



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **FABRICACIÓN DE SOCKETS DE PRÓTESIS POR MECANIZADO CNC**

**DIEGO RAMIRO LABAYRU MAGOFKE**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**LUCIANO CHIANG SÁNCHEZ**

Santiago de Chile, Marzo, 2008

© 2008, Diego Labayru Magofke



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **FABRICACIÓN DE SOCKETS DE PRÓTESIS POR MECANIZADO CNC**

**DIEGO RAMIRO LABAYRU MAGOFKE**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**LUCIANO CHIANG SÁNCHEZ**

**DIEGO CELENTANO**

**LUIS OLIVARES PASTÉN**

**LUIS CERDA ORTIZ**

**ALDO CIPRIANO ZAMORANO**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Marzo, 2008)

A mis padres...

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Marcelo Sepúlveda, jefe del taller de prótesis y órtesis de la Teletón, así como a los protesistas que ahí trabajan, quienes fueron un gran aporte para mi aprendizaje acerca de la fabricación de prótesis. Reconozco también el gran apoyo brindado por Luis Silva (Beto) como operador del centro de mecanizado CNC de la Universidad. Finalmente agradezco el apoyo constante de mi profesor guía Luciano Chiang durante el desarrollo de este trabajo.

## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
INDICE DE TABLAS .....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. FABRICACIÓN DE PRÓTESIS .....	3
3. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE HERRAMIENTA .....	12
3.1. Métodos con ajuste de curvas/superficies.....	13
3.2. Métodos de parametrización.....	14
3.3. Métodos directos.....	15
4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	21
4.1. Orientación del objeto.....	23
4.2. Generación de curva de contorno .....	23
4.3. Generación de trayectorias de herramienta.....	31
4.4. Generación del código ISO para la máquina CNC.....	33
5. INTERACCIÓN CON EL USUARIO .....	35
6. RESULTADOS .....	38
7. CONCLUSIONES.....	48
8. BIBLIOGRAFÍA .....	50
A N E X O S.....	53

Anexo A : Extracto comentado del código CNC obtenido .....	54
------------------------------------------------------------	----

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 6.1: Propiedades de mecanizado .....	41

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Fabricación manual de molde.....	2
Figura 2.1: Sección tibial modificada .....	3
Figura 2.2: Sistema CAPOD .....	4
Figura 2.3: Secuencia de fabricación de socket con molde de arena .....	5
Figura 2.4: Media sección de corte del diseño de socket de doble pared .....	6
Figura 2.5: Palpador Seattle Limb Systems .....	7
Figura 2.6: Sistema de fabricación de socket Seattle Limb Systems .....	8
Figura 2.7: Sistemas scanner 3D.....	9
Figura 2.8: Scanner FastScan.....	10
Figura 2.9: Cilindros de espuma y centro de mecanizado CNC BioSculptor .....	10
Figura 3.1: Altura de crestas .....	13
Figura 3.2: Dominio físico y paramétrico .....	15
Figura 3.3: Diferente calidad superficial según pendiente.....	16
Figura 3.4: Método iso-planar adaptable según pendiente.....	17
Figura 3.5: Mapa-Z .....	18
Figura 4.1: Proceso de fabricación de socket.....	21
Figura 4.2: Proceso de generación de código CNC .....	22
Figura 4.3: Generación curva de contorno .....	23
Figura 4.4: Obtención de $d\theta$ .....	24

Figura 4.5: Representación paso de herramienta .....	25
Figura 4.6: Selección puntos bajo proyección de herramienta .....	26
Figura 4.7: Puntos bajo proyección de herramienta.....	27
Figura 4.8: Compensación de altura de herramienta.....	28
Figura 4.9: Distancia entre un punto y una esfera.....	29
Figura 4.10: Puntos curva de contorno.....	31
Figura 5.1: Orientación de objeto.....	35
Figura 5.2: Selección límites de interés .....	36
Figura 5.3: Ingreso características de herramienta.....	37
Figura 6.1: Molde de yeso fabricado manualmente .....	38
Figura 6.2: Montaje cilindro de pedilén, vista lateral .....	39
Figura 6.3: Montaje cilindro de pedilén, vista frontal.....	39
Figura 6.4: Eliminación de puntos fuera del límite de mecanizado .....	40
Figura 6.5: Curva de contorno de desbaste .....	42
Figura 6.6: Curva de contorno de acabado.....	42
Figura 6.7: Etapa de desbaste.....	43
Figura 6.8: Molde de pedilén recién mecanizado .....	44
Figura 6.9: Molde de pedilén, vista lateral.....	45
Figura 6.10: Molde de pedilén, vista frontal .....	45
Figura 6.11: Socket fabricado a partir de molde de pedilén, vista frontal .....	46
Figura 6.12: Socket fabricado a partir de molde de pedilén, vista lateral .....	46

Figura 6.13: Socket fabricado a partir de molde de pedilén, vista posterior..... 47

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta un nuevo método para la fabricación de moldes de sockets para prótesis. El socket es la pieza donde se encaja el muñón del paciente, es decir, corresponde a la unión entre la persona y su prótesis. El principal objetivo de este estudio es la reducción, tanto del material como del tiempo necesario para la fabricación del socket de prótesis, incorporando nuevas tecnologías a este proceso. Actualmente, en la industria nacional, el socket es fabricado de manera manual, con todas las complicaciones y costo de tiempo que ello implica. Por lo anterior, se ha decidido mejorar este proceso de fabricación implementando el diseño y manufactura asistida por computador (CAD/CAM), tal como se ha hecho en otras áreas de la industria manufacturera con la ingeniería inversa. En este trabajo se estudian distintas maneras de fabricación de prótesis y métodos para la generación de trayectorias de herramienta. Se presenta una innovación al método para la generación de trayectorias de herramienta directamente a partir de una nube de puntos, utilizando un centro de mecanizado CNC de cuatro ejes, en que la herramienta realiza un movimiento helicoidal con respecto al objeto a mecanizar. Finalmente, con el sistema implementado en este estudio se fabrica a partir de un cilindro de espuma expandida (pedilén) un molde de socket de prótesis, reduciendo tanto el material utilizado como el tiempo de fabricación del molde. La implementación y fabricación de un socket utilizando el método desarrollado demuestra la eficiencia de esta nueva forma de generación de trayectorias de herramientas y de fabricación de sockets para prótesis.

Palabras Claves: Socket de prótesis, Mecanizado por CNC, Nube de puntos, Generación de trayectorias

## **ABSTRACT**

This work presents a new prosthetics socket mould fabrication method. The socket is where the limb of the patient fits into the prosthesis, it's the union between the person and his prosthesis. The main objective of this study is the reduction of material and time used in prosthetic socket fabrication incorporating new technologies in this process. Nowadays, the prosthetic sockets in the national industry are hand made, with all the complications and time cost that this implies. For this reason, it has been decided to improve this fabrication process implementing computer aided design and manufacture techniques (CAD/CAM), just like other manufacturing industries have done with the reverse engineering. In this work different ways of prosthetic sockets fabrication and tool path generation methods are studied. A new method for tool path generation directly from the point cloud input data for a 4-axis CNC machining centre is presented, in which the tool moves along the object with a helicoidally trajectory. With the method presented in this work, a prosthetic socket mould was generated from an expanded foam cylinder, process in which the material and time consuming were reduced considerably. Implementation and fabrication of a prosthetic socket with the presented method demonstrates the efficiency of this new method for tool path generation and prosthetic sockets fabrication.

**Key Words:** Prosthetic socket, CNC Machining, Point cloud, Tool path generation.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la industria manufacturera, tanto internacional como nacional, es cada vez más común el uso del diseño y manufactura asistida por computador (CAD/CAM). Por lo mismo, se han realizado varios estudios y avances en cuanto a las tecnologías disponibles para el diseño y manufactura de objetos con geometría compleja. Muchos de estos objetos de geometría compleja son fabricados mediante ingeniería inversa, la que puede ser dividida en tres etapas: 1) adquisición de datos u obtención de un modelo digital a partir de un objeto, 2) modelación digital del objeto (CAD) y 3) generación de trayectorias de herramienta según el método de manufactura a utilizar (CAM). La adquisición de datos se puede realizar mediante un dispositivo de contacto; palpador, o de no contacto; como por ejemplo, utilizando un scanner 3D. La modelación del objeto requiere de ajustes de curvas o superficies, las cuales, como es de suponer de una modelación matemática, no representarán fielmente al objeto, sino que serán una aproximación de éste, con su correspondiente error. La calidad final del proceso manufacturado dependerá de la precisión de esta modelación matemática o ajuste. Este procedimiento consume tiempo de procesamiento, por lo que, si es posible generar la trayectoria de las herramientas directamente a partir de la nube de puntos se ahorrará este tiempo en el proceso.

Por otra parte, en la fabricación de prótesis en la industria nacional, los sockets de prótesis son fabricados de forma manual, esto quiere decir que al paciente se le toma un molde de yeso de su muñón. Posteriormente, este molde es llenado con yeso, obteniendo un molde positivo a partir del cual se fabrica el socket. Al molde obtenido es necesario realizarle ciertas modificaciones según las patologías propias del paciente, estas modificaciones son realizadas manualmente agregando o quitando material al molde (Figura 1.1). Todas estas operaciones demandan bastante tiempo, no sólo se debe considerar el tiempo de toma del molde y la adaptación de éste, sino que también se debe considerar el tiempo de secado del molde final de yeso, el que es aproximadamente 24 horas.



Figura 1.1: Fabricación manual de molde

Por lo anterior, se ha decidido implementar estas nuevas tecnologías en la manufactura de prótesis. El tema de esta tesis corresponde a implementar la última etapa de la fabricación de moldes para sockets, la cual corresponde a la obtención del molde final a través de la manufactura mediante un centro de mecanizado CNC, con lo que se pretende disminuir el tiempo de manufactura del molde. Cambiando el material, de yeso a pedilén (espuma expandida), se elimina el tiempo de secado, así como la variación de volumen durante éste. Para lograr el mecanizado del molde, es necesario desarrollar un programa CAM. Para mecanizar un objeto mediante un centro de mecanizado CNC se debe obtener una serie de coordenadas que definan el movimiento de la herramienta con respecto al objeto. En este trabajo la generación de la trayectoria de herramientas se logra directamente a partir de la nube de puntos.

## 2. FABRICACIÓN DE PRÓTESIS

Desde ya varios años que se ha intentado a nivel internacional lograr la adquisición de datos (toma de molde) y posterior modificación y diseño del socket de manera digital. A continuación se mencionan algunos casos.

Faulkner y Walsh (1989) desarrollaron un sistema de adquisición de datos a través de tomografías computarizadas. Utilizan un sistema computacional desarrollado por Rehabilitation Engineering Lab. (REL) de The University of Texas Health Science Centre de San Antonio, EE.UU. capaz de reconstruir imágenes 3D del tejido y huesos a partir de la información obtenida mediante una tomografía. La figura es seccionada con planos perpendiculares al eje longitudinal del muñón, y las modificaciones son realizadas sección por sección (Figura 2.1). Finalmente el molde positivo es mecanizado en un centro CNC a partir de un cilindro de cera.

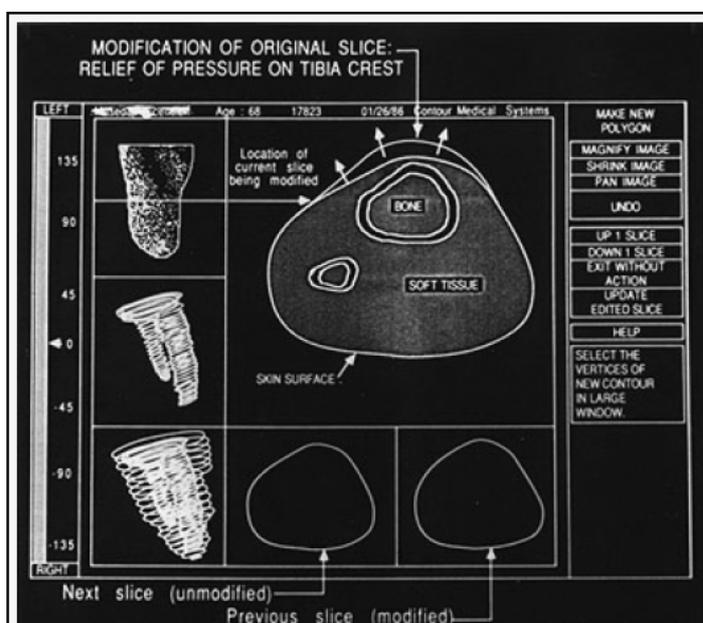


Figura 2.1: Sección tibial modificada

Cabe mencionar que dado el alto costo y la necesidad de utilizar radiación en la adquisición de la imagen, es que este sistema no es utilizado en la actualidad. Una alternativa planteada es la adquisición de la imagen mediante ultrasonido.

