



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Desarrollo de programa en VBA de MS Excel para la generación de trayectorias en el mecanizado de 5 ejes de rodetes de compresores centrífugos

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Eduardo Muñoz Díaz
Director: Manuel Estrems Amestoy
Codirector: Wilmer E. Cumbicus Jiménez

Cartagena, 10 de junio de 2021

ÍNDICE

1. Introducción	3
1.1. Máquinas CNC.....	3
1.2. Compresor centrífugo	5
Objetivos	7
2. Metodología para la programación de trayectorias	8
2.1. Programas CAD/CAM.....	8
2.2. Modelo matemático	11
3. Geometría del rodete de un compresor centrífugo	15
3.1. Geometría de un toroide.....	15
3.2. Geometría de un álabe	17
4. Programa de mecanizado del rodete de un compresor centrífugo.....	20
4.1. Programa de mecanizado del toroide.....	20
4.2. Programa de mecanizado de los álaves.....	25
4.3. Programa de mecanizado de los alabes intermedios.....	34
4.4. Programación VBA en Excel.....	34
4.5. Código ISO	40
5. Estado de calibración.....	41
5.1. Danobat Danumeric NI-650.....	42
5.2. LAGUN L850	43
6. Mecanizado CNC del rodete.....	47
6.1. Material base	47
6.2. Memoria de taller	47
7. Memoria económica	50
8. Conclusiones.....	51
9. Bibliografía	52
Anexos	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Centro de mecanizado CNC de 5 ejes.....	4
Figura 2. Compresores centrífugos	5
Figura 3. Partes de un compresor centrífugo.....	5
Figura 4. Toroide parametrizado.....	12
Figura 5. Triedro de Darboux.....	13
Figura 6. Toroide.....	15
Figura 7. Circunferencia C1	16
Figura 8. Circunferencia C2	16
Figura 9. Parámetros de un toroide	17
Figura 10. Superficie tórica de un rodete parametrizada.....	17
Figura 11. Plano tangente a dos circunferencias de un toroide	18
Figura 12. Círculos de Villarceau	18
Figura 13. Círculos de Villarceau inscritos	19
Figura 14. Danobat Danumeric NI-650.....	20
Figura 15. Refrentado.....	21
Figura 16. Ciclo fijo G85	22
Figura 17. Dimensiones del bruto	24
Figura 18. Trayectoria de la herramienta en el plano XZ	24
Figura 19. Resultado simulación del torneado con ciclo G85.....	25
Figura 20. Proyección del vector normal <i>N</i> en el plano XY	26
Figura 21. Proyección del vector normal <i>N</i> en el plano XZ	27
Figura 22. Sección inicial de un álabe.....	29
Figura 23. Posición de entrada de la herramienta	30
Figura 24. Trayectoria de entrada de la herramienta.....	31
Figura 25. Posición de salida de la herramienta	31
Figura 26. Trayectoria de salida de la herramienta	32
Figura 27. Sección superior del rodete.....	33
Figura 28. Hoja de cálculo Excel	35
Figura 29. Parámetros de diseño del rodete en Excel.....	35
Figura 30. Geometría de un álabe en Excel.....	36
Figura 31. Tiendro de Darboux en Excel	36
Figura 32. Coordenadas transformadas y trayectorias en Excel.....	37
Figura 33. Código ISO de un álabe en Excel	37
Figura 34. Distancia de seguridad en Excel	37
Figura 35. Intersección de trayectorias en Excel.....	38
Figura 36. Trayectoria de un álabe intermedio en Excel.....	38
Figura 37. Código ISO de un álabe intermedio en Excel.....	38
Figura 38. Macros en Excel.....	39
Figura 39. Puntos de referencia.....	42
Figura 40. Decalaje de origen	43
Figura 41. Posición de las ranuras mecanizadas	44
Figura 42. Dimensiones del bruto	47
Figura 43. Toroide mecanizado.....	48
Figura 44. Mecanizando un álabe.	48
Figura 45. Alabes mecanizados.....	49
Figura 46. Rodete. Resultado final.....	49

1. Introducción

1.1. Máquinas CNC

Una máquina de control numérico (*Computer Numerical Control, CNC*) es una máquina que puede ser programada con instrucciones precisas mediante un ordenador central. Puede dar forma, con la herramienta adecuada, a diferentes tipos de materiales, desde vidrio o madera hasta metales como el acero.

1.1.1. Contexto histórico

La revolución industrial, desde comienzos del siglo XX, y el uso intensivo de maquinaria pesada, necesitaba constantemente procesos cada vez más eficientes. La industria necesitaba gran cantidad de mano de obra hace unos 70 años, lo cual no sólo requería enormes plantillas de trabajadores, sino que además influía en la repetibilidad, precisión y calidad, encarecía los precios de fabricación y reducía la producción.

A causa del desafío industrial durante la primera mitad del siglo XX, las nuevas tecnologías tomaron impulso hacia la creación de procesos automatizados de fabricación, es decir, hacia el diseño de máquinas programables para realizar automáticamente todas las tareas propias de un trabajador.

En la década de 1950, en EE. UU, surgió el concepto de control numérico (CN) en una fresadora, que utilizaba tecnología de válvulas de vacío. La programación de instrucciones se realizaba mediante tarjetas perforadas.

Alrededor de 1960, las válvulas de vacío fueron remplazadas por transistores, hasta la introducción de las computadoras en 1970, los principios de lo que hoy conocemos como tecnología del CNC.

1.1.2. Tipos de máquinas CNC

Los diversos tipos de máquinas CNC alcanzan una pluralidad muy extensa en el sector industrial. Están aumentando apresuradamente y a medida que avanza el desarrollo de la tecnología, también incrementan los diferentes usos en diversos procesos de mecanizado. Es imposible identificar todas las utilidades, la siguiente es una lista de algunas aplicaciones:

- Fresadoras
- Tornos
- Impresoras 3D

- Máquinas de electroerosión
- Corte por agua y laser
- Máquinas soldaduras, dobladoras, máquinas de coser, etc.

1.1.3. Características de una máquina CNC

La principal característica de una máquina CNC es la capacidad de automatización del proceso de mecanizado, ya que solamente es necesaria la intervención de una persona en unos pocos pasos del proceso. Lo que se traduce en ahorro de tiempo, mayor producción y menores costes. La calidad y precisión de las piezas obtenidas son superiores a una pieza obtenida de forma artesanal, además de poder repetir piezas de características idénticas a la original. Por último, ofrecen versatilidad para personalizar proyectos, hacer cambios adaptables y rápidos, además de proteger de riesgos innecesarios al trabajador.

Las máquinas CNC comparten una particularidad en común, tienen dos o más orientaciones programables de movimiento llamadas ejes. Un eje de movimiento puede ser rotatorio (con una trayectoria circular) o lineal (en línea recta). La complejidad de la programación de una máquina CNC viene dada por la cantidad de ejes que posee, cuantos más ejes, el diseño de una pieza y su programa de mecanizado es más complicado. Pueden tener una variedad muy amplia de combinaciones de ejes.

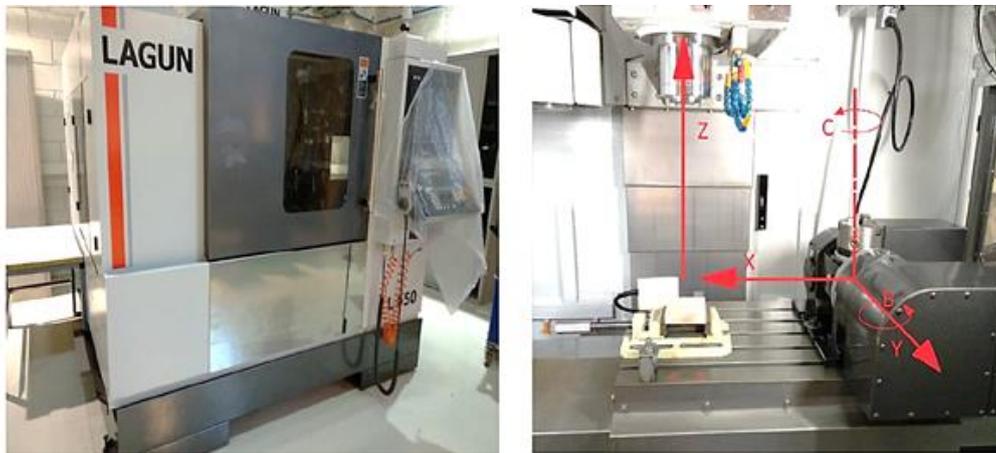


Figura 1. Centro de mecanizado CNC de 5 ejes.

Para que una máquina CNC tenga la capacidad de guiar una herramienta a lo largo de una trayectoria en la que intervienen varias direcciones de movimiento, es necesario combinar el movimiento de varios ejes de forma sincrónica. Esta clase de movimiento simultáneo se define como *Interpolación de los ejes en una máquina CNC*.

