisis de colisiones**

El algoritmo propuesto para el análisis de colisiones del portaherramientas se basa en consideraciones geométricas simples, y no requiere operaciones booleanas las cuales tienen un alto costo computacional. Al algoritmo se probó utilizando un modelo con una altura mayor a la longitud de la herramienta. Los resultados mostraron que aquellas posiciones que presentan colisión son recalculadas hasta obtener posiciones libres de colisiones. Sin embargo, el proceso resultó más lento que la generación de posiciones de herramienta debido a que para cada posición analizada se leen todos los puntos que estén dentro del área proyectada del diámetro del portaherramientas.

**d) Generación de código**

A partir de las trayectorias de herramienta, desbaste y acabado, se logró la generación del código CNC para el maquinado de las piezas. Para la validación de las trayectorias de herramienta y código CNC, se realizó el maquinado real de un modelo a partir de una materia prima rectangular y utilizando el programa CNC generado por el sistema desarrollado. De acuerdo a la máquina CNC utilizada, se realizaron algunos ajustes al código generado: número de herramienta utilizada, la selección adecuada del sistema de coordenadas, así como el cambio de formato \*.TXT y al formato \*.NC. Con esto se demostró que el código CNC generado puede fácilmente ser configurado para diferentes tipos de máquinas y controladores CNC.

**e) Evaluación del sistema**

El maquinado real de un modelo se realizó en un sistema CNC de tres ejes. Los resultados obtenidos mostraron que las trayectorias se generan de manera correcta. Para verificar la calidad de las trayectorias de herramienta generadas, se realizó la medición de la pieza utilizando una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC). Los resultados de dichas mediciones arrojaron que el máximo error entre lo programado y lo real fue de 0.0174 mm. Se observó que en las superficies que tienen una pendiente mayor a 60° el error se encuentra fuera de la tolerancia especificada debido a la distribución no-uniforme de la cresta. Una posible solución a este problema es seleccionar un paso entre trayectorias más pequeño para disminuir el error en dichas superficies, sin embargo, en superficies con pendientes menores a 60° se incrementaría el maquinado redundante volviéndose una solución ineficiente. Otra solución es utilizar un paso adaptivo de acuerdo a la superficie donde se está generando la trayectoria. Finalmente es importante mencionar que el error evaluado es el resultado de la suma de los errores a lo largo de todos los procesos, que incluye la generación de trayectorias, el maquinado y los errores en la medición.

### Trabajo futuro

Con el objetivo de mejorar la capacidad y desempeño en la generación de trayectorias de herramienta, se identifican los siguientes puntos a desarrollar como trabajo futuro:

- 1) Optimización de los algoritmos para la generación de trayectorias. El algoritmo actual tiene la desventaja de re-leer muchas veces los puntos para generar posiciones contiguas, sobre todo cuando se utiliza un paso pequeño. Esto se traduce directamente en tiempo de cómputo. El trabajo futuro considera la optimización de este algoritmo, a través de la predicción de posiciones tomando en cuenta la forma de la superficie.
- 2) Adaptabilidad de la discretización y de las trayectorias en planos paralelos. Cuando se presentan superficies con pendientes grandes, entre 60 y 90 grados, el error se maximiza tanto para la discretización como para las trayectorias en la dirección perpendicular a la del maquinado. Este problema puede disminuirse considerablemente o eliminarse utilizando un algoritmo adaptivo en base al error generado en ambos casos.
- 3) Estrategias de maquinado en contornos. La estrategia de maquinado utilizada en este trabajo fue zigzag bidireccional por ser la más sencilla de implementar; sin embargo, una de las estrategias más utilizadas es la de contornos por tener un mejor desempeño. Por tanto se considera su implementación como trabajo futuro.
- 4) Interpolación circular. Para disminuir el código de maquinado así como aumentar la calidad de la superficie se pretende generar códigos de maquinado que utilicen además de la interpolación lineal la interpolación circular.
- 5) En este trabajo solo se consideraron aspectos geométricos y cinemáticos del maquinado, sin embargo, como trabajo futuro se considera el análisis de otros factores dinámicos y mecánicos que afectan el acabado superficial y la precisión dimensional. Algunos de estos factores son: desgaste de la herramienta y su compensación mediante la calibración durante el proceso, vibraciones causadas durante el maquinado debido las fuerzas de corte y longitud de la herramienta, dureza tanto del material de trabajo como de la herramienta de corte, así como otros efectos dinámicos.