En 1989 (Oberg et al.) se desarrolló en Escandinavia un método de adquisición de datos mediante un escáner láser, este sistema es conocido como sistema CAPOD, por su nombre en inglés Computer-Aided-Prosthetic and Orthotic-Design (Figura 2.2). El tiempo de adquisición de datos para este método varía entre 5 y 25 minutos.

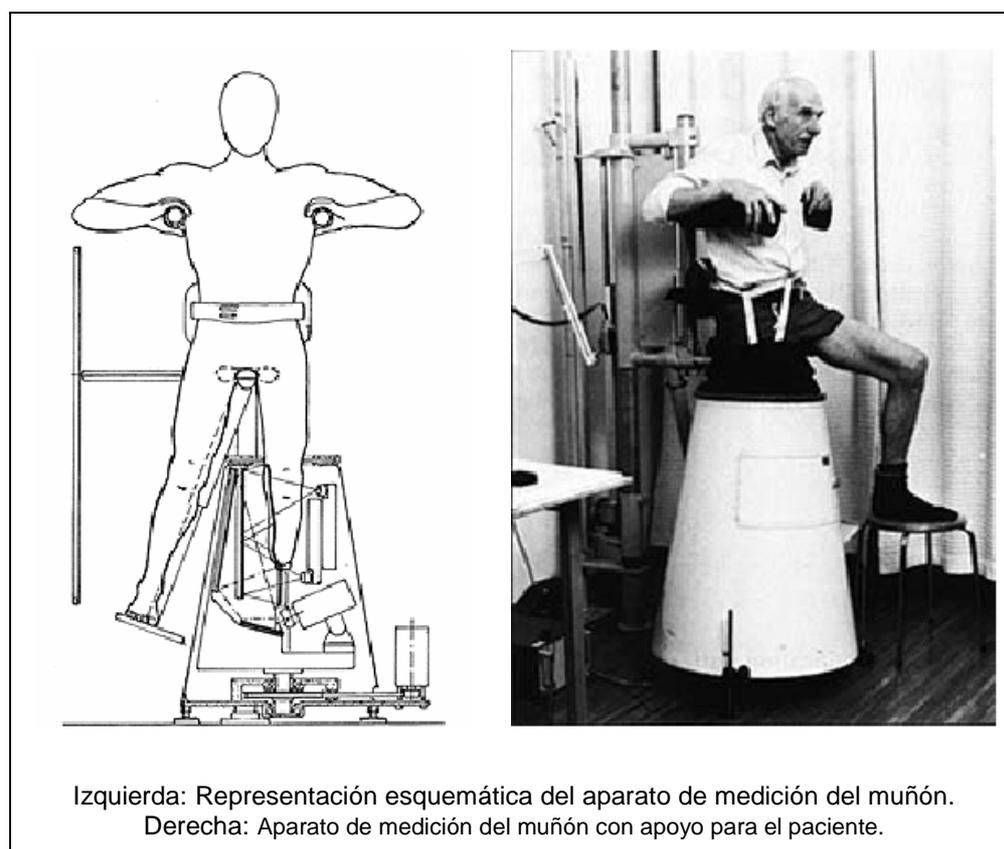


Figura 2.2: Sistema CAPOD

Johansen y Öberg (1998) desarrollaron un estudio de comparación en la precisión volumétrica en la adquisición de datos de sockets mediante dos sistemas CAD/CAM:

Seattle ShapeMaker 4.0 y el sistema CAPOD. En el peor de los casos se obtuvo un error menor al 3.1% para el sistema ShapeMaker.

Otra técnica para la fabricación del socket bajo rodilla es a través de moldes de arena (Jehnsen et al. 2005). Para esto, el muñón, con ciertas preparaciones previas, se introduce en la arena. Estas preparaciones consisten en aplicar un calcetín de nylon sobre el muñón, agregándole material en las zonas de descarga así como un molde con la forma del extremo proximal de la prótesis (Figura 2.3). El tiempo de fabricación del socket con esta técnica es menor a 1 hora. El estudio señala, entre otras cosas, un nivel de aprobación del socket de un 75% (21/28) de los pacientes con que se probó esta técnica de fabricación.



Figura 2.3: Secuencia de fabricación de socket con molde de arena

También se han desarrollado técnicas de fabricación de prótesis a través de estereolitografía, sinterizado láser y FDM (Del acrónimo inglés: Fused Deposition Modelling), en Australia, Singapur (Cheng et al. 1998) y EE.UU. (Rogers et al. 2000, Rogers et al. 2007). En estos casos el material utilizado es variable; poliamida, nylon 11,

plástico ABS (Del acrónimo inglés: Acetonitrile Butadine Styrene) incluso se habla del posible uso de ciertos metales. Un trabajo conjunto de The University of Texas Health Science Center de San Antonio (EE.UU.) y University of Texas de Austin (EE.UU.) se ha enfocado en desarrollar esta metodología. Una de las mayores ventajas de estos métodos sobre la fabricación mediante un centro de mecanizado CNC es que no sólo permite la fabricación directa del socket, sino que éste se puede fabricar con doble pared, rígida en el exterior y blanda en el interior (Figura 2.4), así como también éste puede ser de espesor variable, es decir, puede ser grueso en las zonas que resisten cargas y delgado en las áreas sensibles del paciente, llegando incluso a tener zonas del socket con pared flexible, otra ventaja es que se puede incorporar en la fabricación por sinterizado las uniones socket-prótesis (En inglés: pylon attachment). Se han obtenido buenos resultados en el funcionamiento de los sockets a corto plazo con este método, mientras que el estudio de durabilidad a largo plazo se está llevando a cabo. Una desventaja de estos métodos es el tiempo necesario para la fabricación, que puede ser incluso de 39 horas (Cheng et al. 1998).

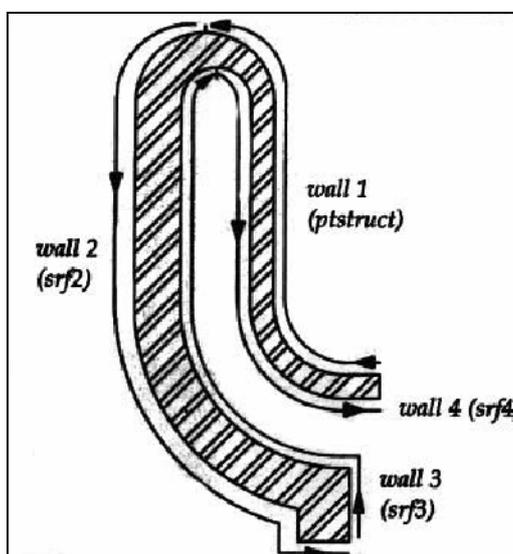


Figura 2.4: Media sección de corte del diseño de socket de doble pared

En cuanto a la fabricación de prótesis en la actualidad, se pueden mencionar tres empresas de EE.UU. que han desarrollado un sistema de adquisición digital de datos, manipulación y diseño del socket y fabricación del molde positivo de este último. Éstas son:

- Seattle Limb Systems (ShapeMaker)
- Ohio Willow Wood Company (Omega Tracer)
- BioSculptor (FastScan)

### **Seattle Limb Systems**

Para la adquisición de datos posee tanto un palpador (Figura 2.5) como un scanner láser. Cabe destacar que en el caso del palpador, al paciente se le hace un molde del muñón de la manera tradicional, es decir, a mano y con yeso, y es este molde el que es montado en el palpador y digitalizado.



Figura 2.5: Palpador Seattle Limb Systems

Para la modificación del socket se ha desarrollado el software ShapeMaker, el cual utiliza una librería de sockets, en que se selecciona el tipo que más se ajuste a la necesidad del paciente y se modifican ciertos parámetros de acuerdo a las medidas del muñón, estas modificaciones abarcan cambios en longitud y diámetro y aplicación de cargas y descargas. Finalmente se fabrica un molde del socket mediante un centro de mecanizado CNC a partir de un cilindro de espuma (Figura 2.6).



Figura 2.6: Sistema de fabricación de socket Seattle Limb Systems

Este sistema es utilizado por la empresa nacional Protex como una alternativa en el diseño y fabricación de prótesis. Poseen el sistema indirecto de adquisición de datos mediante el palpador. La fabricación del molde es realizada en un centro de mecanizado CNC a partir de un cilindro de pedilén. Cabe mencionar que al tener un palpador indirecto, no se liberan de la utilización del yeso en la toma del molde, por lo que siguen prefiriendo el método tradicional para la fabricación de prótesis. Con lo anterior se concluye que si bien la tecnología está disponible, no es utilizada a nivel nacional.

Este sistema; software ShapeMaker con palpador, es utilizado en Australia por REHABTech de Monash University Centre for Biomedical Engineering para la fabricación

de prótesis. En este caso la diferencia con los anteriores es en el sistema de fabricación, puesto que utilizan un centro de sinterizado utilizando plástico ABS.

### Ohio Willow Wood Company

Para esta empresa la adquisición de datos es a través de uno de los dos scanner: Omega T-Ring u Omega Scanner (Figura 2.7). El diseño del socket se realiza a partir de modelos ya definidos, los cuales, al igual que en el caso anterior, son modificados de acuerdo a las medidas del paciente. Finalmente su fabricación es mediante un centro de mecanizado CNC a partir de cilindros de espuma.

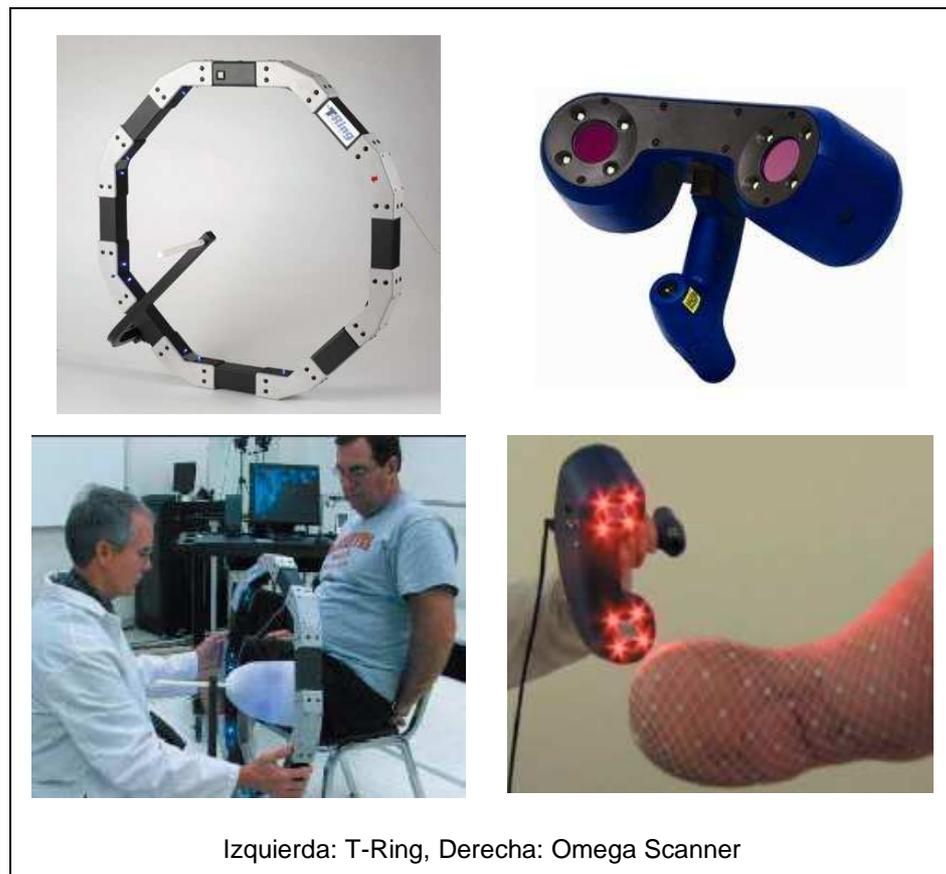


Figura 2.7: Sistemas scanner 3D.

## BioSculptor

La adquisición de datos es a través del sistema scanner FastScan: Cobra y Scorpion (Figura 2.8) desarrollado por la empresa Polhemus y capaz de escanear cualquier objeto de superficie opaca no metálica. Permite, al momento de escanear, marcar puntos y líneas en la superficie. El software de FastScan (propio del scanner) permite eliminar ruido, suavizar y rellenar superficies.



Figura 2.8: Scanner FastScan



Figura 2.9: Cilindros de espuma y centro de mecanizado CNC BioSculptor

Al igual que en los casos anteriores, el diseño del socket es realizado a partir de modelos previamente definidos y su fabricación es mediante un centro de mecanizado CNC a partir de cilindros de espuma (Figura 2.9).

### **3. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DE HERRAMIENTA**

Al momento de generar las trayectorias de herramienta, se busca lograr tres objetivos: a) minimizar las retracciones de la herramienta durante el mecanizado (momento en que la herramienta pasa de una trayectoria a otra sin mecanizar), b) minimizar el número de trayectorias, y c) maximizar la longitud promedio de éstas. Además se debe cumplir que el método sea robusto y eficiente, tanto en el tiempo de generación de la trayectoria como en el tiempo de mecanizado, y la calidad superficial debe estar dentro de un determinado rango con respecto al modelo original.