1.1.4. Máquina CNC de 5 ejes

Una máquina CNC de 5 ejes (Figura 1) es un centro de mecanizado con 3 ejes cartesianos (X, Y y Z) más 2 ejes rotacionales alternativos (B y C). Permiten el mecanizado de piezas que con una máquina CNC de 3 ejes serían imposible.

Los principales motivos de su utilización en la industria moderna están basados en su precisión, rapidez y capacidad de realizar piezas complejas con alta calidad. Estas propiedades concretas, hacen que cualquier industria pueda reducir costes y aumentar sus ganancias, con una inversión inicial de capital mayor.

1.2. Compresor centrífugo

Un compresor es una turbomáquina, cuya función consiste en impulsar un fluido compresible de un punto a otro, aumentando su presión y disminuyendo su volumen.

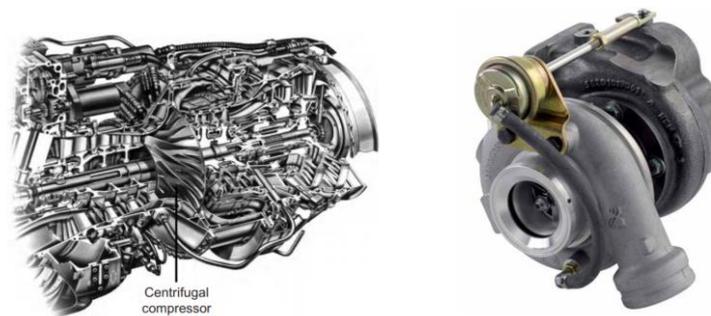


Figura 2. Compresores centrífugos

Los compresores centrífugos, o también llamados radiales, incrementan la energía cinética de un fluido compresible aumentando su velocidad tangencial. El fluido entra al compresor a través de la tobera de admisión, circulando por el impulsor o **rodete**. El rodete recibe un par de potencia a través del eje rotatorio del compresor gracias al cual aumenta la energía cinética del fluido. En la Figura 3 se puede observar el rotor de un compresor centrífugo.

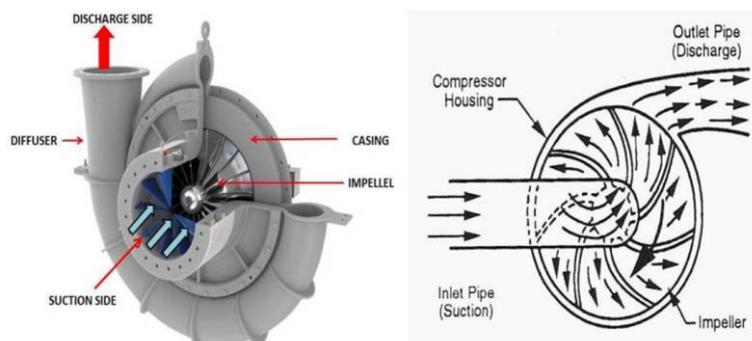


Figura 3. Partes de un compresor centrífugo

Los rodetes de compresores centrífugos son seleccionados habitualmente para demostraciones y enseñanza de mecanizado en 5 ejes. La complejidad geométrica y la espectacularidad de ver los 5 ejes interpolados moviéndose con amplios giros han hecho popular estos elementos en ferias y demostraciones comerciales.

Por otro lado, el compresor centrífugo está cada vez más presentes en la industria por su robustez y simplicidad de funcionamiento, siendo la opción preferida para:

- La compresión de gases en la admisión de motores, tanto de combustión interna como en pequeñas turbinas de gas.
- La producción de gases licuados como el GLP (Gas licuado del petróleo).
- Compresión de gases refrigerantes en máquinas altamente silenciosas

Siendo el rodete el elemento más complejo del compresor, al cual se procederá al estudio de su fabricación y precisión indispensable para la eficiencia final del compresor.

Objetivos

En este proyecto se pretende automatizar la generación de trayectorias de herramienta, de un centro de mecanizado CNC de 5 ejes, para el mecanizado de un rodete de un compresor centrífugo. El proyecto está dividido en 5 fases.

1º Fase: Geometría de la superficie de un rodete.

Analizar geoméricamente la superficie de un rodete y parametrizar las ecuaciones.

2º Fase: Programa de la geometría de un rodete.

Implementar la geometría en una hoja de cálculo de Excel y representar gráficamente la geometría.

3º Fase: Código ISO

Programación de la hoja de cálculo para que genere el código ISO para una máquina CNC de 5 ejes.

4º Fase: Calibración.

Comprobar el estado de calibración de los centros de mecanizado.

5º Fase: Mecanizado del rodete.

Mecanizado físico del rodete en una máquina CNC de 5 ejes.

2. Metodología para la programación de trayectorias

En una máquina CNC, para la fabricación de una pieza concreta, se puede realizar de diferentes formas.

- **Manualmente**, por un operario, utilizando programas predefinidos en la máquina CNC o mediante control manual de la misma.
- A través de programas informáticos (programas **CAD/CAM**) que generan el código necesario para llevar a cabo la operación. Estos programas informáticos han revolucionado los procesos de mecanizado, convirtiéndolos en un elemento esencial para el diseño automatizado de piezas.
- Por un **modelo matemático**. Generando la trayectoria de la herramienta mediante ecuaciones y aproximaciones.

2.1. Programas CAD/CAM

2.1.1. CAD

Los programas denominados CAD (*Computer-Aided Design*) abarcan un amplio sector de herramientas de diseño computarizado en Ingeniería. Estas herramientas se utilizan en la representación gráfica y el análisis, ya sea en 2D ó 3D, de una pieza simple o de un proyecto más complejo.

La principal ventaja en la utilización de sistemas informático CAD es la reducción del tiempo de diseño, así como permitir modificar el modelo y observar en tiempo real los cambios.

2.1.2. CAM

La fabricación Asistida por Computadora (*Computer-Aided Manufacturing*) se trata del uso de aplicaciones de software de control numérico que generan instrucciones de control de una pieza diseñada en CAD.

Cuando es completado un diseño en CAD, un programa CAM puede generar el código necesario para el mecanizado. Existen herramientas que incluyen tanto sistemas CAD como CAM, como *SolidWorks*.

El software CAM prepara un modelo para el mecanizado mediante varias acciones, que incluyen:

- Verificar si el modelo tiene errores en el diseño de la geometría, pudiendo afectar al proceso de fabricación.
- Crear trayectorias para la herramienta, es decir, un conjunto de coordenadas que la herramienta de la máquina CNC seguirá durante el proceso de mecanizado.
- Configuración de los parámetros de la máquina necesarios, incluida la velocidad de corte, velocidad de avance, distancia de seguridad, estrategia de mecanizado, etc.
- Mejor orientación de pieza para maximizar el rendimiento del mecanizado.

Código ISO

El control numérico se basa en un código alfanumérico (compuesto por letras y números) que debe introducirse en la máquina por medio de teclado, mediante envío por la intranet de la fábrica, o mediante el canal serie RS232. El control numérico debe transformar el código alfanumérico en señales eléctricas con el fin de mover los motores que controlan los movimientos de la máquina-herramienta.

El conjunto de datos alfanuméricos se conoce como programa pieza o programa de control numérico. Un programa CNC está desarrollado por un conjunto de instrucciones o bloques debidamente ordenados, en el cuerpo del programa o subrutinas, facilitan para el centro de mecanizado CNC los datos requeridos para realizar el mecanizado de la pieza programada.

Las instrucciones o bloques que forman el programa CNC y las subrutinas pueden ser definidas mediante **código ISO** o algún lenguaje específico de nivel superior. Para la preparación del programa se utilizarán instrucciones escritas en uno de los dos tipos de lenguaje, incluso adoptando en un mismo programa instrucciones escritas en ambos lenguajes de programación.

Una instrucción en **código ISO** puede incluir las siguientes funciones, sin ser necesario utilizar todas ellas. Las instrucciones no tienen un orden establecido, pueden programarse en cualquier lugar del bloque. Las excepciones serán la identificación del bloque y la condición de salto, que siempre deben programarse al inicio del bloque.

- **Identificación del bloque.** Se describe con la letra 'N'. La identificación del bloque debe programarse siempre al inicio de cada bloque del programa.
- **Condición de salto de bloque.** Utiliza el carácter '/'. El programa CNC no ejecutará los bloques en los que se encuentre programada si la marca de salto de bloque se encuentra activa, continuando con la ejecución en el bloque siguiente.