# Referencias

- [1] D.T. Pham, R.S. Gault, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies", *International Journal of Machine, Tools and Manufacture* 38 (1997), pp. 1257-1287.
- [2] H. Medellín, "Assembly-Based Rapid Production of Near Net Shape Components through Octree Decomposition of 3D Models", Doctoral's thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, December 2005.
- [3] Mikell P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing", John Wiley and Sons, Inc, 1997.
- [4] H. Medellín, J. Corney, J.B.C. Davis, T. Lim, J.M.Ritchie, "Rapid Prototyping Through Octree Decomposition of 3D Geometric Models", ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 28 – October 4, 2004, Salt Lake City, Utah, USA.
- [5] Kalpakjian, Schmid, "Manufactura, ingeniería y tecnología", Prentice Hall, 2002.
- [6] John A. Shey, "Procesos de manufactura", McGraw-Hill, 2002.
- [7] Peter Smid, "CNC Programming Handbook ; A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming", Industrial Press Inc., Second Edition, 2003.
- [8] Rotating tools: Milling, SandVik Coromant, 2012.
- [9] Zixian Zhang, Maria Savchenko, Ichiro Hagiwara, Bingyin Ren, "3-Axis NC Tool Path Generation and Machining Simulation for Subdivision Surface of Complex Models", *International Journal of CAD/CAM* 10(2010), pp. 1-9.
- [10] Heo, E.Y., D.W. Kim, B.H. Kim, D.K. Jang, F.F. Chen, "Efficient rough-cut plan for machining an impeller with a 5-axis NC machine." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2008), pp. 971-983.
- [11] Chuang, L.C., H.T. Young. "Integrated rough machining methodology for centrifugal impeller manufacturing." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34 (2007), pp. 1062-1071.
- [12] Dong-Soo Kim, Cha-Soo Jun, Sehyung Park, "Tool path generation for clean-up machining by a curve-based approach", *Computer-Aided Design* 37 (2005), pp. 967–973
- [13] Yongfu Ren, Hong Tzong Yau, Yuan-Shin Lee, "Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex polyhedral models", *Computers in Industry* 54(2004), pp. 17-33.
- [14] Choi Y. K., "Tool path generation and 3D tolerance analysis for free-form surfaces, Doctoral's thesis, Texas A&M University, may 2004.
- [15] Loney GC, Ozsoy TM. "NC machining of free form surfaces", *Computer-Aided Desing*, 19(1987), pp. 85-90.
- [16] Daniel C.H. Yang, J.J. Chuang, Z. Han, S. Ding., "Boundary-conformed toolpath generation for trimmed free-form surfaces via Coons reparametrization", *Journal of Materials Processing Technology*, 138(2003), pp. 138-144.
- [17] Choi JH, Kim JW, Kim K., "CNC tool path planning for multi-patch sculptured surfaces", *International Journal of Prodcution Research* 38(2000), pp.1677-1687.
- [18] Elber G. Cohen E., " Toolpath generation for freeform surface models", *Computer-Aided Design* 26(1994), pp. 490-496.