Para lograr estos objetivos existen diversos métodos para calcular las trayectorias de herramienta, como por ejemplo; el método iso-planar o el iso-paramétrico. Estos métodos pueden requerir, para la generación de las trayectorias, de un ajuste de superficie, de un ajuste de curva, de una triangulación o simplemente una nube de puntos.

Antes de describir los distintos métodos, es necesario definir un concepto de importancia en el mecanizado: Altura de crestas, o en inglés “scallop height”. Al utilizar una herramienta de punta esférica, ésta irá removiendo el material y dejando un canal con sección circular. La siguiente trayectoria, superpuesta a la anterior, generará un segundo canal, obteniendo de esta manera una superficie acanalada. La altura de estos canales corresponde a la altura de crestas (Figura 3.1).

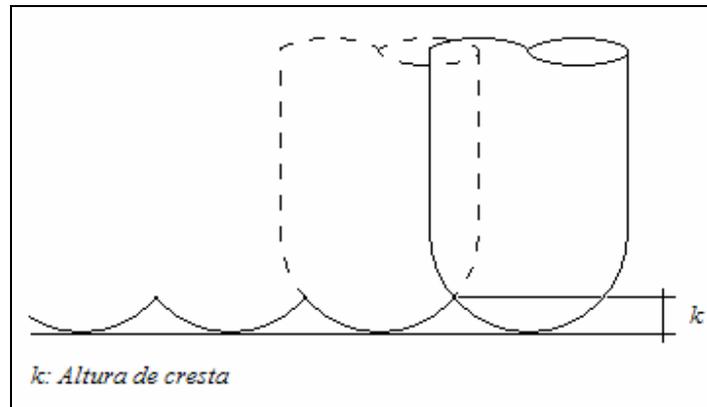


Figura 3.1: Altura de crestas

Al momento de ubicar la herramienta, existen dos puntos de interés: punto de contacto, ó CC (del inglés Cutter Contact point) y el punto de localización de la herramienta, ó CL (del inglés Cutter Location point). El primero corresponde al punto de la superficie de la herramienta que hace el primer contacto con la superficie a mecanizar. Mientras que el segundo corresponde a la coordenada inferior del eje longitudinal de la herramienta. Los puntos de localización generan las trayectorias de la herramienta, y se pueden obtener de manera directa o a partir de los puntos de contacto.

### 3.1. Métodos con ajuste de curvas/superficies

Una forma de obtener la trayectoria de la herramienta, es realizando un ajuste de curva (o superficie) del objeto para obtener una aproximación geométrica de la nube de puntos.

Uno de los ajustes más utilizados es el de ajuste por spline. Una spline es una curva definida a trozos mediante polinomios. Con esto se logra aproximar una curva con polinomios de bajo grado, evitando las oscilaciones que se producen al aproximar mediante polinomios de grado elevado.

Un caso particular de estas aproximaciones es el de Bézier. En el caso de las curvas, se tiene que dado los puntos  $P_0, P_1, \dots, P_n$ , la curva de Bézier de grado  $n$  será de la siguiente forma:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} P_i (1-t)^{n-i} t^i, \quad t \in [0,1]$$

$$B(t) = P_0 (1-t)^n + \binom{n}{1} P_1 (1-t)^{n-1} t + \dots + P_n t^n, \quad t \in [0,1]$$

De forma similar se puede obtener también una superficie de Bézier. A partir de estas curvas o superficies se pueden generar las trayectorias de herramientas manteniendo una altura de crestas dentro de un determinado rango (Jung 2005) o constante (Choi et al. 2007)

### 3.2. Métodos de parametrización

Si bien al utilizar Bézier se parametriza, existe también un método para generar trayectorias de herramientas basado en la parametrización de la superficie (Método de Parametrización). En este método se pasa de un dominio físico (o Cartesiano) a uno paramétrico (Figura 3.2). Al parametrizar, la superficie es transformada a una geometría conocida.

La trayectoria de la herramienta es calculada para esta nueva superficie y posteriormente transformada al dominio original (Yuwen, S. et al.). Este método permite obtener de manera sencilla las trayectorias de la herramienta. Sin embargo, al transformar las trayectorias al dominio físico, éstas se distorsionan, creando zonas de mecanizado redundante (trayectorias demasiado cercanas) y zonas en que las trayectorias están demasiado distantes una de otras, lo que implica una deficiencia en la calidad superficial.

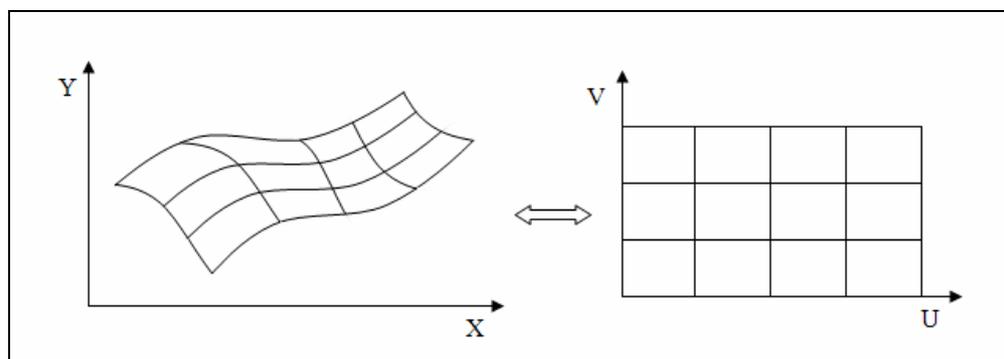


Figura 3.2: Dominio físico y paramétrico

### 3.3. Métodos directos

Por método directo se entiende que las trayectorias de herramientas son generadas sin realizar ajuste de curvas ni parametrizaciones, es decir, son calculadas directamente de la nube de puntos o de su triangulación.

Uno de los métodos más utilizados en centros de mecanizado CNC de 3 ejes es el iso-planar (Feng, H, et al. 2005). Este método consiste en seccionar el objeto a mecanizar en varios planos paralelos, los que son recorridos por la herramienta durante el mecanizado. Estos planos pueden ser horizontales y paralelos al eje vertical (Park, S. 2003) o verticales y paralelos a una determinada dirección.

En el primer caso, planos horizontales, se obtienen los contornos a mecanizar para cada altura de la herramienta. Para cada rango de altura, se define un área a mecanizar a partir de los contornos, esta área es recorrida por la herramienta siguiendo un patrón que puede ser en zig-zag, de líneas paralelas, o de líneas paralelas al contorno (offset) (Park S. 2003 y Park S. et al. 2003). Una modificación a este último patrón es presentado por Lee, E. (2003) en que propone la creación de una trayectoria espiral a partir de las líneas paralelas al contorno, manteniendo un altura de crestas constante.

Otra alternativa es generar un mapa-Z (En inglés: Z-map). La superficie es dividida en una malla, la altura de cada uno de los nodos de la malla es almacenada en un arreglo 2D. A partir de este arreglo se obtienen las diferentes zonas a mecanizar para cada rango de altura.

En el caso de planos verticales, se han realizado varios estudios para determinar la dirección óptima de estos planos, la cual corresponde a la dirección de mecanizado. Park et al. (2000) selecciona la dirección en base a los ángulos del perímetro de la sección a mecanizar de manera de minimizar el número de retracciones de la herramienta.

Dependiendo de la pendiente y curvatura local de la superficie, se obtienen diferentes alturas de crestas, lo que implica cambios en la calidad superficial (Figura 3.3:  $h_1$  y  $h_2$ ). Para solucionar este problema, Ding et al. (2003) propone un método iso-planar adaptable. En este método la superficie es dividida en zonas según su pendiente. La distancia entre planos es determinada para cada zona en forma independiente, de modo de obtener una altura de crestas menor al máximo permitido (Figura 3.4).

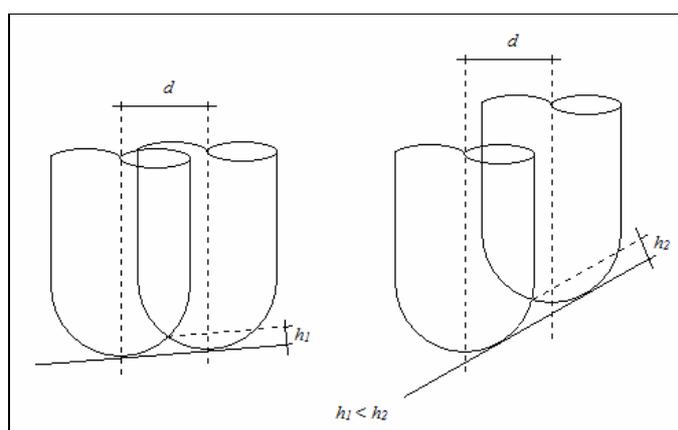


Figura 3.3: Diferente calidad superficial según pendiente

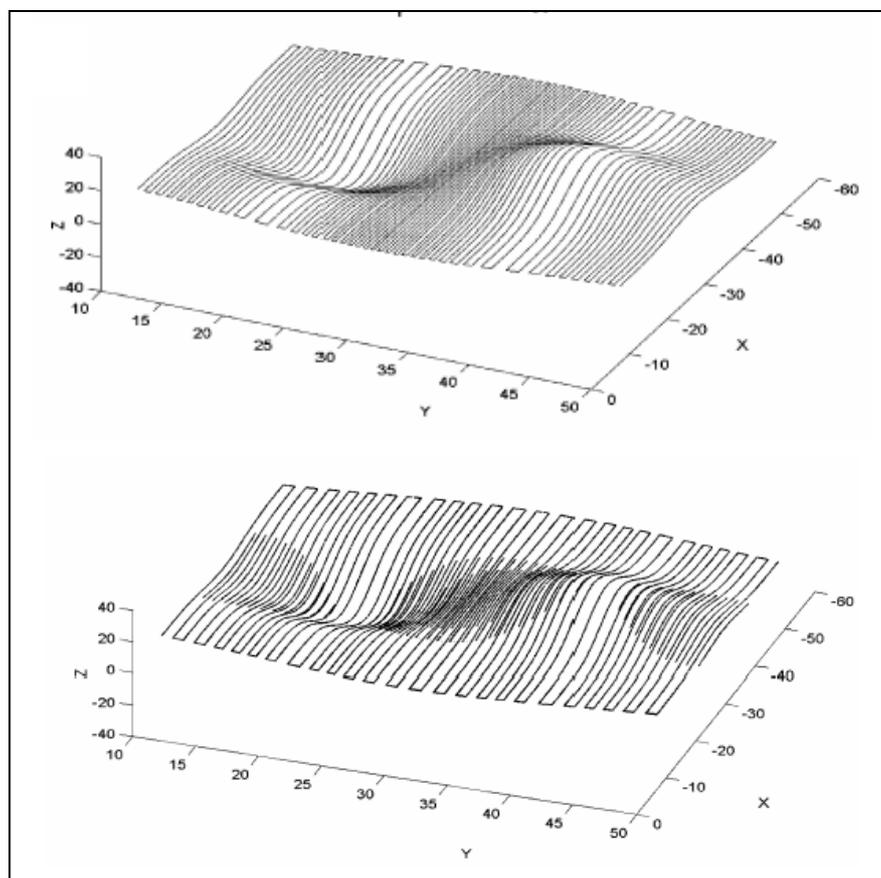


Figura 3.4: Método iso-planar adaptable según pendiente

La trayectoria de la herramienta también se puede obtener a partir de la triangulación de la superficie. Intersectando la triangulación con planos verticales paralelos se obtienen los puntos de contacto de la herramienta (Park 2004). Diferentes algoritmos han sido propuestos para obtener, a partir de estos puntos, los puntos de localización de la herramienta. Como por ejemplo, analizar los triángulos que están bajo la sombra de la herramienta, en que el triángulo más alto determinará la altura de ésta (Li et al. 1993, Wenling et al. 2003).

Chui et al. (2002) desarrolla un método de generación de trayectorias de la herramienta directamente de la nube de puntos para una herramienta con punta esférica. Se agrupan los puntos en bandas, es decir, los puntos que están dentro de un determinado rango en Y. El ancho de banda es determinado según el radio de la herramienta y la altura

de crestas deseada. Mediante pares de puntos consecutivos dentro de una misma banda se van creando esferas de radio igual al radio de la herramienta, si bien en geometría 3D se necesitan 4 puntos para definir una esfera, en este trabajo utilizan dos puntos y el hecho de que los centros de las esferas de una determinada banda deben pertenecer al plano medio de la banda. Por medio de interpolación (extrapolación) lineal, se ubica el centro de la esfera de modo que ésta sea tangente a la línea que une ambos puntos. De esta forma se generan una serie de puntos de localización de la herramienta. Finalmente realizan un ajuste de curva con spline para generar la trayectoria de la herramienta.