- **Funciones preparatorias.** Se definen con la letra ‘G’. Las instrucciones G describen las condiciones de trabajo y la geometría, como ciclos fijos, interpolaciones lineales, circulares, chaflanes, etc.
- **Funciones auxiliares.** Definidas con las letras ‘H’ y ‘M’ seguidas del número de la función. Las funciones auxiliares pueden controlar diferentes situaciones de funcionamiento de la máquina (taladrina, sentido de giro del cabezal, parada del cabezal, etc.).
- **Cotas del punto.** Descritas en función del eje de movimiento en el que se sitúan (X, Y, Z, B, C, etc.) Estas funciones establecen el movimiento en los ejes de la máquina CNC. Según el tipo de métrica utilizada, la forma de programación podrá ser:
 - a) Milímetros con un formato 5.3 (5 números enteros con 3 decimales).
 - b) Pulgadas con un formato 4.4 (4 números enteros con 4 decimales).
- **Velocidad del cabezal.** Determinada con la letra ‘S’. Esta función describe la velocidad del cabezal. El nombre del cabezal estará definido por 1 ó 2 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.
- **Avance de los ejes.** Determinada con la letra ‘F’ seguida del valor de avance requerido. Puede venir expresado en avance por vuelta (mm/rev) o en avance por minuto (mm/min).
- **Número de herramienta.** Se indica con ‘T’ seguida con la numeración de la herramienta. Esta instrucción escoge la herramienta con la que se va a realizar el programa de mecanizado.
- **Número de corrector.** Se representa con la letra ‘D’ seguida del número de corrector. Esta función selecciona el corrector de la herramienta. El número de correctores utilizables para cada una de las herramientas se detalla en la tabla de herramientas.
- **Número de repeticiones de bloque.** Indicado con las letras ‘NR’. Define las veces que se ejecutará la repetición de un bloque. Sólo se podrá utilizar en bloques cuando se haya programado un movimiento de la herramienta. Éste se ejecutará el número de veces que se haya programado la repetición del bloque si el bloque se encuentra bajo la acción de un ciclo fijo. Cuando se utiliza NR0, no se ejecuta el ciclo fijo al final de cada repetición, pero sí los desplazamientos.

- **Comentarios de bloques.** El código ISO puede introducir en los bloques información a modo de comentario, dentro de dos paréntesis ‘()’. Esta información se ignora cuando se ejecuta el programa.

2.2. Modelo matemático

2.2.1. Definición de una curva

Las curvas en el espacio representan primitivamente las trayectorias del movimiento de un punto.

Se puede observar como ejemplo las trayectorias de un barco en el mar, de un planeta en el espacio, de un proyectil en el aire, etc. Describen la idea de curva. Por lo tanto, considerando el punto de contacto entre una superficie sólida y la herramienta de mecanizado, podemos describir el movimiento de la herramienta sobre la superficie como una trayectoria.

La definición de una curva, desde un punto de vista analítico, en coordenadas cartesianas es:

Considerando en \mathbb{R}^3 la referencia afín $\{0; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}\}$

Una curva ζ es una aplicación $\bar{R}: I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$, es decir,

$$\bar{R}(\lambda) = (x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)).$$

Donde λ es el parámetro que recorre la curva y, usualmente, I es un intervalo de longitud finita o infinita.

La expresión $\bar{R}(\lambda) = x(\lambda)\vec{i} + y(\lambda)\vec{j} + z(\lambda)\vec{k}$ recibe el nombre de *expresión cartesiana vectorial de la curva*.

Si se descompone la *expresión cartesiana vectorial* en sus funciones componentes se obtienen las ecuaciones paramétricas cartesianas de la curva. Estas serán:

$$x = x(\lambda), y = y(\lambda), z = z(\lambda), \text{ para } \lambda \in I$$

Unas ecuaciones cartesianas explícitas son aquellas en las cuales el parámetro es una de las variables x , y ó z

Estas ecuaciones serán:

$$x = x, y = y(x), z = z(x) \text{ ó}$$

$$x = x(y), y = y, z = z(y) \text{ ó}$$

$$x = x(z), y = y(z), z = z$$

Otra forma de definir una curva, bajo las hipótesis de aplicación del *teorema de las funciones implícitas*, es:

$$F(x, y, z) = 0$$

$$G(x, y, z) = 0$$

Denominadas ecuaciones cartesianas implícitas de la curva. Donde la curva viene dada como intersección de superficies.

2.2.2. Representación paramétrica de una superficie

Desde de un punto de vista intuitivo asociamos a una superficie la idea de área. Así, la cara de una naranja, el casco de un buque, un recorte de periódico, etc. Nos sugieren la idea de superficie.

El estudio de las superficies exige una representación analítica de ellas.

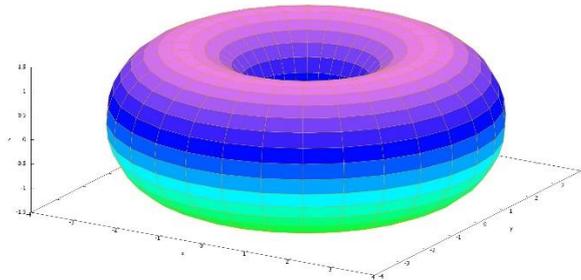


Figura 4. Toroide parametrizado

Definición: Se dice que un conjunto $S \subset \mathbb{R}^3$ es una superficie parametrizada si existe un dominio $D \subset \mathbb{R}^2$ y una aplicación:

$$\vec{r}: D \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$\vec{r}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

Tal que la imagen de \vec{r} sea S .

Por tanto, u y v son los nuevos parámetros representantes de S a través de su aplicación paramétrica \vec{r}

Definición: Se dice que un punto $P \in S$ con $\overline{OP} = \vec{r}(u, v)$, es un punto regular para la parametrización \vec{r} si se verifica: $\vec{r}_u(u, v) \times \vec{r}_v(u, v) \neq 0$ para todo $(u, v) \in D$, siendo:

$$\vec{r}_u(u, v) = (x_u(u, v), y_u(u, v), z_u(u, v))$$

$$\vec{r}_v(u, v) = (x_v(u, v), y_v(u, v), z_v(u, v))$$

2.2.3. El triedro de Darboux

El *triedro de Darboux* es una referencia móvil relacionada con una curva sobre una superficie. Se trata de definir en cada $\vec{r}(u, v)$ en que sea posible, una referencia $\{X(u, v); \vec{t}(u, v), \vec{N}(u, v), \vec{b}(u, v)\}$, donde los vectores $\vec{t}(u, v), \vec{N}(u, v), \vec{b}(u, v)$ forman un triedro ortonormal llamado triedro móvil o triedro de Darboux.

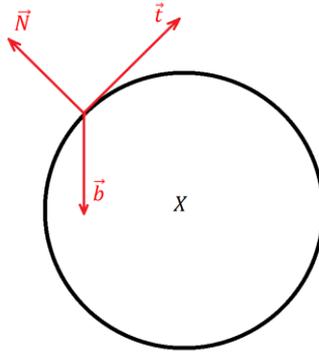


Figura 5. Triedro de Darboux

Sea una superficie $X \subset \mathbb{R}^3$ con representación paramétrica regular.

$$X(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

Con $(u, v) \in D \subseteq \mathbb{R}^2$

Se dice que un vector \vec{t} es tangente a una superficie X en un punto P si es tangente en P a una curva contenida en X .

Por tanto, cualquier vector tangente a la superficie X se escribe como combinación lineal de los vectores \vec{X}_u y \vec{X}_v

La dirección normal a la superficie en P es la dirección ortogonal al plano tangente a la superficie X en P .

El vector director de la recta normal en P es:

$$\vec{X}_u \wedge \vec{X}_v$$

Mientras que el vector normal unitario viene definido como:

$$\vec{N} = \frac{\vec{X}_u \wedge \vec{X}_v}{|\vec{X}_u \wedge \vec{X}_v|} \quad (1)$$

El vector tangente en P se define como:

$$\frac{d\vec{X}}{dv}$$

Mientras que el vector tangente unitario es:

$$\vec{t} = \frac{\frac{d\vec{X}}{dv}}{\left| \frac{d\vec{X}}{dv} \right|} \quad (2)$$

Y el vector binomial unitario como:

$$\vec{b} = \vec{t} \wedge \vec{N} \quad (3)$$

3. Geometría del rodete de un compresor centrífugo

La geometría de un rodete es compleja, está compuesta por una superficie curva sobre la que hay mecanizados una serie de alabes y alabes intermedios. La superficie curva primitiva es la cuarta parte complementaria de un toroide. Por otro lado, los alabes están definidos sobre unos círculos inscritos en el toroide denominados “*Círculos de Villarceau*”.

3.1. Geometría de un toroide

En geometría, **el toroide** es la superficie de revolución generada por circunferencia simple que gira alrededor de un eje de rotación con el mismo radio de giro. En la vida cotidiana se puede encontrar este tipo de geometría sin ser consciente de ello. Por ejemplo: anillos, rosquillas, arandelas, argollas, etc.



Figura 6. Toroide.

Ecuaciones paramétricas de un toroide

Dada una circunferencia C_1 de radio r en el plano XZ ó en el plano YZ con centro O_1 a una distancia R del eje Z , el volumen de revolución de C_1 alrededor de Z con la misma distancia forma el toroide.

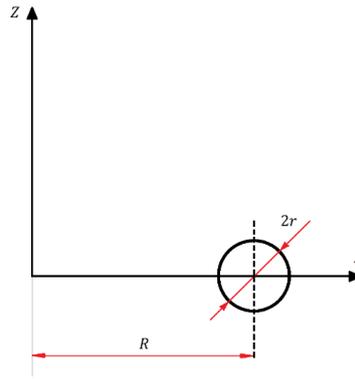


Figura 7. Circunferencia C_1

Desde la vista planta del toroide, se forma otra circunferencia llamada C_2 .