- [19] Lee SG., Kim HC, Yng MY., “Mesh-based tool path generation for constant scallop-height machining”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(2008), pp.15-22.
- [20] Bobrow JE. “NC machine tool path generation from CSG part representations”, *Computer-Aided Design* 17(1985), pp. 69-76.
- [21] Huang Y. Oliver JH. “Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 9(1994), pp.281-290.
- [22] Faux I., Pratt MJ. “Computational geometry for design and manufacture” Chichester, UK: Ellis Horwood, 1980.
- [23] Choi BK, “Compound surface modelling and machining”, *Computer-Aided Design* 20(1988), pp. 127-136.
- [24] Hwang JS. “Interference-free toolpath generation in the NC machining of parametric compound surfaces”, *Computer-Aided Design* 24(1992), pp. 667-676.
- [25] Dong Z. Li H. Vickers GW., “Optimal rough machining of sculptured parts on a CNC milling machine”, *Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry* 115(1993), pp. 424-431.
- [26] Lee YS., Choi BK, Chang TC., “Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining”, *international Journal of Production Research* 30(1992), pp.1447-1470.
- [27] Li H, Dong Z, Vickers GW., “Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis”, *Computer-Aided Design* 26(1994), pp.787-795.
- [28] Han ZL., Yang DCH., “Iso-phot based tool path generation for machining free-form surfaces”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME Transaction* 121(1999), pp. 656-664.
- [29] Suresh, K. Yang, D.C.H., “Constant scallop-height machining on free-form surface”, *ASME journal of Engineering for Industry*, 116(1994), pp. 253-259.
- [30] Lin, R.S., Koren, Y., “Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces, *Transaction of the ASME- Journal of Engineering for industry*, 118(1996), pp. 20-28.
- [31] Feng, H.Y., Li, H., “Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured surface machining”, *Computer-Aided Design*, 34(2002), pp. 647-654.
- [32] Yoon, J.H., “Fast tool path generation by scallop-height method for ball-end milling of sculptured surfaces”, *International Journal of Production Research*, 43(2005), pp. 4989-4998.
- [33] Choi B., Jerrard R., “Sculptured Surface Machining: Theory and Applications”, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [34] Tao Chen, Zhiliang Shi, “A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces”, *Journal of Materials Processing Technology*, 208(2008), pp. 259-263.
- [35] Vivek Pal Singh, “Tool Path Planning for 3-axis NC-milling Lathe and 3-axis NC-vertical Milling for Sculptured Surfaces Machining Using Triangular Mesh Offset”, Master’s thesis, Mechanical Engineering Department, Thapar University Patiala, 2009.
- [36] Kondo, T., Kishinami, T., Saito, K. “Machining system based on Inverse Offset Method”, *Journal of Japan Society of Precision Engineering* 54(1988), pp. 971-976.
- [37] F. Eugenio López G., Rafael Colás O., Francisco Ramírez C., Klaus Rall, “Generación de código de maquinado en 3D para modelos basados en mallas”, *Ingenierías* 4(2001), pp. 13-20.