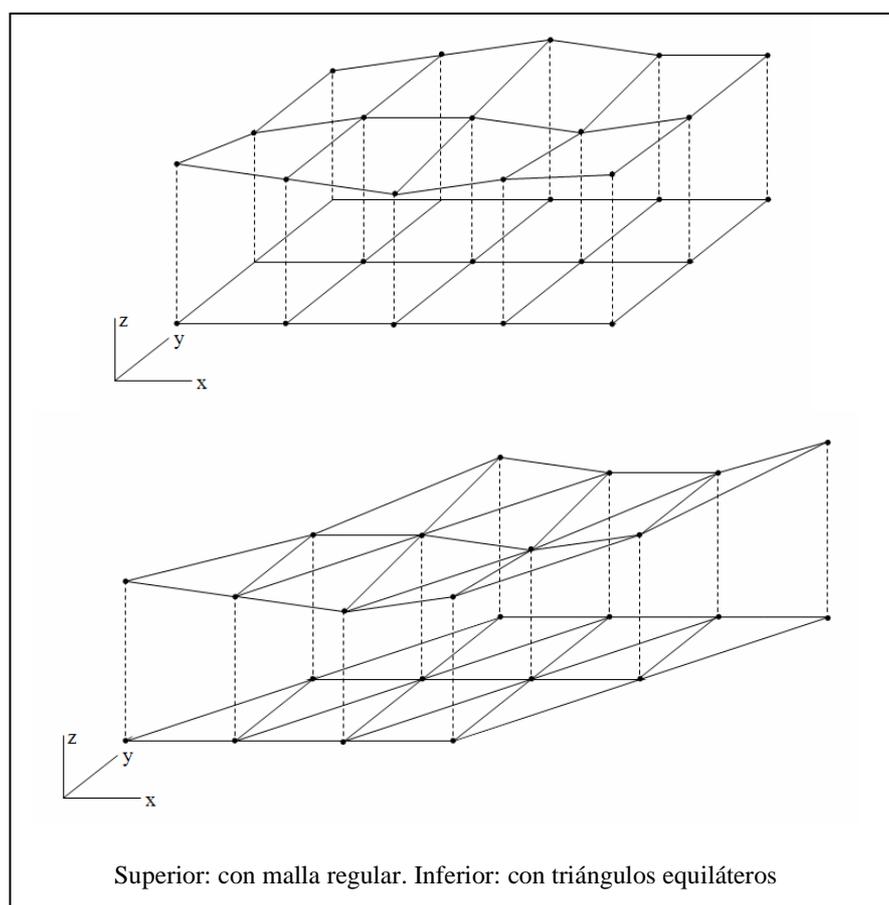


Figura 3.5: Mapa-Z

Chui et al. (2006) genera la trayectoria de la herramienta directamente a partir de la nube de puntos. Los puntos de la nube de puntos son proyectados sobre un plano. Se

genera una malla de triángulos equiláteros sobre este plano conteniendo a todos los puntos. El tamaño de estos triángulos es definido por el usuario dependiendo de la precisión deseada. A cada vértice de esta malla se le asigna el punto más cercano de la nube de puntos. Esta malla plana es llevada a 3D ingresando a cada nodo la altura correspondiente al punto asignado a esa nodo, generando un mapa-Z (Figura 3.5). Uniendo todos los nodos de una misma fila de la malla se obtienen las trayectorias de la herramienta. Finalmente se realiza un ajuste por arco de circunferencias para obtener la curva que representa la trayectoria de la herramienta.

En estos métodos, en que la superficie es representada por una malla, se debe tener cuidado con el tamaño de ésta, puesto que de esto depende la cantidad de puntos que serán considerados, afectando directamente la calidad y precisión del mecanizado. Se debe tener en consideración que al momento de asignar un punto de la nube de puntos a un determinado nodo de la malla sólo se considera la distancia 2D (horizontal) entre ambos, por lo que se pueden producir ciertos errores con este método. Este tipo de algoritmo presenta problemas para superficies verticales o con una inclinación cercana a ella.

Otro estudio en que se genera la trayectoria de la herramienta directamente de la nube de puntos utilizando una malla regular es el de Lin et al. (1997). En este caso la altura de los nodos es determinada por interpolación lineal entre los puntos más cercanos a cada nodo. Luego, según la altura, se divide el plano en zonas de corte y de no corte, generando las distintas trayectorias de la herramienta.

Muchos de los estudios aquí mencionados fueron realizados para utilizar centros de mecanizado CNC de 5 ejes. En estos casos, se debe determinar además de la posición de la herramienta, su inclinación. Para esto, se calcula la normal de la superficie y se asigna un cierto ángulo de inclinación a la herramienta con respecto a la normal.

Todos estos métodos son válidos para objetos con una sola superficie de mecanizado, es decir, la herramienta siempre enfrenta al objeto desde el mismo plano. Por lo que si se necesita mecanizar desde más de un plano, el proceso se debe realizar por

partes, es decir, mecanizar completamente un plano y luego voltear la pieza para mecanizar desde un segundo plano y así sucesivamente. Esto tiene la desventaja de interrumpir el proceso cada vez que se voltea la pieza, aumentando el tiempo de mecanizado.

Para solucionar el problema anterior, se debe utilizar, como mínimo un centro de mecanizado con mesa giratoria, en que la pieza gira mientras se mecaniza. De esta manera se crea una trayectoria helicoidal de la herramienta con respecto al objeto (Jimeno et al. 2006).

#### 4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La fabricación de un socket mediante un centro de mecanizado CNC puede dividirse en 4 etapas; 1) Adquisición de datos, 2) Modificación de datos, 3) Mecanizado del molde y, 4) Fabricación del socket (Figura 4.1).

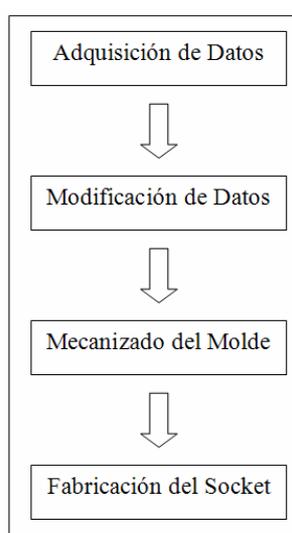


Figura 4.1: Proceso de fabricación de socket

La primera etapa consiste en traspasar la geometría, con sus dimensiones, a un archivo digital. Esto puede realizarse con diversos métodos, tanto de contacto como de no contacto. En este estudio se utilizó un scanner 3D FastScan Cobra para la adquisición de datos. Este scanner entrega dos matrices: una conteniendo coordenadas X, Y, Z que representan al objeto, conocida como nube de puntos, y una segunda matriz para la triangulación.

Los datos entregados en la primera etapa representan al muñón del paciente, sin embargo, a esta información es necesario realizarle ciertas modificaciones según la patología propia del paciente. Estas modificaciones incluyen agregar zonas de carga y descarga, reducciones y aumentos de diámetros entre otras. Estas modificaciones forman la segunda etapa del proceso.

Una vez obtenidas las coordenadas de la herramienta durante el mecanizado, es necesario traspasar esta información a un código para el centro de mecanizado CNC. La forma de este código dependerá del centro de mecanizado a utilizar. En esta etapa se genera el código que define las trayectorias de herramienta para el mecanizado a partir de un cilindro de espuma.

Finalmente, en la cuarta etapa se fabrica el socket a partir del molde obtenido en el centro de mecanizado CNC. Este proceso no presenta modificaciones con respecto al método tradicional de fabricación de prótesis, es decir, se mantiene la fabricación por termo laminado a partir de un molde positivo.

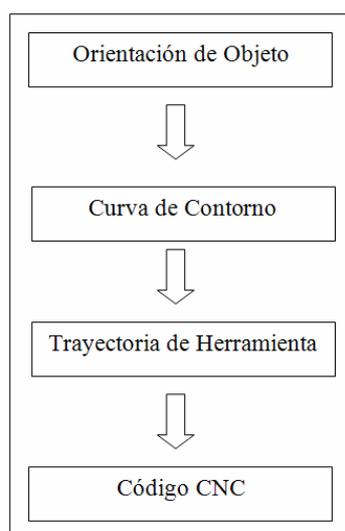


Figura 4.2: Proceso de generación de código CNC

Este trabajo de investigación contempla el desarrollo de la tercera etapa de este proceso, es decir, del proceso de fabricación del molde de socket mediante un centro de mecanizado CNC. Este proceso puede dividirse en las etapas ilustradas en la figura 4.2.

#### 4.1. Orientación del objeto

Antes de obtener cualquier trayectoria de herramienta, es necesario orientar el objeto a mecanizar. En este caso, se busca alinear el eje longitudinal del objeto con el eje X, el que corresponde al eje de rotación del centro de mecanizado CNC. Con esta orientación no sólo se busca optimizar el proceso de mecanizado sino que también reducir el material necesario para este efecto, con lo que se minimiza el costo y el tiempo de fabricación. Esta orientación es realizada de forma manual por el usuario, y se detalla en el capítulo 5 de este trabajo.

#### 4.2. Generación de curva de contorno

Para el mecanizado de las piezas, se aprovechará el hecho que las extremidades, brazos y piernas, son pseudo cilíndricas, es decir, poseen un eje longitudinal. Es por esto que el mecanizado se realizará utilizando una trayectoria de herramienta en forma de helicoides, en que la herramienta irá girando alrededor del objeto a medida que avanza. En la Figura 4.3 se aprecia la forma que tendrá la trayectoria de la herramienta.

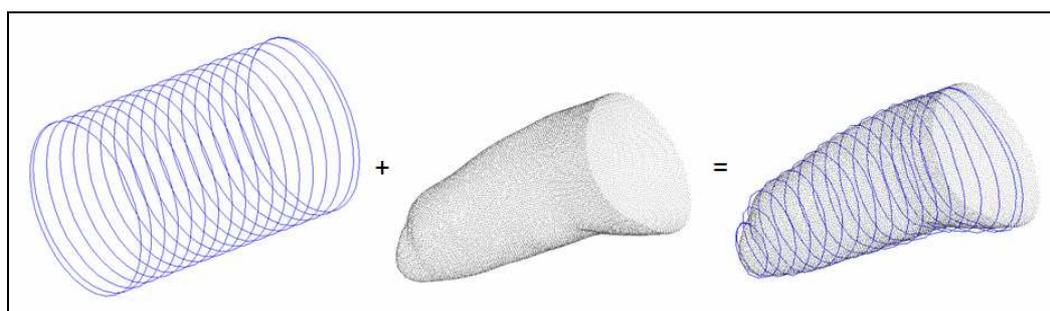


Figura 4.3: Generación curva de contorno

Para determinar la trayectoria de la herramienta es necesario calcular los distintos puntos que forman una hélice y que coinciden con la superficie del objeto, la hélice será creada en coordenadas cilíndricas  $(\theta, r, h)$ . En que  $\theta$  corresponde al ángulo de giro de la

pieza (herramienta),  $h$  coincide con el eje X, o eje de rotación de la pieza y corresponde al paso de la helicoide, y  $r$  irá variando su valor según la forma del objeto y corresponderá a un movimiento en la dirección del eje Z. La coordenada en el eje Y siempre será igual a cero. Para el primer punto de la trayectoria se tiene un ángulo nulo y la coordenada X será cercana al mínimo valor de X de la nube de puntos.

El giro del cuarto eje es determinado de manera que la herramienta se traslape aproximadamente un 90% entre un punto y el anterior (Figura 4.4).

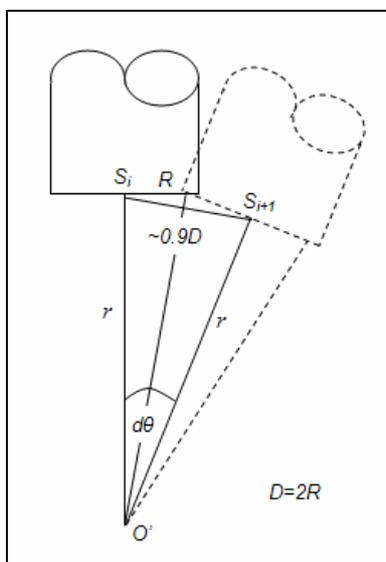


Figura 4.4: Obtención de  $d\theta$

De esta forma, el incremento del ángulo estará determinado por:

$$d\theta = 2 \arctan\left(\frac{0.9R}{r}\right)$$

Donde  $R$  corresponde al radio de la herramienta y  $r$  al radio del objeto a mecanizar en ese punto.

Cabe mencionar que si bien en el proceso de mecanizado es la pieza la que gira mientras la herramienta se mantiene vertical, en el cálculo de la trayectoria se gira la herramienta y el objeto se mantiene estático.

El avance de la herramienta en X es tal que al completar  $360^\circ$  de giro del cuarto eje, la herramienta habrá avanzado una distancia igual a su diámetro por el stepover determinado por el usuario. (Figura 4.5)

$$dh = R \frac{d\theta}{360} so$$

Donde  $R$  corresponde al radio de la herramienta y  $so$  al stepover ingresado por el usuario ( $0 < so \leq 1$ ).