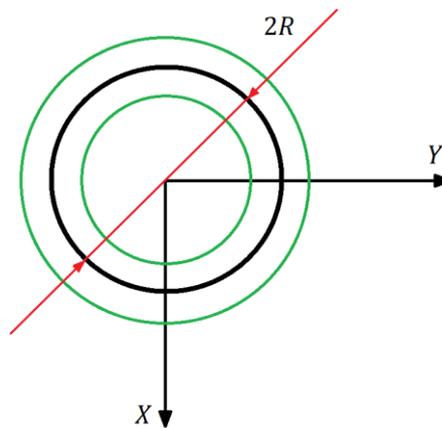


Figura 8. Circunferencia C_2 .

Las ecuaciones paramétricas de C_1 en el plano XZ para un punto P_{C_1} cualquiera en C_1 son:

$$P_{C_1}(v) = \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R + r * \cos(v) \\ r * \text{sen}(v) \end{pmatrix}$$

Siendo v el ángulo de C_1 comprendido entre 0 y 2π .

Las ecuaciones paramétricas de C_2 en el plano XY para un punto P_{C_2} cualquiera en C_2 son:

$$P_{C_2}(u) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R * \cos(u) \\ R * \text{sen}(u) \end{pmatrix}$$

Siendo v el ángulo de C_2 comprendido entre 0 y 2π .

Aplicando las parametrizaciones anteriores al toroide, se obtienen las ecuaciones paramétricas para un punto P cualquiera dentro de la superficie del toroide,

$$P(u, v) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R + r * \cos(v)) * \cos(u) \\ (R + r * \cos(v)) * \text{sen}(u) \\ r * \text{sen}(v) \end{pmatrix} \quad (4)$$

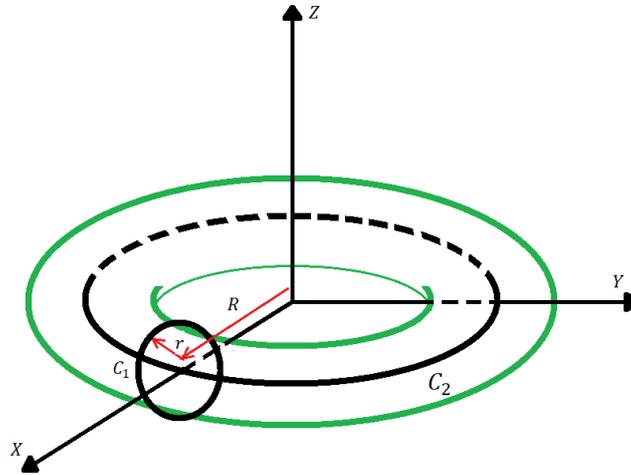


Figura 9. Parámetros de un toroide

La curvatura del rodete está compuesta por la cuarta parte de la superficie del toroide, por lo tanto, el rango de v estará comprendido entre $\left[\pi, \frac{3}{2}\pi\right]$, y el de u entre $[0, 2\pi]$.

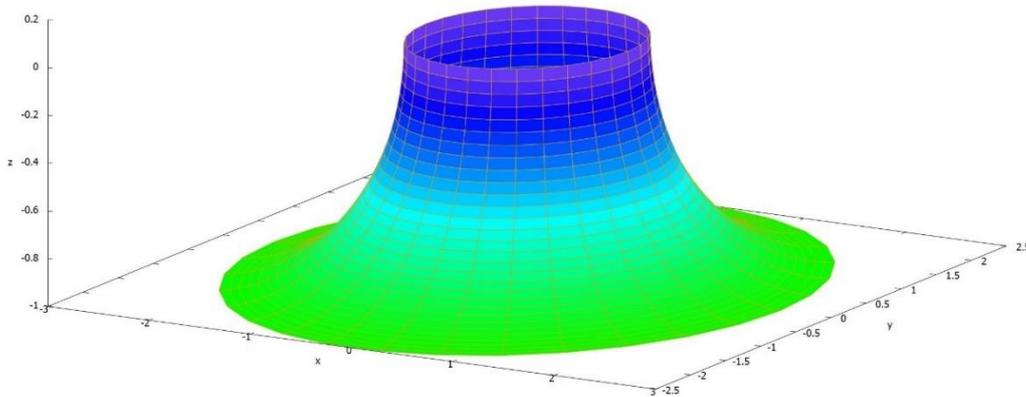


Figura 10. Superficie tórica de un rodete parametrizada

3.2. Geometría de un álabe

En la superficie de un toroide podemos describir la geometría de una serie de álaves. Los álaves están definidos por una serie de circunferencias denominadas “*Círculos de Villarceau*”.

Círculos de Villarceau

Los *Círculos de Villarceau*, en Geometría, son un par de circunferencias generadas en un toroide al seccionar de forma oblicua un plano que pasa por el centro. Están denominadas por el nombre del matemático y astrónomo francés *Yvon Villarceau* (1813 –1883).

Las circunferencias se pueden formar por parejas seccionando mediante planos doblemente tangentes al toroide. En 1903, *Mannheim* expuso que los *Círculos de Villarceau* seccionan a todas las secciones circulares del toroide con el mismo ángulo denominado α .

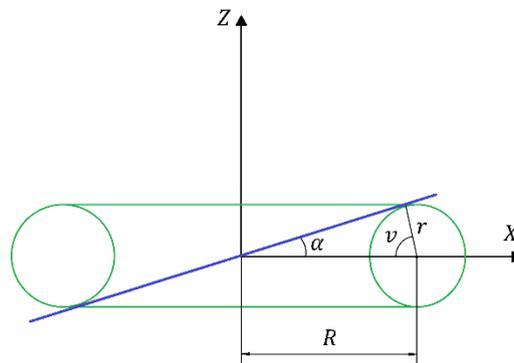


Figura 11. Plano tangente a dos circunferencias de un toroide

Ecuación del plano tangente a dos circunferencias de una sección del toro:

$$\cos(\alpha) * z + \text{sen}(\alpha) * x = 0 \quad (5)$$

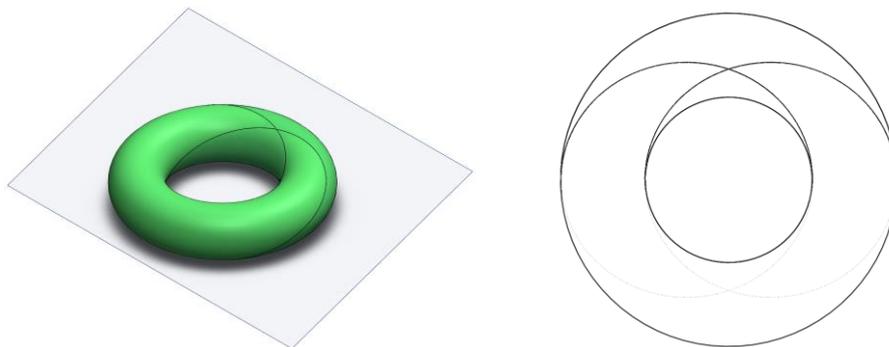


Figura 12. Círculos de Villarceau

Teniendo en cuenta el apartado 3.1, el rodete estará inscrito en la cuarta parte del toroide, por lo tanto, la parte proporcional de los *círculos de Villarceau* estará dada por las ecuaciones paramétricas (4) junto a la ecuación del plano tangente (5) en el rango de v .

Sustituyendo (4) en (5) y teniendo en cuenta:

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{r}{R}\right)$$

Se obtiene la ecuación con la que se puede obtener el rango de u en el que está inscrito un **Círculo de Villarceau**.

$$u = \arccos\left[\frac{\sqrt{R^2 - r^2} * \text{sen}(v)}{R + r * \text{cos}(v)}\right] \quad (6)$$

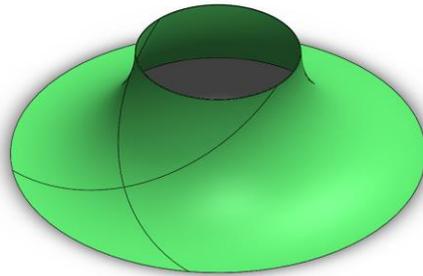


Figura 13. Círculos de Villarceau inscritos

Con los resultados obtenidos (*Anexo 1. Discretización del ángulo v y u*) y la ecuación paramétrica (4), se obtienen las coordenadas exactas de la geometría de un álabe (*Anexo 2. Geometría de la fibra media de un álabe*).

4. Programa de mecanizado del rodete de un compresor centrífugo

4.1. Programa de mecanizado del toroide

El programa de mecanizado del toroide es el más simple del proyecto, consiste en definir un ciclo fijo del mecanizado de una curva.

El torno CNC utilizado en el proyecto es el *Danobat Danumeric NI-650*, del departamento de ingeniería Mecánica, Materiales y Fabricación.