- [38] Maqsood Ahmed Khan, "Piecewise Arc-Length parameterized NURBS Tool Paths Generation for 3-Axis CNC Machining of Accurate, Smooth Sculptured Surfaces", Doctoral's thesis, Concordia University Montreal Quebec, Canada, 2010.
- [39] D.C.H. Yang, Z. Han, "Interference detection and optimal tool selection in 3-axis NC machining of free-form surfaces" *Computer-Aided Design* 31 (1999), pp. 303-315.
- [40] Wright P. K., Dornfeld D., Sundararajan V., Mishra D., "Tool Path Generation for Finish Machining of Freeform Surfaces in the Cybercut Process Planning Pipeline", *Transactions of the North American Mfg. Research Institution of SME* 2004, 32 (2004), pp. 159-166.
- [41] Kim B. H., Choi B. K., "Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with countour-parallel tool path", *Computer-Aided Design* 34 (2002), pp. 89-95.
- [42] Lasemi A., Xue D., Gu P., "Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review" *Computer-Aided Design*, 42 (2010), pp. 641-654.
- [43] B. K. Choi, C. S. Jun, "Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surface", *Computer-Aided Design*, 21 (1989), pp. 371-378.
- [44] Y. S. Suh and K. Lee, "NC milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces", *Computer-Aided Design*, 22 (1990), pp. 273-284.
- [45] S. Ding, M. A. Mannan, A. N. Poo, D.C.H. Yang, Z. Han, "Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces", *Computer-Aided design* 35 (2003), pp. 141-153.
- [46] Lai J. Y., Wang D. J., "A strategy for finish cutting path generation of compund surfaces", *Computers in Industry*, 25 (1994), pp. 189-209.
- [47] Frank, M., Joshi, S. B., Wysk, R. A., "CNC-RP: A Technique for Using CNC Machining as a Rapid Prototyping Tool in Product/Process Development", *Proceedings of the 11th Annual Industrial Engineering Research Conference, Orlando, Florida, May 2002*, pp.19-22.
- [48] Dragan M., Milos G., Nikola S., Zoran D., Sasa Z., Branko K., Ljubodrag T., "Reconfigurable Robotic Machining Sytem Controlled and Programmed in a Machine Tool Manner", Springer-Verlag London Limited 2010. September 2010..
- [49] Choi Y. K., "Tool path generation and 3D tolerance analysis for free-form surfaces, Doctoral's thesis, Texas A&M University, may 2004.
- [50] Kai Tang, Shuo-Yan Chou and Lin-Lin Chen, "An algorithm for reducing tool retraction in zigzag pocket machining", *Computer-Aided Design* 30 (1998), pp. 123-129.
- [51] Misra, D., Sundararajan, V., Wright, P. K., "Zig-Zag Tool Path Generation for Sculptured Surface Finishing", *Dimacs Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science* 67 (2005), pp. 265-280.
- [52] Ren, Lan, Ajay Panackal Padathu, Ruan, Jianzhong, Sparks, Todd and Liou, Frank W., "Three dimensional die repair using a hybrid manufacturing system," *Proceedings of the Seventeenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, August 14-16, 2006*.
- [53] F. Eugenio López G., Rafael Colás O., Francisco Ramírez C., Klaus Rall, "Generación de código de maquinado en 3D para modelos basados en mallas", *Ingenierías* 4 (2001), pp. 13-20.
- [54] W.C. Tse, Y.H. Chen, "A robotic system for rapid prototyping", *proceedings 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, April 1997*.
- [55] Circle through three points. Año de consulta 2012. <http://shuisman.com/?p=361>.

- [56] D'Souza RM, Sequin C, Wright PK, "Automated tool sequence selection for 3-axis machining of free-form pockets" *Computer-Aided Design* 36 (2004), pp. 595-605.
- [57] Lee YS, Choi BK, Chang TC, "Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining", *International Journal of Production Research* 30 (1992), pp. 1447-1470.
- [58] Wang Y, Ma HJ, Gao CH, Xu HG, Zhou XH, "A computer aided tool selection system for 3D die/mould-cavity NC machining using both a heuristic and analytical approach", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 18 (2005), pp. 686-701.
- [59] Peter Smid, "Fanuc CNC Custom Macros: Programming Resources for Fanuc Custom Macros B Users", Industrial Press, Inc. 2005.
- [60] Francisco Cruz Teruel, "Control Numérico y Programación", Alfaomega, 2007.
- [61] Spatial Technology Inc., Three-Space, Ltd., and Applied Geometry Corp., 2425 5<sup>th</sup> Street Building A, Boulder, CO 80301-5740. ACIS® Geometric Modeler, version 7.0.
- [62] SANDVIK, Coromant, Cutting tools from Sandvik Coromant, 2012.