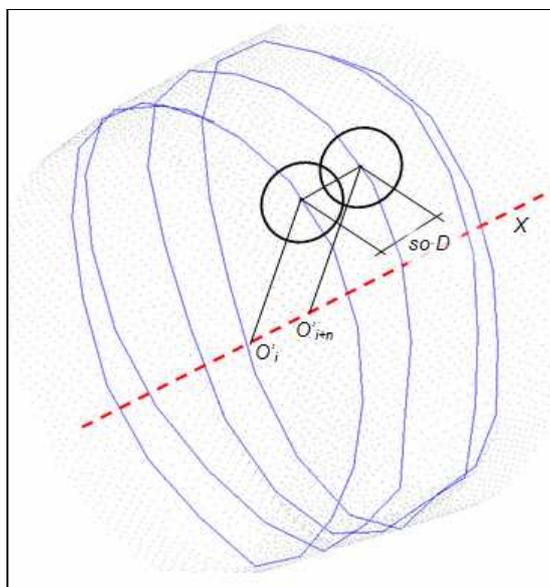


Figura 4.5: Representación paso de herramienta

Para calcular la coordenada  $r$  de la posición de la herramienta se procede punto a punto a determinar la altura de ésta.

Para cada punto de la trayectoria se buscan los puntos que estén bajo la sombra de la herramienta. Es decir, que la proyección ortogonal de los puntos sobre la recta correspondiente al eje de la herramienta sea igual o menor al radio de ésta (Figura 4.6).

$$\|(P_i - S_j) \times d_j\| \leq R$$

Donde  $P_i$  es el punto en cuestión,  $S_j$  la posición de la herramienta,  $d_j$  la dirección del eje de la herramienta y  $R$  el radio de la herramienta.

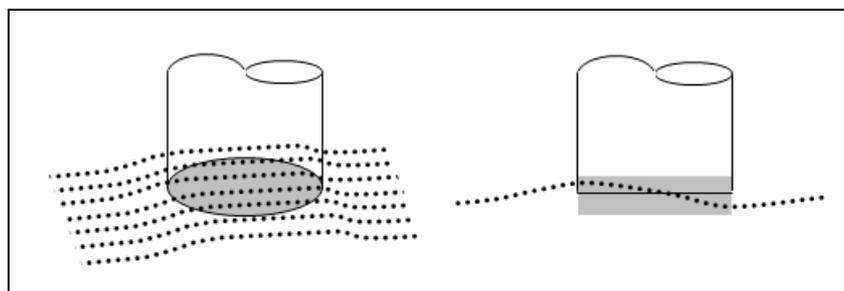


Figura 4.6: Selección puntos bajo proyección de herramienta

Se tienen dos grupos de puntos que cumplen con esta condición; los que están en la superficie superior del objeto ( $Z$  positivo) y los que están en la cara inferior (Figura 4.7). Para diferenciar los puntos de interés, esto es, los que están en el mismo lado de la herramienta, se considera un plano imaginario tangente al cilindro original (cilindro sin mecanizar), cuya normal coincide con el eje de la herramienta. Los puntos que están a una distancia del plano  $S$  menor que la distancia entre este plano y el eje  $X$  corresponden a los puntos que están en la superficie superior, es decir, en el lado de la herramienta.

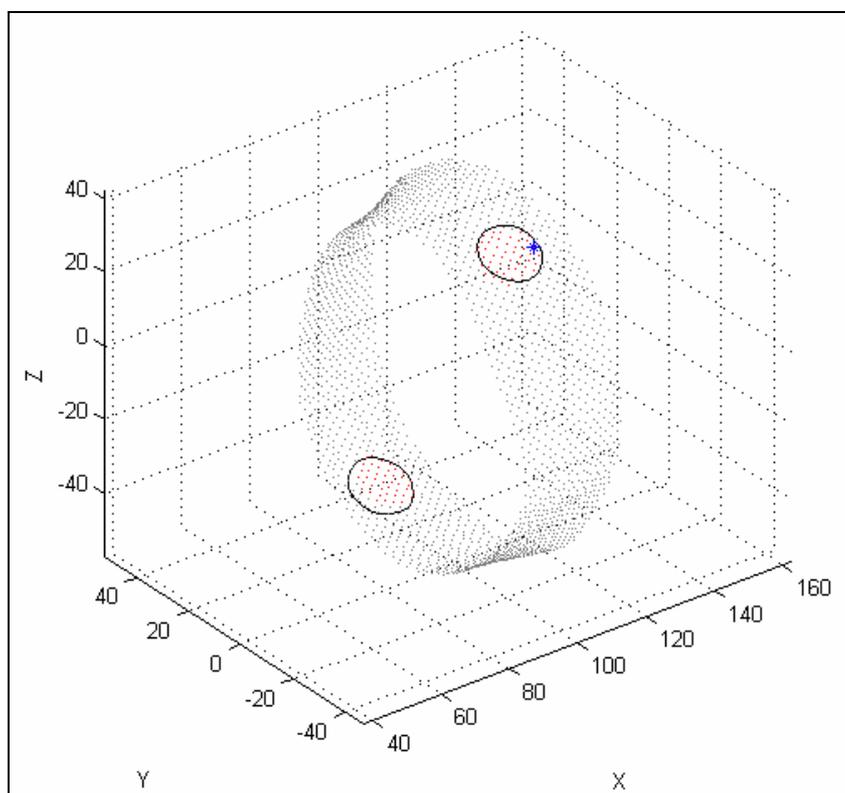


Figura 4.7: Puntos bajo proyección de herramienta

Teniendo los puntos que están en la sombra de la herramienta, se debe calcular la altura de esta última. Para esto, se busca el punto de contacto de la herramienta, que corresponde al primer punto que hace contacto con la superficie cuando la herramienta desciende sobre ésta. Con este punto se determina el punto de posicionamiento de la herramienta, que corresponde a la coordenada de la posición de la herramienta. En ambos tipos de herramienta, punta plana y esférica, este punto corresponde a la coordenada del punto inferior del eje longitudinal de la herramienta.

La forma de calcular estos puntos varía según el tipo de herramienta, a continuación se detalla la manera en que estos puntos son calculados según la herramienta.

### Punta plana

Se busca el punto más cercano al plano  $S$ .

$$\delta = \text{Min}(|(P_i - S_j) \cdot d_j|)$$

Luego la distancia de este punto al eje X (eje de rotación) es tomada como la altura de la herramienta, este punto corresponde al punto marcado con un asterisco en la figura 4.6.

### Punta esférica

Para evitar el sobrecorte de la herramienta esférica, al igual que en el caso anterior, se debe compensar su altura (Figura 4.8). Para determinar la altura de compensación se busca la distancia mínima entre los puntos que están bajo la sombra de la herramienta y la superficie esférica de ésta. El punto cuya distancia a la superficie esférica de la herramienta es mínima será el punto de contacto entre la herramienta y la superficie a mecanizar. Una vez conocido este punto, y por geometría, se obtiene la posición de la herramienta (punto de localización).

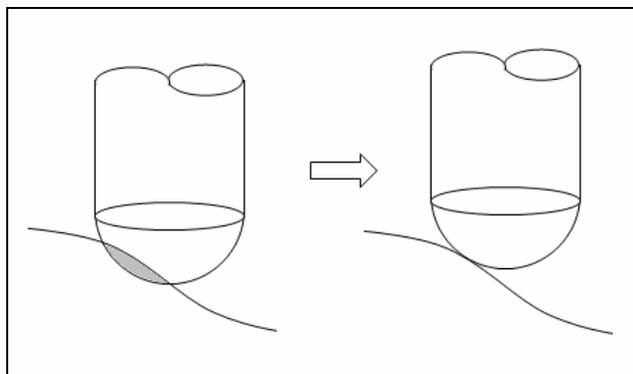


Figura 4.8: Compensación de altura de herramienta

La obtención del punto de contacto y de posicionamiento se describe a continuación.

Sea  $S$  la superficie formada por la nube de puntos,  $P$  un punto bajo la sombra de la herramienta y perteneciente a  $S$ . Sea  $C$  el centro de la esfera  $E$  de radio  $r$  y  $Q$  un punto en la superficie de la esfera  $E$  (Figura 4.9). Se busca el punto  $P$  cuya distancia a la superficie de la esfera  $E$  sea la mínima.

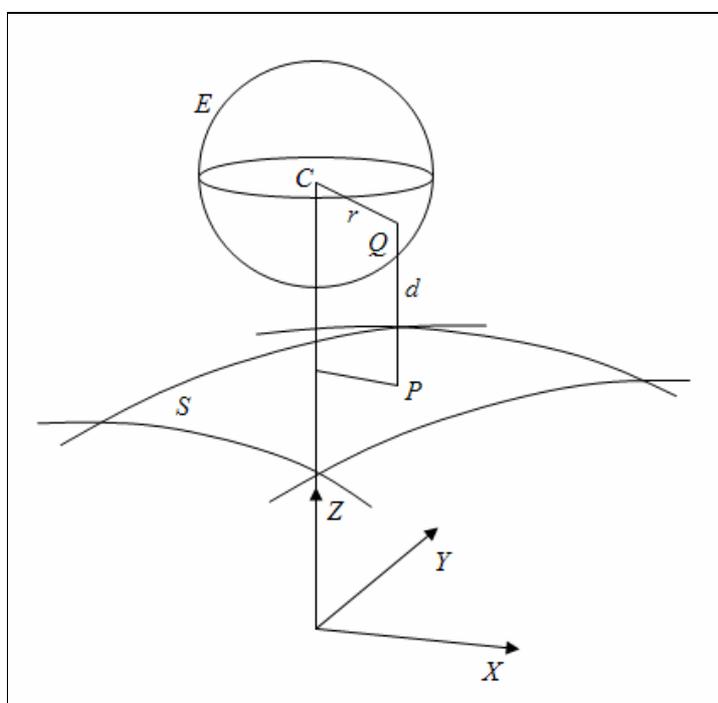


Figura 4.9: Distancia entre un punto y una esfera

Dado que se busca la distancia vertical entre el punto  $P$  y un punto  $Q$  de la esfera  $E$ , se tiene que las coordenadas  $x$  e  $y$  son iguales para los puntos  $P$  y  $Q$ , por lo que la distancia  $d$  será igual a la diferencia entre las coordenadas  $z$  de  $P$  y  $Q$ , es decir:

$$d = q_z - p_z$$

Para la esfera se tiene

$$(c_x - q_x)^2 + (c_y - q_y)^2 + (c_z - q_z)^2 = r^2$$

Pero

$$q_x = p_x$$

$$q_y = p_y$$

Reemplazando y despejando se obtiene una ecuación para la distancia  $d$

$$d = c_z - \sqrt{r^2 - (c_x - p_x)^2 - (c_y - p_y)^2} - p_z$$

El punto  $P$  de interés es aquel que determina la mínima distancia  $d$ , el que corresponde al punto de contacto de la herramienta. Obtenido el punto de contacto, y con un procedimiento similar al anterior, se obtiene el punto de localización de la herramienta.

### Punta toroidal

Si bien este tipo de herramienta no es utilizada en este trabajo, el punto de contacto para una herramienta de punta toroidal puede ser obtenida utilizando un algoritmo similar al anterior. La distancia de un punto a un toroide está determinado por:

$$d = c_z - \sqrt{\left(R^2 + \sqrt{r^2 - (c_x - p_x)^2}\right)^2 - (c_y - p_y)^2} - p_z$$

Donde  $R$  y  $r$  corresponden a los radios mayor y menor del toroide respectivamente (Jimeno et al. 2005).

De esta manera se van creando los distintos puntos que conforman la trayectoria de la herramienta en forma de hélice. Cabe mencionar que tanto al comienzo como al final de la hélice existe una vuelta completa en que no se varía la coordenada X (Figura 4.10). Estas coordenadas son guardadas en una matriz  $C$ .