Figura 14. Danobat Danumeric NI-650

El toroide está formado por una circunferencia en revolución respecto a un eje fijo. La parte curva para mecanizar del rodete es una cuarta parte del toroide, es decir, un cuarto de circunferencia en revolución alrededor de un eje (Figura 10). El eje de rotación debe de coincidir con el eje central del bruto, si no, podemos encontrar desviaciones en el mecanizado del toroide en el rodete.

El código ISO del programa consta de tres partes, una primera parte fija que define las funciones auxiliares y los parámetros de mecanizado iniciales, una segunda parte que consiste en un refrentado y, por último, el ciclo fijo de mecanizado de una curva en revolución.

La primera parte es prácticamente igual para cualquier programa de un torno **CNC FAGOR**,

1. Posicionamiento rápido (G0)
2. Programación en milímetros (G71)
3. Programación en cotas absolutas (G90)
4. avance en milímetros/revolución (G95)
5. velocidad de corte constante (G96)

6. Arranque del cabezal a izquierdas(M04)
7. Selección de herramienta y corrector (T4 D4)
8. Posicionamiento con distancia de seguridad
9. Avance del mecanizado y velocidad del cabezal (F S)

La segunda parte, el **refrentado** frontal, es una operación que consiste en el mecanizado en el extremo de la pieza por completo, en el plano perpendicular al eje de giro. La utilidad del refrentado es la eliminación de irregularidades y la obtención de una superficie de referencia para el siguiente paso del programa.

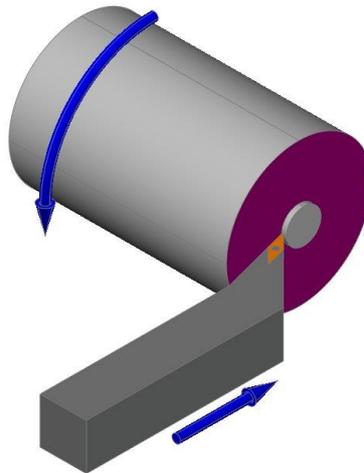


Figura 15. Refrentado

Por último, el **ciclo fijo G85**. Este ciclo permite el refrentado de tramos curvos manteniendo el paso entre las pasadas sucesivas, además, tiene la posibilidad de realizar una pasada final de acabado tras el refrentado programado.

El ciclo fijo examinará el perfil programado para realizar si es necesario un refrentado posterior para llegar al perfil descrito. El proceso de refrentado se realiza con un mismo paso programado, igual o inferior al paso indicado en el parámetro 'C'. La Figura 16 muestra el paso con el que se ha llevado a cabo el proceso de refrentado.

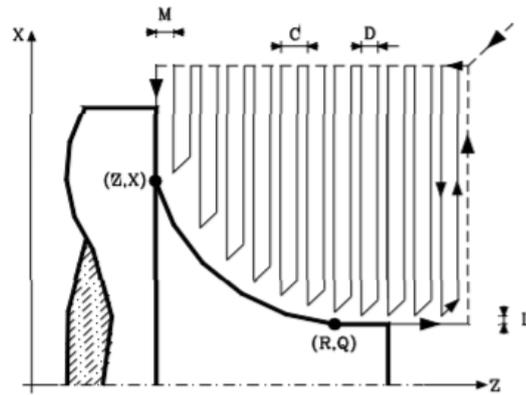


Figura 16. Ciclo fijo G85

Los parámetros elementales del **ciclo fijo G85** son:

G85 X Z Q R C D L M F H I K

Parámetro	Programación del parámetro
X	Describe la coordenada del eje X en el punto donde comienza el perfil final. Se programará según las unidades activas, radios o diámetros, y en coordenadas absolutas.
Z	Describe la coordenada del eje Z en el punto donde comienza el perfil. Las coordenadas serán absolutas.
Q	Describe la coordenada del eje X en el punto donde acaba el perfil final. Se programará según las unidades activas, radios o diámetros, y en coordenadas absolutas.
R	Describe la coordenada del eje Z en el punto donde acaba el perfil. Las coordenadas serán absolutas.
C	Describe el paso de la herramienta y deberá programarse con un valor positivo indicado en radios. La máquina CNC mostrará el error conveniente al programarse con un valor 0 o negativo. El proceso de refrentado se realiza con un mismo paso programado, siendo este igual o inferior indicado en el parámetro 'C'.
D	Describe la distancia de seguridad a la que se retira la herramienta en cada pasada de mecanizado. La retirada de la herramienta se comete siguiendo el perfil hasta la pasada anterior, distancia 'C', cuando no se ha programado el parámetro 'D'.
L	Describe la demasia para la pasada de acabado en el eje X y debe programarse en radios. Toma el valor 0 si no se programa nada.

M	Describe la demasía para la pasada de acabado en el eje Z y debe programarse en radios. Toma el valor 0 si no se programa nada.
H	Describe la velocidad de avance de la pasada final de acabado. El ciclo entiende que no se desea pasada final de acabado si se programa con valor 0 o no se programa nada.
F	Describe la velocidad de avance de la pasada final de desbaste. El ciclo entiende que no se desea pasada final de desbaste si se programa con valor 0 o no se programa nada.
I	Describe, en radios, la distancia del punto inicial del perfil definido anteriormente con los parámetros 'X' y 'Z' hasta el centro del arco en el eje X. Se programará en coordenadas incrementales con respecto al punto inicial del perfil.
K	Describe en radios la distancia del punto inicial del perfil definido anteriormente con los parámetros 'X' y 'Z' hasta el centro del arco en el eje Z. Se programará en coordenadas incrementales con respecto al punto inicial del perfil.

Con la geometría del perfil a mecanizar, definida en el apartado---, el ciclo fijo se define como:

G	X	Z	Q	R	C	I	K
G85	$2 * R$	$-R$	$2 * (R - r)$	0	1	0	r

Siendo R y r dos parámetros variables según las dimensiones del bruto.

4.1.1. Simulación FAGOR CNC

Gracias al programa que facilita *FAGOR AUTOMATION*, se pueden realizar simulaciones de torneados de forma totalmente segura. El programa utilizado es *FAGOR PC SIMULATOR*.

Código ISO simulado en FAGOR CNC

Las dimensiones del bruto predefinidas son 100 mm de longitud y 50 mm de diámetro.

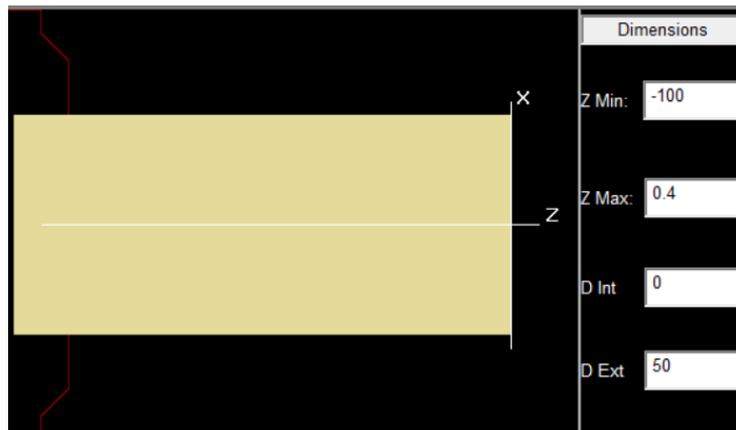


Figura 17. Dimensiones del bruto

N10	G0 G71 G90 G95 G96 X50 Z50 M4
N20	T1 D1
N30	X51 Z0
N40	G1 X-0.4 F0.1 S300
N50	G0 X55 Z0
N60	G85 X50 Z-15 Q20 R0 C1 I0 K15
N70	G0 X80 Z80
N80	M30

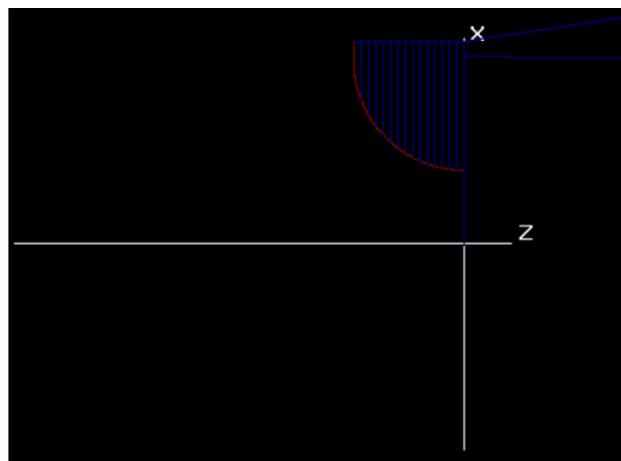


Figura 18. Trayectoria de la herramienta en el plano XZ

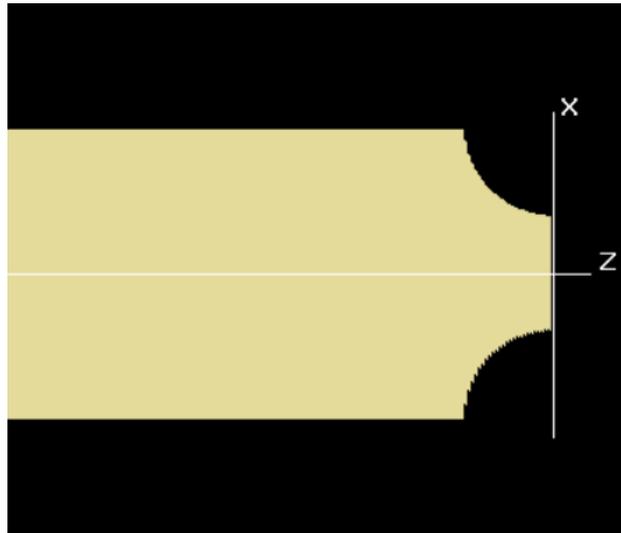


Figura 19. Resultado de la simulación del torneado con ciclo fijo G85

4.2. Programa de mecanizado de los álabes

La trayectoria de la herramienta no se puede programar con ningún ciclo fijo. Los programas CAD/CAM para centros de mecanizados de 5 ejes capaces del diseño de un rodete están fuera de alcance, por su valor económico y problemas de diseño en una superficie tórica. La trayectoria debe de ser calculada mediante el modelo matemático.