# Apéndices

## A. Códigos G

<b>Códigos G</b>	<b>Función</b>
G00	Avance rápido
G01	Interpolación lineal (avance de maquinado)
G02	Interpolación circular horaria
G03	Interpolación circular anti-horaria
G04	Espera para la puerta de la fresadora
G09	Parada exacta
G10	Colocar el cero del programa
G11	Cancelar modo cero del programa
G17	Seleccionar plano XY
G18	Seleccionar plano ZX
G19	Seleccionar plano YZ
G20	Entrada de datos en pulgadas
G21	Entrada de datos en milímetros
G27	Chequear el cero de máquina o la posición de referencia (home)
G28	Ir a la posición de referencia de la máquina (home)
G29	Regresar al punto de referencia
G30	Regresar al segundo punto de referencia
G31	Saltar una función
G33	Corte para rosca
G39	Interpolación circular en esquinas
G40	Cancelar compensación en el corte
G41	Compensación en el corte a la izquierda
G42	Compensación en el corte a la derecha
G43	Compensación en la longitud de la herramienta
G44	Compensación en la longitud de la herramienta
G49	Cancelar compensación en la longitud de la herramienta
G50	Cancelar la escala
G51	Escala
G54	Selección del sistema 1 de coordenadas de trabajo
G55	Selección del sistema 2 de coordenadas de trabajo
G56	Selección del sistema 3 de coordenadas de trabajo
G57	Selección del sistema 4 de coordenadas de trabajo
G58	Selección del sistema 5 de coordenadas de trabajo
G59	Selección del sistema 6 de coordenadas de trabajo
G60	Posición en una sola dirección
G61	Parar modo exacto
G62	Sistema de control en el modo automático en las esquinas
G63	Modo de roscado
G64	Modo de corte
G65	Llamado de marcos

G66	Esperar señal
G67	Esperar cancelación de la señal
G68	Coordinar rotación
G69	Cancelar coordinar rotación
G73	Avance rápido en el ciclo de perforado
G74	Ciclo de perforado con velocidades de corte
G76	Roscado
G80	Cancela el ciclo
G81	Ciclo de perforado sencillo
G82	Taladrado con tiempo de espera en el fondo
G83	Profundidad del agujero en el ciclo de perforado
G84	Ciclo de roscado
G85	Ciclo para ampliar agujeros
G86	Ciclo para ampliar agujeros
G87	Regresar al ciclo de ampliar agujeros
G88	Ciclo de ampliar agujeros
G89	Ciclo de ampliar agujeros
G90	Coordenadas absolutas
G91	Coordenadas incrementales
G92	Desplazamiento hasta el origen del sistema
G94	Velocidad de avance en mm / min
G95	Velocidad de avance en rev / min
G98	Regresar al nivel inicial
G99	Regresar al punto R

## B. Códigos M

<b>Códigos M</b>	<b>Función</b>
M00	Para el programa
M01	Parar opcionalmente
M02	Reset programa
M03	Encender Husillo horario
M04	Encender husillo anti-horario
M05	Apagar el husillo
M06	Cambio automático de herramienta
M07	Refrigeración "B" on
M08	Refrigeración "A" on
M09	Apagar refrigeración
M10	Abrir Prensa
M11	Cerrar prensa
M13	Husillo hacia delante y refrigerante encendido
M14	Husillo hacia atrás y refrigerante encendido
M15	Programa de entrada usando MIN P
M19	Orientación del husillo
M20	ATC Coger herramienta
M21	ATC Sacar herramienta
M22	ATC Bajar herramienta
M23	ATC Subir herramienta
M27	Reset el carrusel al bolsillo uno
M28	Reset el carrusel en la posición del bolsillo
M29	Seleccionar DNC modo
M30	Reset y Reactivar programa
M31	Incrementar conteo de partes
M37	Abrir la puerta en una parada
M38	Abrir puerta
M39	Cerrar puerta
M40	Extender atrapado de partes
M41	Retraer atrapado de partes
M48	Mirar porcentaje de avance al 100%
M49	Cancelar M48
M62	Salida auxiliar 1 encendida
M63	Salida auxiliar 2 encendida
M64	Salida auxiliar 1 apagada
M65	Salida auxiliar 2 apagada
M66	Esperar la salida auxiliar 1 encendida
M67	Esperar la salida auxiliar 2 encendida
M68	Lleva al robot a la posición Home
M70	Espejo en X encendido
M71	Espejo en Y encendido
M73	Espejo en IV encendido
M76	Esperar la salida auxiliar 1 apagada