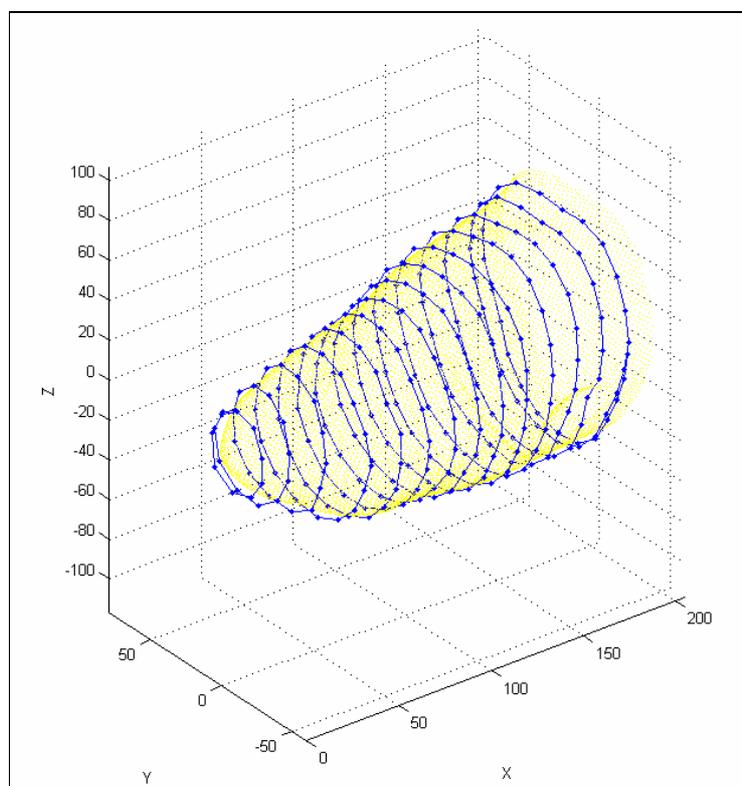


Figura 4.10: Puntos curva de contorno

### 4.3. Generación de trayectorias de herramienta

La matriz generada anteriormente ( $C$ ) corresponde a la trayectoria última de la herramienta, dependiendo tanto del tamaño del cilindro inicial como del tamaño y forma del objeto a mecanizar, la herramienta de desbaste deberá realizar varias pasadas para alcanzar esta trayectoria. Para esto se consideran los mismos puntos generados anteriormente pero se va variando la altura de corte de la herramienta, es decir, se mantienen las coordenadas  $\theta$  y  $h$ , mientras que  $r$  irá disminuyendo en cada pasada.

A la matriz  $C$  se le agrega una cuarta columna en que se almacena el valor actual del radio del objeto que se está mecanizando, comenzando con el valor del radio del cilindro inicial, y una quinta columna que tendrá los valores 2, 1 ó 0. En un comienzo la quinta columna corresponde a puros 2, a medida que se va mecanizando éstos irán

cambiando a 1 y 0, el valor 1 indica que se ha alcanzado la altura y el valor 0 que no se está retirando material en ese punto, es decir es una pasada innecesaria de la herramienta por ese punto. Cuando esta columna contenga únicamente 1 ó 0 indicará el final del proceso iterativo.

Como se mencionó anteriormente en un comienzo la cuarta columna tiene como valores el radio del cilindro inicial. Como la quinta columna tiene valor 2, al valor almacenado en la cuarta columna se le resta la magnitud almacenada como profundidad de corte ( $L$ ). Existen tres posibles resultados a esta resta:

- 1- Que el resultado siga siendo mayor que el deseado; en este caso este nuevo valor es almacenado en la cuarta columna y en la quinta se mantiene el valor 2, indicando que este punto debe ser repasado por la herramienta por lo menos una vez más.
- 2- Que el resultado sea menor o igual al valor deseado; en la cuarta columna se almacena el valor deseado y la quinta columna cambia a 1, indicando que esa pasada corresponde a la última.
- 3- Que el resultado sea menor o igual al valor deseado más una cierta tolerancia; en la cuarta columna se almacena el valor deseado y la quinta columna cambia a 1, indicando que esa pasada corresponde a la última considerando la tolerancia.

Si el punto en cuestión ya tiene asignado un 1 en la quinta columna, entonces este valor es cambiado a 0, indicando que se está realizando una pasada innecesaria, no se realiza la resta anteriormente mencionada. Los puntos marcados con 0 pueden ser obviados al calcular las trayectorias de herramienta.

A través de este proceso iterativo, se va generando una matriz con la siguiente forma:

$$M(i, :, k) = [W \ R \ h \ c]$$

$i = 1, 2, 3 \dots$   
 $k = 1, 2, 3 \dots$

$W$ :	Ángulo de giro cuarto eje
$R$ :	Radio, altura de la herramienta
$h$ :	Coordenada x de la herramienta
$c$ :	Condición: 2, 1 ó 0

En que  $k$  corresponde al número de pasada de la herramienta. Cada vez que la matriz  $C$  es recorrida completamente,  $k$  aumenta su valor en una unidad.

La diferencia entre  $\theta$  y  $W$  de las matrices  $C$  y  $M$  respectivamente es que el primero no supera los  $360^\circ$ , mientras que el segundo aumenta continuamente. El primero corresponde a la coordenada de los puntos de la nube, mientras que el segundo al ángulo (absoluto) de giro del cuarto eje.

En el caso del acabado, se realiza sólo una pasada de la herramienta ( $k=1$ ) por lo que la matriz  $M$  es creada directamente a partir de la matriz  $C$ .

#### 4.4. Generación del código ISO para la máquina CNC

Una vez obtenidas las distintas coordenadas que representan la trayectoria en cada pasada de la herramienta, es necesario generar un código ISO para la máquina CNC. En esta etapa del proceso, cada dimensión  $k$  de la matriz  $M$  es recorrida alternadamente hacia abajo y hacia arriba mientras se genera el código ISO para el centro de mecanizado CNC. Con lo anterior se logra generar una trayectoria tal que la herramienta recorre el eje X en ambos sentidos de manera continua. A medida que se recorre la matriz  $M$  se va revisando la cuarta columna con el fin de variar los límites máximo y mínimo de mecanizado, acortando de esta manera la longitud del objeto a mecanizar. Así mismo, de existir una cantidad de puntos consecutivos marcados con el valor 0, tal que entre el primero y el último de ellos exista un ángulo superior a  $180^\circ$ , la herramienta se levanta y avanza a una velocidad mayor que la de mecanizado, disminuyendo de esta forma el tiempo de mecanizado.

Las diversas instrucciones para el centro de mecanizado CNC, como definir sentido de giro de la pieza y herramienta, plano de mecanizado, cero pieza, cambio de herramienta entre otras, son generadas directamente a partir de la matriz  $M$  a medida que se va escribiendo el archivo de texto.

## 5. INTERACCIÓN CON EL USUARIO

Si bien la generación de trayectorias de herramientas es directa a partir de la nube de puntos, hay ciertos parámetros que deben ser ingresados por el usuario. En este capítulo se describen brevemente estas etapas del proceso.

El proceso comienza orientando la pieza; el eje longitudinal del objeto debe coincidir con el eje X del centro de mecanizado, el cual corresponde al eje de rotación. Esta orientación es realizada por el usuario ingresando los ángulos de rotación en cada eje y la cantidad a trasladar, este proceso se repite tantas veces como sea necesario. Para esto se abre una figura con las vistas de los planos XY, YZ, ZX e isométrica y un menú con las opciones Rotar, Trasladar y Mantener (Figura 5.1).

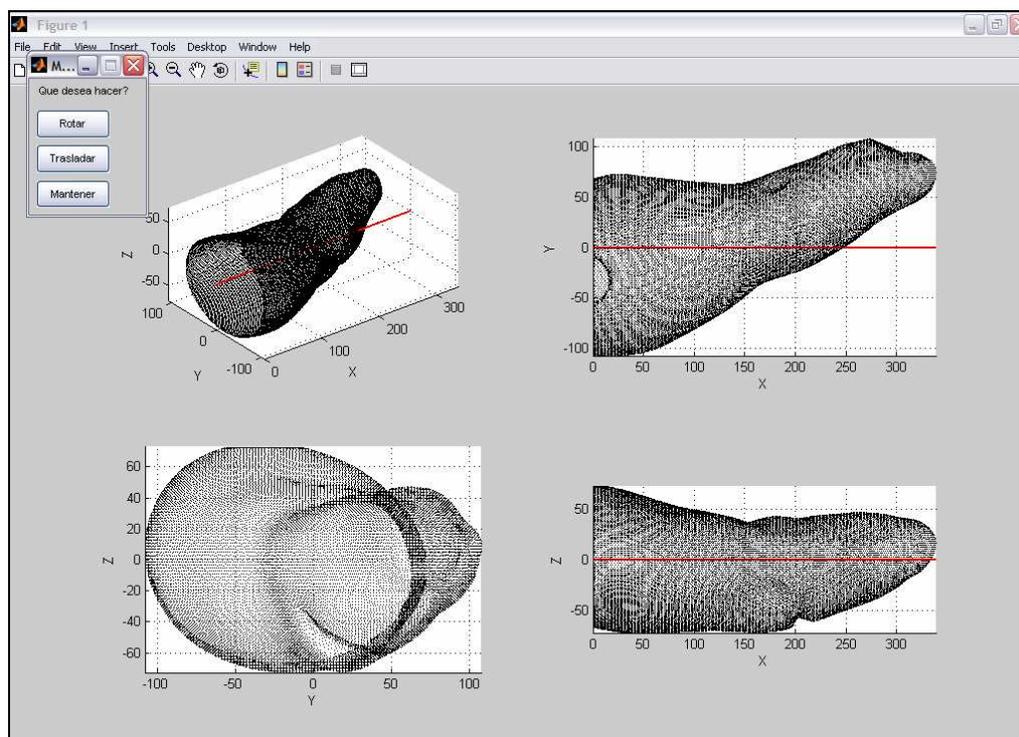


Figura 5.1: Orientación de objeto

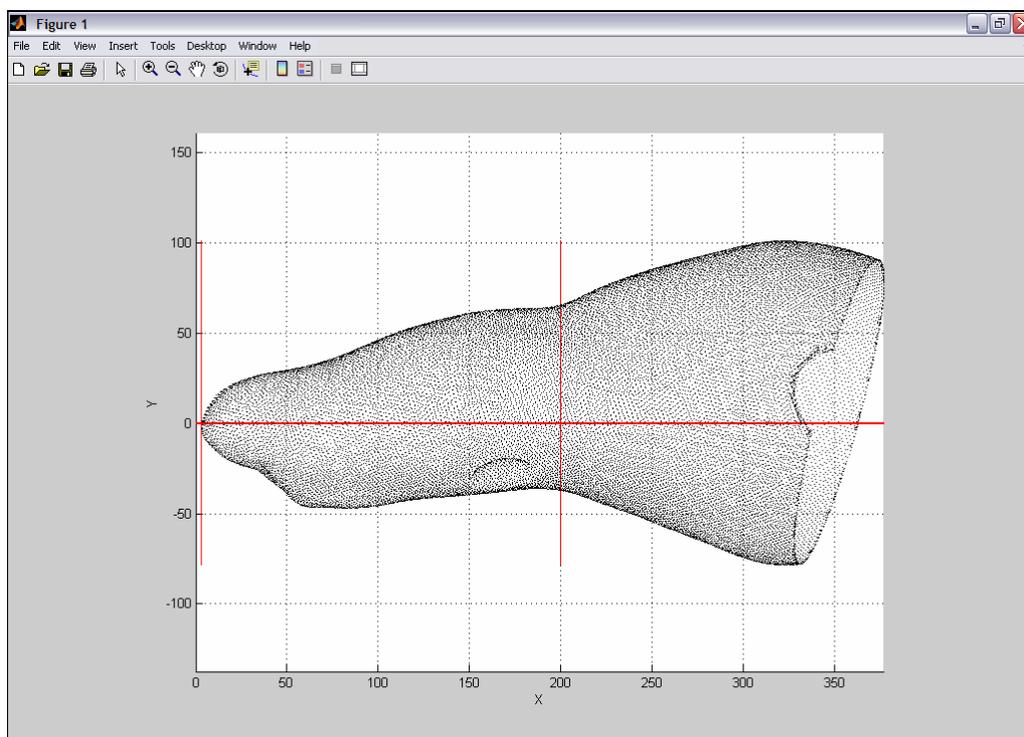


Figura 5.2: Selección límites de interés

A través del comando menú, el usuario ingresa las características de la herramienta, como el tipo de punta; plana o esférica, y si es o no de cuerpo cónico. Además se deben ingresar los siguientes valores: Diámetro de la herramienta, profundidad de corte, stepover y número de herramienta para cada operación (Figura 5.3). Con estos datos, más el diámetro inicial del material a utilizar (ingresado por el usuario) se procede a calcular las trayectorias de las herramientas, tanto de desbaste como de acabado, según lo descrito en el capítulo 4 de este trabajo. El diámetro mayor corresponde al caso de herramientas de cuerpo cónico, en que se debe considerar este valor para evitar posibles colisiones de la herramienta.



Figura 5.3: Ingreso características de herramienta

## 6. RESULTADOS

Para poder medir los resultados de este trabajo, se escaneó un molde de yeso ya modificado manualmente (Figura 6.1). Este molde fue tomado a un paciente con amputación bajo rodilla y modificado según la patología propia del paciente por un protesista experto, a partir del cual se fabricó una prótesis. Escaneando el molde se obtuvo una nube de puntos a partir de la cual se generaron las trayectorias de herramientas. Se mecanizó un molde en pedilén en un centro de mecanizado CNC con 4° eje (Figuras 6.2 y 6.3). De esta manera fue posible comparar ambos moldes, de yeso y pedilén, e identificar los errores propios del proceso de manufactura. Finalmente, a partir del molde fabricado en el centro de mecanizado, se creó un socket de prótesis de manera satisfactoria con el método tradicional; es decir, se realizó un termo laminado a partir del molde positivo de pedilén.