En el mecanizado de 5 ejes, se debe de tener en cuenta la rotación de la pieza mecanizada respecto a la herramienta. El sistema de referencia no es fijo, depende de los ángulos de rotación B y C.

Una vez definidos en el rodete los *Círculos de Villarceau* del apartado 3.2, formados por un plano cortante doblemente tangente al toro, podemos calcular la trayectoria de mecanizado de un álabe en la superficie del rodete. Las coordenadas obtenidas de las ecuaciones (4) y (6) están referenciadas en un punto fijo de la base del rodete y, por lo tanto, deben de ser transformadas.

La proyección en el plano XY del vector normal unitario \vec{N} obtenido de aplicar el *triedro de Darboux* (*Anexo 3. Triedro de Darboux*) a las ecuaciones parametrizadas de la geometría de un toroide en el rango de v y u del apartado 3.2, forma el ángulo C.

$$C = \arctan\left(\frac{N_x}{N_y}\right) \quad (7)$$

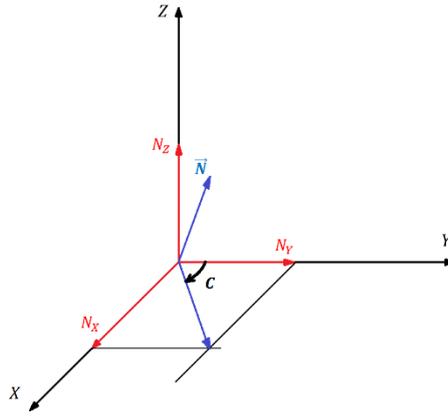


Figura 20. Proyección del vector normal \vec{N} en el plano XY

El sistema de referencia de la trayectoria cambia con el giro de C , aplicando la matriz de transformación M_1 a los vectores y vectores unitarios de la trayectoria se obtiene la proyección de los vectores respecto al nuevo sistema de referencia.

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos(C) & -\text{sen}(C) & 0 \\ \text{sen}(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\vec{P}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = M_1 \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{N}' = \begin{pmatrix} N'_X \\ N'_Y \\ N'_Z \end{pmatrix} = M_1 \cdot \begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_Z \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{t}' = \begin{pmatrix} t'_X \\ t'_Y \\ t'_Z \end{pmatrix} = M_1 \cdot \begin{pmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\vec{b}' = \begin{pmatrix} b'_X \\ b'_Y \\ b'_Z \end{pmatrix} = M_1 \cdot \begin{pmatrix} b_X \\ b_Y \\ b_Z \end{pmatrix} \quad (12)$$

La posición vertical de la herramienta durante el mecanizado siempre es perpendicular a la superficie del rodete. Por lo tanto, el vector normal unitario transformado de la trayectoria debe ser:

$$\vec{N}'' = \begin{pmatrix} N_X'' \\ N_Y'' \\ N_Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

El eje Z coincide con el vector normal unitario transformado \vec{N}'' . El ángulo de giro B de la trayectoria de la herramienta esta formado por el vector unitario transformado N' en el plano XZ.

$$B = \text{arc tan} \left(\frac{N_Z'}{N_X'} \right) \quad (14)$$

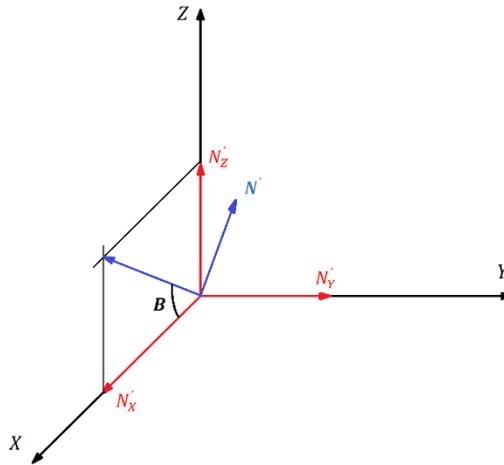


Figura 21. Proyección del vector normal \vec{N} en el plano XZ

El sistema de referencia ha vuelto a cambiar con el ángulo de giro B, por lo tanto, aplicando una segunda matriz de transformación M_2 , se obtienen las coordenadas de la segunda transformada de la trayectoria.

$$M_2 = \begin{pmatrix} \cos(B) & 0 & -\text{sen}(B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(B) & 0 & \cos(B) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\vec{P}'' = \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = M_2 \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\vec{N}'' = \begin{pmatrix} N_X'' \\ N_Y'' \\ N_Z'' \end{pmatrix} = M_2 \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_Z \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\vec{t}'' = \begin{pmatrix} t_X'' \\ t_Y'' \\ t_Z'' \end{pmatrix} = M_2 \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\vec{b}'' = \begin{pmatrix} b_X'' \\ b_Y'' \\ b_Z'' \end{pmatrix} = M_2 \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} b_X \\ b_Y \\ b_Z \end{pmatrix} \quad (19)$$

El resultado de las transformaciones está en el *Anexo 5. Geometría de un álabe transformada*.

4.2.1. Vector de la trayectoria de la herramienta

La trayectoria definida anteriormente está asociada a la geometría de la fibra media del álabe. Para realizar el mecanizado del álabe hay que tener en cuenta la profundidad de mecanizado a_p , el espesor del álabe e y el diámetro de la herramienta d_t .

Por cada álabe, la herramienta de mecanizado realizará dos pasadas en el rodete, una por el anverso y otra por el reverso del álabe.

Anverso:

$$\vec{r}_t = \vec{P}'' - \vec{b}'' \left(\frac{e}{2} + \frac{d_t}{2} \right) - a_p * \vec{N}'' \quad (20)$$

Reverso:

$$\vec{r}_t = \vec{P}'' + \vec{b}'' \left(\frac{e}{2} + \frac{d_t}{2} \right) - a_p * \vec{N}'' \quad (21)$$

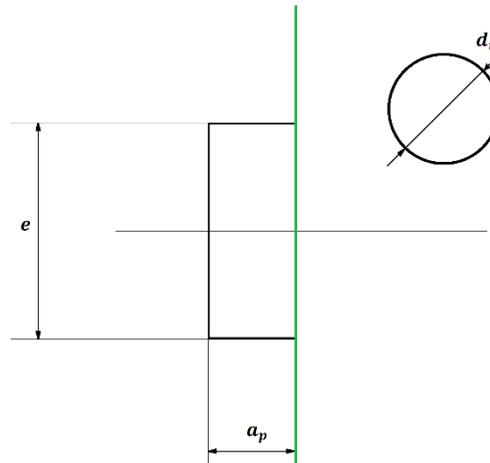


Figura 22. Sección inicial de un álabe

Las trayectorias de la herramienta están en el **Anexo 6. Trayectoria de la herramienta anverso** y **Anexo 7. Trayectoria de la herramienta reverso**.

Para el mecanizado del álabe completo, se ha optado por seguir el criterio de comenzar por la trayectoria del anverso en la posición de la Figura 23 y acabar por la del reverso, ya que, el ángulo B de la máquina CNC está limitado en el rango de $[-10^\circ, 100^\circ]$.

Si la trayectoria comienza desde la posición 1 (ángulo B girado 90°), las coordenadas iniciales no son las calculadas anteriormente. La coordenada z de la geometría del álabe estará condicionada por la propia altura de la pieza junto con la del usillo del centro de mecanizado CNC. En este caso, la altura del usillo es: $R_p = 147.5 \text{ mm}$, calculada según el método del apartado **5.2 LAGUN L850**.

Finalmente, para obtener el ángulo de giro C entre cada trayectoria de mecanizado de los álabes, se utiliza la siguiente formula:

$$C = \frac{360}{N} \quad (22)$$

Siendo N el número de álabes del rodete.

Distancia de seguridad

Para realizar las pasadas de mecanizado del anverso y el reverso, hay que establecer una distancia de seguridad entre el cambio de trayectorias, si no, la herramienta colisionaría con la pieza.

Para el punto 1 de la posición de la Figura 23, la distancia de seguridad de la trayectoria estaría dada por las siguientes ecuaciones:

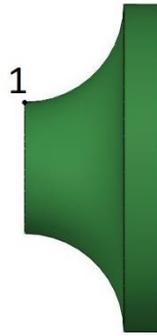


Figura 23. Posición de entrada de la herramienta

$$\beta = \frac{y_r - y_a}{x_a - x_r} \quad (23)$$

Donde β es el ángulo de la inclinación del álabe respecto el eje vertical y, (x_a, y_a) y (x_r, y_r) son las coordenadas del punto 1 de las trayectorias del anverso y el reverso respectivamente.

$$\Delta x_a = d_s + \frac{d_t}{2} + \left(\frac{d_t}{2} + \frac{e}{2}\right) * \cos\beta \quad (24)$$

$$\Delta y_a = \frac{\Delta x_a}{\tan\beta} \quad (25)$$

$$\Delta x_r = d_s + \frac{d_t}{2} - \left(\frac{d_t}{2} + \frac{e}{2}\right) * \cos\beta \quad (26)$$

$$\Delta y_r = \frac{\Delta x_r}{\tan\beta} \quad (27)$$

Donde, d_s es la distancia de seguridad, d_t es el diámetro de la herramienta, e es el espesor del álabe, y, por último, $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ y $(\Delta x_a, \Delta y_a)$ son las coordenadas relativas respecto el punto 1 de la trayectoria del reverso y el anverso respectivamente, teniendo en cuenta la distancia de seguridad.

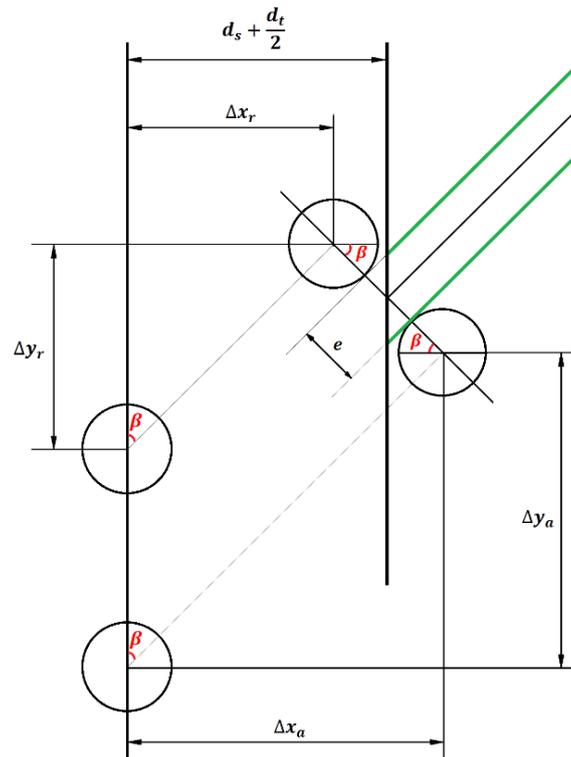


Figura 24. Trayectoria de entrada de la herramienta

Para el punto 2 de la posición de la Figura 25, la distancia de seguridad de la trayectoria estaría dada por las siguientes ecuaciones:



Figura 25. Posición de salida de la herramienta

$$\beta = \frac{y_r - y_a}{x_a - x_r} \quad (28)$$

Donde β es el ángulo de la inclinación del álabe respecto al eje vertical y, (x_a, y_a) y (x_r, y_r) son las coordenadas del punto 2 de las trayectorias del anverso y el reverso respectivamente.

$$\Delta x_a = d_s + \frac{d_t}{2} - \left(\frac{d_t}{2} + \frac{e}{2} \right) * \cos \beta \quad (29)$$

$$\Delta y_a = \frac{\Delta x_a}{\tan \beta} \quad (30)$$

$$\Delta x_r = d_s + \frac{d_t}{2} + \left(\frac{d_t}{2} + \frac{e}{2} \right) * \cos \beta \quad (31)$$

$$\Delta y_r = \frac{\Delta x_r}{\tan \beta} \quad (32)$$

Donde, d_s es la distancia de seguridad, d_t es el diámetro de la herramienta, e es el espesor del álabe, y, por último, $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ y $(\Delta x_a, \Delta y_a)$ son las coordenadas relativas respecto el punto 2 de la trayectoria del reverso y el anverso respectivamente, teniendo en cuenta la distancia de seguridad.

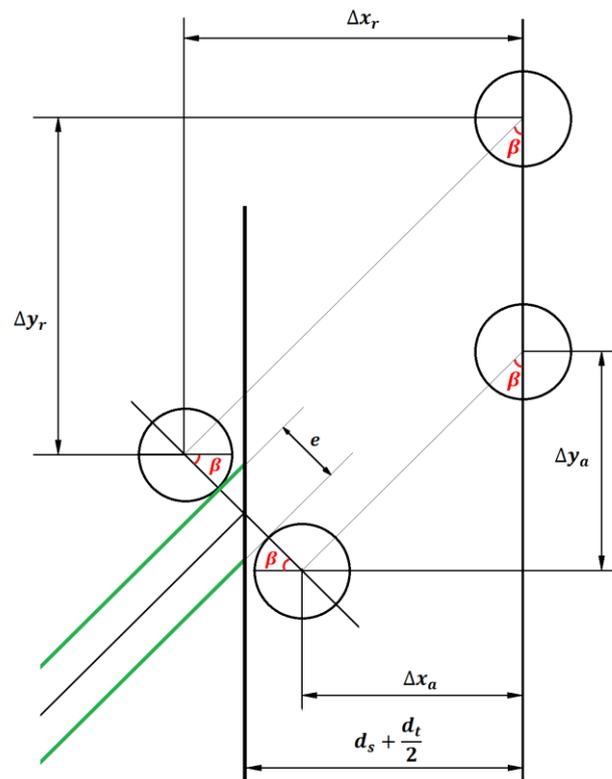


Figura 26. Trayectoria de salida de la herramienta

Los resultados están en el **Anexo 8. Distancia de seguridad.**

4.2.2. Número máximo de álabes

El rodete, según sus dimensiones, puede tener un número determinado de álabes máximos. El espesor del álabe e y la profundidad de mecanizado a_p están relacionados directamente con el número de álabes máximos.

Con el ejemplo de la Figura 22, podemos deducir que la longitud mecanizada de la circunferencia superior es menor que la circunferencia de la base del rodete, por lo tanto, sus dimensiones limitarán el número de álabes.

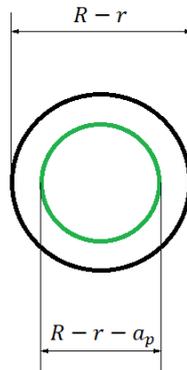


Figura 27. Sección superior del rodete

La longitud de la circunferencia superior del rodete se aproxima al espacio que ocupan los álabes en esta.

$$(e + d) * N = 2 * \pi * (R - r - a_p) \quad (33)$$

Siendo N el número de álabe, d la distancia mínima de separación entre álabes y e su espesor en la circunferencia superior del rodete. Se tomará el diámetro de la herramienta como distancia mínima necesaria entre los álabes del rodete para realizar el mecanizado, además, por seguridad en los giros, se sobredimensionará la medida un tercio.

El número máximo de álabes N_{max} es el primer número entero del resultado de la ecuación:

$$N_{max} = \frac{2\pi * (R - r - a_p)}{e + d} \quad (34)$$

4.2.3. Espesor máximo de un álabe

El espesor máximo de un álabe e_{max} dependerá de los mismos parámetros que la ecuación (33)

$$e_{max} = \frac{2\pi * (R - r - a_p)}{N} - d \quad (35)$$

4.3. Programa de mecanizado de los alabes intermedios

Cuando se realiza el mecanizado de los álaves, entremedias resulta una superficie de un tamaño considerable sin mecanizar. El tamaño de la superficie dependerá del espesor y número de álaves.

La solución de este problema consiste en el mecanizado de unos álaves secundarios llamados “álaves intermedios”.

Para el mecanizado de los álaves intermedios, se ha seguido el siguiente procedimiento. Retirar material hasta el punto de intersección de las trayectorias anverso y reverso para un álabe con el plano XY .

El primer paso para calcular la trayectoria final de los álaves intermedios es obtener el punto de intersección entre la trayectoria del álabe adyacente normal y la trayectoria del álabe intermedio para evitar colisiones con la herramienta en los álaves ya mecanizados.

La trayectoria de un álabe intermedio es calculada según el número de álaves del rodete N . El ángulo de giro en C viene dado por la siguiente fórmula

$$C = \frac{360}{2 * N} \quad (36)$$

Una vez encontrado, la trayectoria de la herramienta partirá de la posición de la fibra media ($e = 0$) e ira aumentando la distancia ($e \neq 0$) linealmente hasta llegar al punto de intersección.