Figura 6.1: Molde de yeso fabricado manualmente

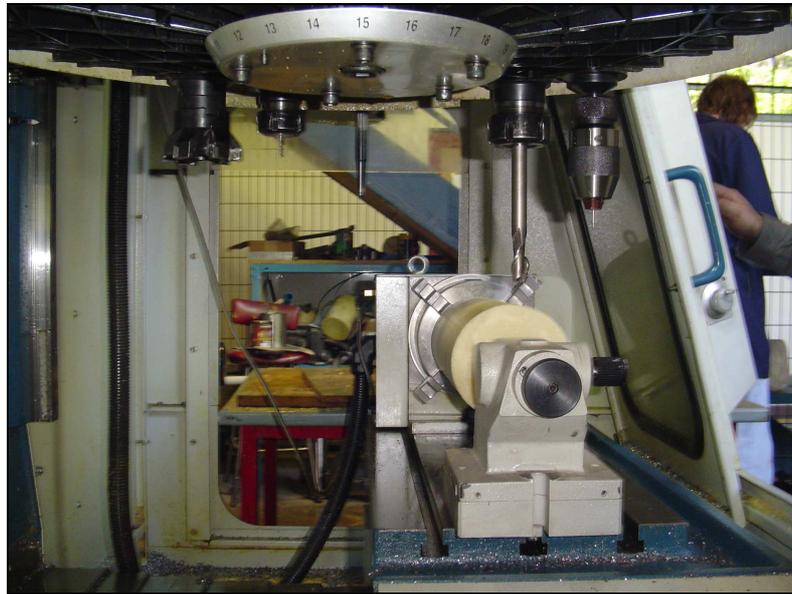


Figura 6.2: Montaje cilindro de pedilén, vista lateral

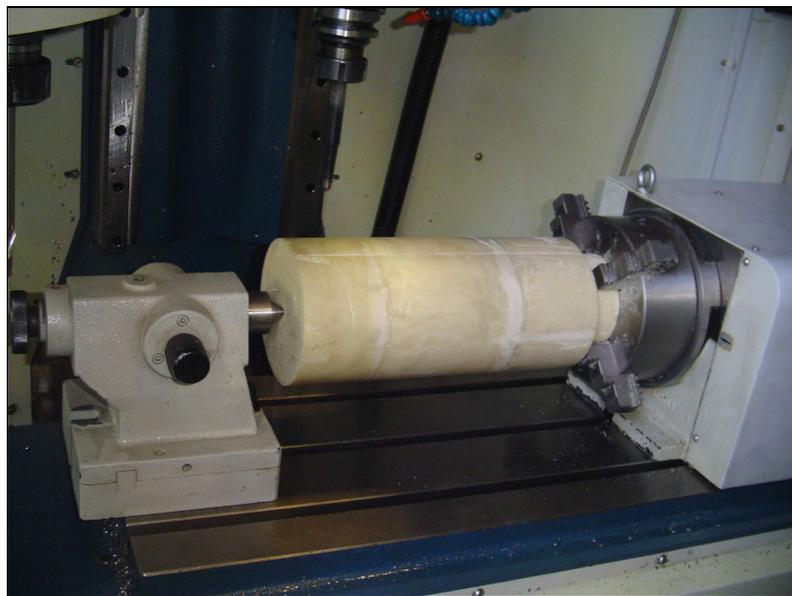


Figura 6.3: Montaje cilindro de pedilén, vista frontal

A continuación se presentan los resultados numéricos obtenidos para este muñón. El archivo utilizado, entregado por el scanner FastScan Cobra y software Polhemus, corresponde a una matriz de puntos de  $28630 \times 3$ . Una vez orientada y eliminados los puntos que estuvieran fuera del límite de mecanizado (en este caso entre 0 y 250), se obtiene una matriz de  $17444 \times 3$  (Figura 6.4).

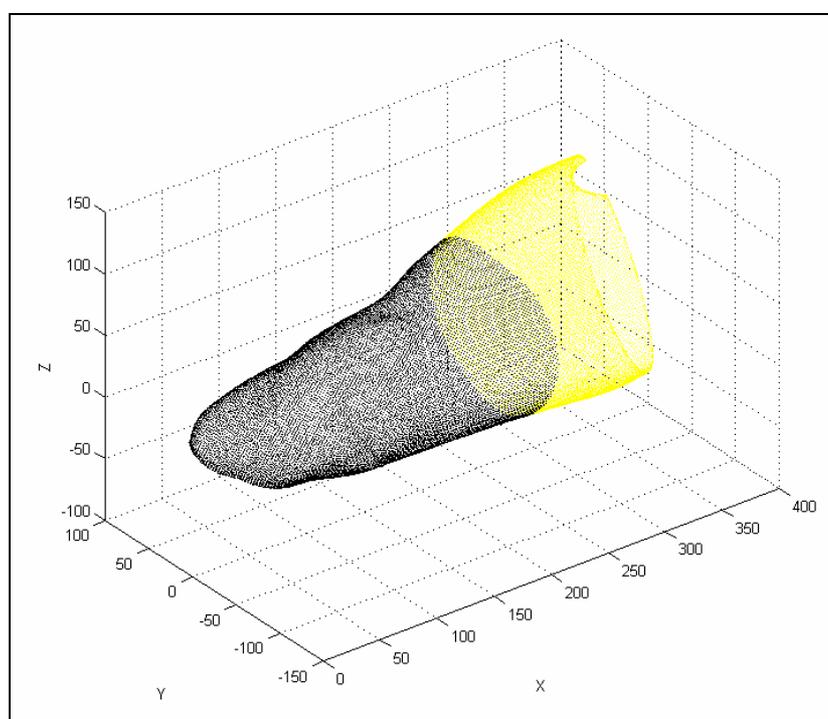


Figura 6.4: Eliminación de puntos fuera del límite de mecanizado

Se utilizó una herramienta de desbaste de punta plana, de diámetro 16 mm. y profundidad de corte de 10 mm., fijando un stepover de 90% y una herramienta de acabado con punta esférica de 10 mm. de diámetro, con un cuerpo cónico con diámetro máximo de 16 mm. y un stepover de 30%.

Las tolerancias ( $e$ ) fueron fijadas en 0.5 y 0.2 mm. para el desbaste y el acabado respectivamente. Dejando un sobrematerial de 1 mm. en la operación de desbaste y de 0 en el acabado. Las propiedades de mecanizado se presentan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Propiedades de mecanizado

	Desbaste	Acabado
rpm	1500	2000
Avance (mm/min)	2000	2200

Con estas propiedades se generaron las coordenadas de las trayectorias de ambas herramientas (Matriz  $C$ ), resultando en 382 puntos para la operación de desbaste y 2647 para la de acabado. (Figuras 6.5 y 6.6). Las matrices conteniendo las posiciones de la herramienta para todo el proceso de mecanizado ( $M$ ) resultaron de  $382 \times 4 \times 6$  y  $2647 \times 3$  para el desbaste y el acabado respectivamente. La diferencia en las dimensiones de la matriz  $M$ , se debe a que en el caso del acabado se realiza sólo una pasada, por lo que la tercera dimensión corresponde a 1, mientras que en el desbaste, el valor de la tercera dimensión (6) señala que son necesarias seis pasadas de la herramienta durante esta operación. Cabe señalar que la diferencia en la cantidad de puntos necesarios para definir ambas trayectorias (desbaste y acabado) está dada tanto por el tamaño de la herramienta utilizada, como por el stepover asociado a cada una de ellas, por lo que en el caso del desbaste, el paso de la herramienta (distancia entre un punto el siguiente) es de 14.4 mm. ( $16 \times 0.9$ ), mientras que para el acabado esta distancia es de tan sólo 3 mm. ( $10 \times 0.3$ ). En la figura 6.7 se aprecia el proceso de desbaste de un cilindro de pedilén. El código CNC generado para el mecanizado de esta pieza, se encuentra resumido y comentado en el anexo A.

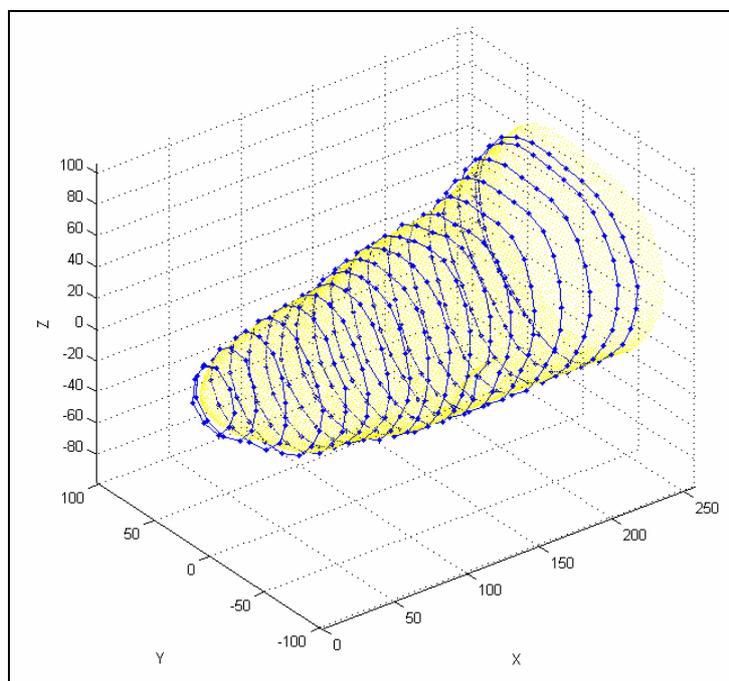


Figura 6.5: Curva de contorno de desbaste

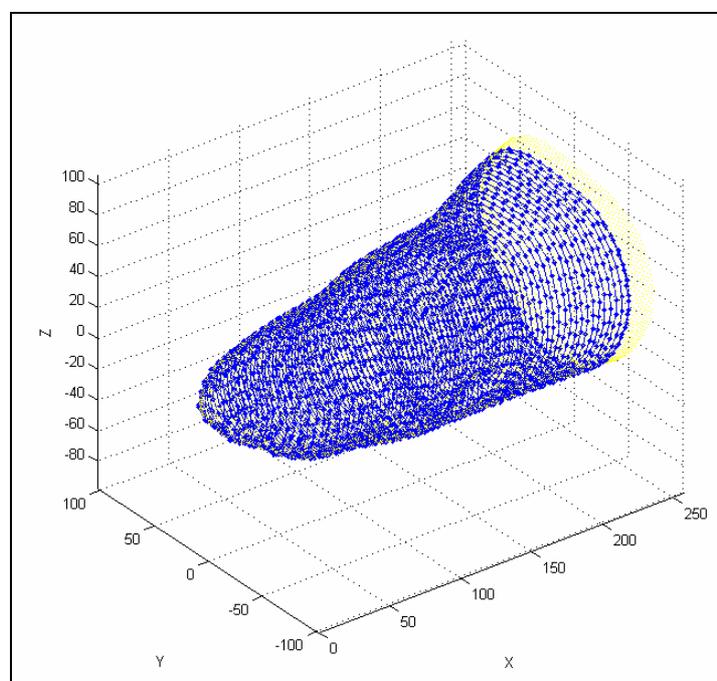


Figura 6.6: Curva de contorno de acabado

El tiempo de ejecución del programa fue de aproximadamente 4 minutos, este tiempo corresponde al tiempo que se demora Matlab en generar el archivo de texto, no incluye el tiempo tomado por el usuario en orientar el objeto ni en ingresar las distintas propiedades de las herramientas ni del mecanizado. El tiempo de mecanizado de esta pieza fue de aproximadamente 12 minutos, este tiempo no incluye el montaje de la pieza en el centro de mecanizado CNC. Comparando con el método tradicional de fabricación de sockets, se ha logrado una significativa disminución en el tiempo de fabricación, puesto que tan sólo el tiempo de secado del molde de yeso utilizado en el método tradicional es de 24 horas. Por lo que se puede asegurar que se ha logrado satisfactoriamente el objetivo de reducción del tiempo de manufactura.



Figura 6.7: Etapa de desbaste



Figura 6.8: Molde de pedilén recién mecanizado

A partir del molde generado de la forma anteriormente descrita, se fabricó un socket de prótesis. Este socket fue comparado con el realizado a partir del molde fabricado de la manera tradicional, no encontrándose diferencias relevantes. Las imágenes a continuación muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de este método de fabricación. La figura 6.8 muestra el molde de pedilén obtenido del centro de mecanizado CNC. A este molde fue necesario cortarle los extremos, y posteriormente aplicarle una delgada capa o baño de yeso líquido para reducir su porosidad (Figuras 6.9 y 6.10) y así poder realizar el termo laminado para obtener el socket propiamente tal. Las últimas tres figuras (Figuras 6.11, 6.12 y 6.13) muestran distintas vistas del socket obtenido a partir del molde fabricado con el proceso descrito en este trabajo.

Cabe señalar que si bien no existe un método cuantitativo para comparar ambos métodos de fabricación, el socket fabricado a partir del molde generado en el centro de mecanizado CNC fue aprobado por los protesistas en cuanto a tamaño, forma y calidad. En lo que a precisión se refiere, el método propuesto depende básicamente de la precisión propia del centro de mecanizado, la cual supera ampliamente a la precisión lograda mediante el trabajo manual.



Figura 6.9: Molde de pedilén, vista lateral



Figura 6.10: Molde de pedilén, vista frontal



Figura 6.11: Socket fabricado a partir de molde de pedilén, vista frontal



Figura 6.12: Socket fabricado a partir de molde de pedilén, vista lateral



Figura 6.13: Socket fabricado a partir de molde de pedilén, vista posterior

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha innovado un método para la fabricación del molde de un socket para prótesis. La toma de datos para el molde digital se realiza mediante un scanner láser 3D. Con esto el tiempo de adquisición de datos disminuye considerablemente, bajando desde dos horas de la manera actual a tan sólo unos pocos minutos. Así mismo, se reduce el tiempo de fabricación del molde al utilizar un centro de mecanizado CNC. Con este nuevo método de fabricación de prótesis y con el cambio de material, de yeso a pedilén, no sólo se elimina el tiempo de espera durante el secado del molde de yeso, sino que se logra una fabricación más precisa, independiente de la mano del protesista, y eliminando los errores que se producen producto de la reducción de volumen del yeso durante su secado. Finalmente, otra ventaja de fabricar los sockets con este método es que se genera un archivo digital de cada paciente, facilitando la reproducción de un socket en caso de ser necesario fabricar un segundo socket para un determinado paciente.

Por otro lado, en este trabajo se presenta una innovación en el método para generar trayectorias de herramientas para un centro de mecanizado CNC con 4° eje. Una de las ventajas del método desarrollado es que al generar las trayectorias directamente a partir de la nube de puntos, se elimina el tiempo de procesamiento necesario para la realización de ajustes de curva o superficies o aproximaciones matemáticas. Así mismo, la precisión del resultado depende exclusivamente de la calidad de la nube de puntos obtenida inicialmente, no habiendo pasos intermedios que puedan generar la acumulación de errores. Dada la forma en que se obtienen los puntos de contacto de la herramienta, se evita el sobrecorte de material en todo momento durante el proceso de mecanizado. Cabe señalar que la densidad de la nube de puntos, así como el ordenamiento espacial de éstos, no es de importancia en la generación de las trayectorias según este método. Sin embargo, la densidad de los puntos influye directamente en el tiempo de ejecución del algoritmo planteado.

Al generar una trayectoria helicoidal de la herramienta con respecto al objeto, así como el mecanizar según el sentido positivo y negativo del eje X, se minimizan las retracciones de la herramienta, las que representan tiempo perdido durante el proceso de mecanizado. Según lo desarrollado en este trabajo, se puede considerar que la herramienta de desbaste recorre tan sólo una curva durante todo el proceso. Por lo anterior, se considera que se ha desarrollado un método robusto para la generación de trayectorias de herramientas para el mecanizado de objetos pseudo cilíndricos. Cabe señalar, que por lo mismo, este método no es aplicable para objetos que no cumplan con la condición anterior, es decir, objetos que puedan tener superposición de planos vistos desde la posición de la herramienta, ya que sólo se consideraría el plano superior, y no se lograría la figura deseada.

Al trabajar directamente con una nube de puntos se pierde cierta información de la geometría del objeto, como por ejemplo, la dirección de las normales y la curvatura de éste. Esta información puede resultar relevante al momento de querer optimizar las trayectorias de herramientas. Se deja abierta la posibilidad de incluir en el futuro algoritmos para obtener esta información a partir de la nube de puntos, logrando de esta forma, una mejor optimización del proceso de mecanizado. Así mismo, se debe incluir un algoritmo capaz de filtrar ruido del archivo de entrada, puesto que esto puede producir grandes errores en la generación de trayectorias de herramientas según el método planteado.

Por último, se puede concluir que se ha desarrollado un método robusto para la fabricación de moldes de sockets para prótesis, disminuyendo considerablemente el error y tiempo de manufactura de éstos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Faulkner, V.W. y Walsh, N.E. (1989), “*Computer Designed Prosthetic Socket from Analysis of Computed Tomography Data*”, Journal of Prosthetic & Orthotics. 1(3), 154-164.

Oberg, K., Kofman, J., Lindstrom, B. and Sigblad, G. (1989), “*The CAPOD System-A Scandinavian CAD/CAM System for Prosthetic Sockets*”, Journal of Prosthetics & Orthotics. 1(3) 139-148.

Johansen, S. and Oberg, T. (1998), “*Accuracy and Precision of Volumetric Determination using two Commercial CAD Systems for Prosthetics: A Technical Note*”, Journal of Rehabilitation Research and Development. 35(1).

Rogers, B., Stephens, S., Bosker, G. and Crawford, R. (2000), “*Double-Wall, Transtibial Prosthetic Socket Fabricated Using Selective Laser Sintering: A Case Study*”, Journal of Prosthetics & Orthotics 12(3), 97.

Rogers, B., Bosker, G., Crawford, R., Faustini, M., Neptune, R., Walden, G. and Gitter, A. (2007), “*Advanced trans-tibial socket fabrication using selective laser sintering*, Prosthetic and Orthotics International 31(1), 88-100.

Tan Kim Cheng, T., Peter Lee Vee Sin, Tam Kock Fye and Lye Sau Lin (1998), “*Automation of Prosthetic Socket Design and Fabrication Using Computer-Aided-Design/Computer Aided Engineering and Rapid Prototyping Techniques*”, The First National Symposium of Prosthetics and Orthotics. Institute of Materials Research and Engineering, Singapore. School of Engineering, Temasek Polytechnic.

Jensen, J., Steen, Poetsma, P.A. and Thanah, N.H. (2005), “*Sand-casting technique for trans-tibial prostheses*”, Prosthetics and Orthotics International, 29(2), 165-175.

Park, S. (2003), *Tool-path generation for Z-constant contour machining*, Computer-Aided Design 35, 27-36.

Lee, E. (2003), *Contour offset approach to spiral toolpath generation with constant scallop height*, Computer-Aided Design 35, 511-518.

Park, S.C, Choi, B.K. (2000), *Tool-path planning for direction-parallel area milling*, Computer-Aided Design 32, 17-25.

Ding, S, Mannan, M.A, Poo, A.N. Yang, D.C.H. Han, Z (2003), *Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces*, Computer-Aided Design 35, 141-153.

Feng, H, Teng, Z. (2005), *Iso-planar piecewise linear NC tool path generation from discrete measured data points*, Computer-Aided Design, 37, 55-64

Park, S y Chung, Y. (2003), *Tool-path generation from measured data*, Computer-Aided Design 35, 467-475

Yuven, S, Dongming G, Zhenyuan, J, Haixia W. (2006), *Iso-parametric tool-path generation from triangular meshes for free-form surface machining*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 28, 721-726

Choi, Y.K, Banerjee, A. Lee, J.W. (2007), *Tool path generation for free form surfaces using Bézier curves/surfaces*, Computers & Industrial Engineering 52, 486-501.

Jung, J. (2005), *NC tool path generation for 5-axis machining of free surfaces*. Journal of Intelligent Manufacturing, 16, 115-127.

Chui, K.L., Chiu, W.K, Yu, K.M. (2007), *Direct 5-axis tool-path generation from point cloud input using 3D biarc fitting*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

Chui, K.L, Yu, K.M, Lee, T.C. (2002). *Direct tool-path generation from massive point input*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture; Professional Engineering Publishing 216 (2), 199-206.

Lin, A., Liu, H.T. (1998), *Automatic generation of NC cutter path from massive data points*, Computer-Aided Design 30 (1), 77-90.

Park, S. (2004), *Sculptured surface machining using triangular mesh slicing*. Computer-Aided Design 36, 279-288.

Wenling, Ch., Jiangjiang Z., Lei, L., Qiulin, D. (2003), *An approach to gouging avoidance for sculptured surface machining*. Journal of Materials Technology 138, 458-460.

Li, S., Jerard, R. (1994), *5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter*. Computer-Aided Design 26 (3), 165-178.

Jimeno, A, Sánchez, H, Mora, H, García-Chamizo, J.M. (2006), *FPGA-based tool path computation An application for shoe last machining on CNC lathes*, Computers in Industry 57, 103-111.

*Programación y operación de centro de mecanizado CNC*. Apuntes curso ICM 2582 (2005), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Aising J. (2001), *Reconstrucción y reconocimiento de superficies a partir de una nube de puntos*. Tesis de maestría no publicada, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Arenas, F, Masjuán, G, Villanueva, F. (2000), *Trigonometría y Geometría Analítica*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Berlín, D. y Camelio J. (1997). *Manual de programación y uso de un torno CNC*. Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

**ANEXOS**



```

.      .      .      .      .      .
N4654 X 42.038 Z 29.268 W 1220.120 F 2000.000
N4657 X 43.181 Z 34.834 W 1248.700 F 2000.000
N4660 Z 91.850 F 4000.000
N4663 X 52.298 W 1476.613
N4666 Z 83.500
N4669 X 52.298 Z 34.699 W 1476.613 F 2000.000
N4672 X 53.262 Z 30.385 W 1500.734 F 2000.000
.      .      .      .      .      .
N4783 X 82.213 Z 34.237 W 2224.493 F 2000.000
N4786 X 83.191 Z 35.421 W 2248.939 F 2000.000
N4789 Z 91.850 F 6000.000
N4792 X 39.596 W 1159.068
N4795 X 39.596 Z 26.919 W 1159.068 F 500.000
N4798 X 38.484 Z 30.099 W 1131.272 F 2000.000
.      .      .      .      .      .
N4903 X 8.000 Z 20.452 W 62.726 F 2000.000
N4906 X 8.000 Z 24.917 W 29.217 F 2000.000
N4909 Z 108.550 F 8000.000
N4912 W 0.000
N4915 X 0.000 Y 100.000
N4918 T05
N4921 M06
N4924 G55 D1 S2000.000 M3
N4927 G1 X 8.000 Y 0.000 Z 108.550 W 0.000 F 8800.000
N4930 X 8.000 Z 24.550 W 0.000 F 550.000
N4933 X 8.000 Z 21.572 W 20.774 F 2200.000
N4936 X 8.000 Z 18.016 W 44.341 F 2200.000
.      .      .      .      .      .
N4966 X 8.000 Z 24.844 W 352.474 F 2200.000
N4969 X 8.000 Z 22.507 W 373.007 F 2200.000
N4972 X 8.188 Z 20.043 W 395.620 F 2200.000
N4975 X 8.399 Z 16.508 W 420.928 F 2200.000
.      .      .      .      .      .
N5809 X 49.935 Z 38.666 W 5405.245 F 2200.000
N5812 X 50.046 Z 36.138 W 5418.522 F 2200.000
N5815 X 50.164 Z 33.377 W 5432.718 F 2200.000
.      .      .      .      .      .
N9999 X 244.953 Z 71.348 W 28807.386 F 2200.000
N9999 X 245.013 Z 72.665 W 28814.604 F 2200.000
N9999 X 245.013 Z 73.830 W 28821.691 F 2200.000
.      .      .      .      .      .
N9999 X 245.013 Z 57.633 W 29019.225 F 2200.000
N9999 X 245.013 Z 60.134 W 29028.155 F 2200.000
N9999 X 245.013 Z 62.314 W 29036.714 F 2200.000
.      .      .      .      .      .
N9999 X 245.013 Z 70.491 W 29161.081 F 2200.000
N9999 X 245.013 Z 71.589 W 29168.386 F 2200.000
N9999 Z 108.550 F 8800.000
N9999 W 29160.000
N9999 M 30
%
```

La herramienta se “salta” los puntos entre X=43.181 W=1248.7 y X=52.298 W=1476.613

Se alcanza un nuevo límite máximo de mecanizado X=83.191, por lo que cambia el sentido del mecanizado, en esta oportunidad la herramienta se “salta” los primeros puntos del camino de regreso, entre X=83.191 W=2248.939 y X=39.596 W=1131.272

Finaliza la operación de desbaste, la herramienta se levanta por sobre el objeto y se lleva el sistema a W=0 X=0 Y=100 para realizar el cambio de herramienta (se cambia, en este caso, de T2 a T5)

La herramienta de acabado se posiciona para comenzar a mecanizar. El acabado se realiza a una velocidad de desplazamiento de la herramienta de 2200 mm/min.

El incremento de W depende tanto del diámetro de la herramienta como del radio del objeto en ese punto, mientras que el incremento en X sólo depende del radio de la herramienta y el stepover dado.

Se alcanza el límite máximo de mecanizado X=245.013, por lo que se realiza una revolución con X constante. La diferencia con el límite máximo para el desbaste se debe a la diferencia entre los diámetros de la herramientas.

Finaliza la operación de acabado, y con ello, el mecanizado. La herramienta se levanta por sobre el objeto, el cual es llevado a W=0 (29160 múltiplo de 360)