4.4. Programación VBA en Excel

El programa Microsoft Excel está compuesto por unas hojas de cálculo gobernadas por un lenguaje de programación llamado *Visual Basic*. En este proyecto, servirá para relacionar todos los métodos y ecuaciones anteriormente descritos en un

conjunto de hojas de cálculo. Además, será necesario utilizar una ‘macro’ para la obtención del código ISO.

Gracias a Excel, el programa de mecanizado de un rodete está simplificado a introducir unos parámetros iniciales de diseño. El resultado sería el código ISO de la trayectoria de la herramienta listo para ser introducido en el centro de mecanizado.

El ordenador central del centro de mecanizado solamente puede leer números con decimales de hasta 3 cifras y utiliza el ‘punto’ como separador entre decimales. La hoja de Excel se deberá adaptar a las necesidades del centro de mecanizado.

4.4.1. Hoja de cálculo Excel

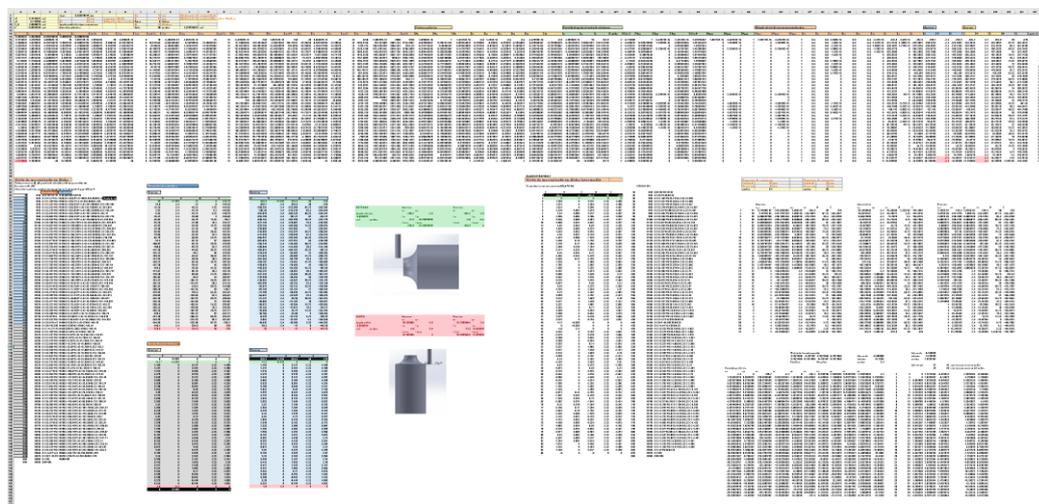


Figura 28. Hoja de cálculo Excel

Como se puede observar en la Figura 28, el resultado de todo el conjunto de datos es engorroso y complicado. A continuación, se explicará de que está compuesta la hoja de cálculo para simplificar su comprensión.

1°. Parámetros de diseño del rodete. Son las únicas celdas a las que se le deben introducir datos para proceder al cálculo de las trayectorias. Figura 29

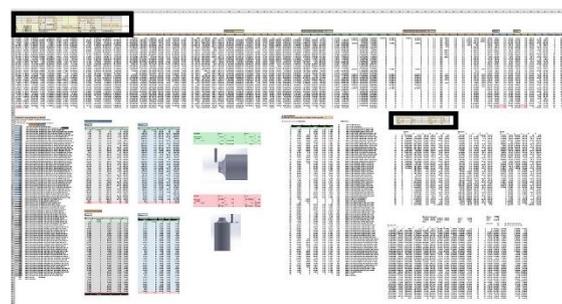


Figura 29. Parámetros de diseño del rodete en Excel

- 2°. Coordenadas cartesianas de la geometría de la fibra media de un álabe del rodete con los ángulos de la discretización del toroide. Estas coordenadas han sido calculadas en el apartado **3.2 Geometría de un álabe** y los resultados se encuentran en el **Anexo 1. Discretización del ángulo v y u** y **Anexo 2. Geometría de la fibra media de un álabe**. Figura 30.

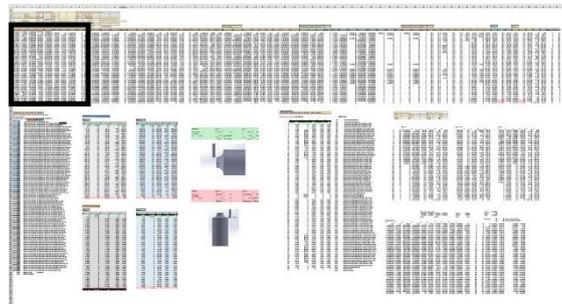


Figura 30. Geometría de un álabe en Excel

- 3°. *Triedro de Darboux*. Las ecuaciones vectoriales se encuentran definidas en el apartado **2.2.3 El triedro de Darboux** y los resultados en el **Anexo 3. Triedro de Darboux**. Figura 31.

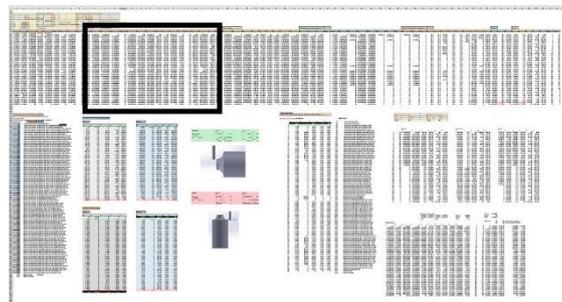


Figura 31. Triedro de Darboux en Excel

- 4°. Resultado de las coordenadas transformadas y trayectorias de un álabe explicadas en el apartado **4.2 Programa de mecanizado de los álabes**. Los resultados se encuentran en el **Anexo 5. Geometría de un álabe transformada**, **Anexo 6. Trayectoria de la herramienta anverso** y **Anexo 7. Trayectoria de la herramienta reverso**. Figura 32.

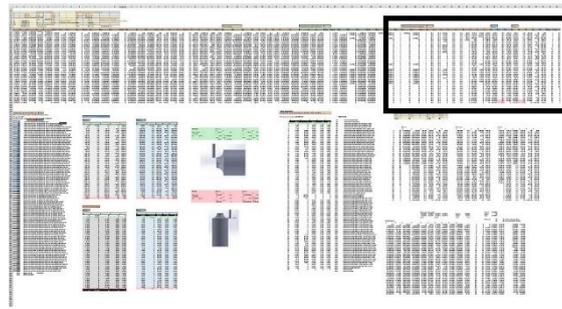


Figura 32. Coordenadas transformadas y trayectorias en Excel

5°. Código ISO de un álabe. La combinación de la trayectoria y la distancia de seguridad de un álabe en código ISO. **Anexo 9. Código ISO de un álabe.** Figura 33.

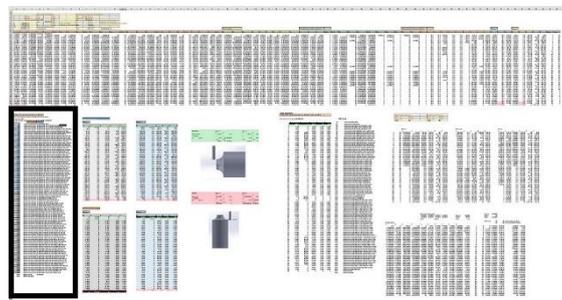


Figura 33. Código ISO de un álabe en Excel

6°. Distancia de seguridad entre trayectorias de un álabe. Método definido en el apartado **4.2.1 Vector de la trayectoria de la herramienta** y en el **Anexo 8. Distancia de seguridad.** Figura 34.

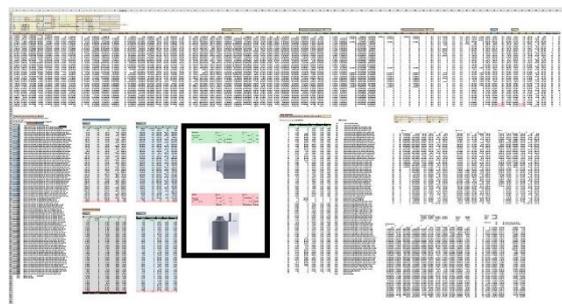


Figura 34. Distancia de seguridad en Excel

7°. Intersección de la trayectoria de un álabe con la trayectoria de un álabe intermedio. Método del apartado **4.3 Programa de mecanizado de los alabes intermedios.** Figura 35.

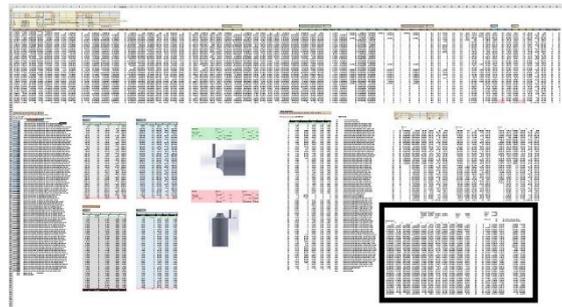


Figura 35. Intersección de trayectorias en Excel

8°. Trayectoria de un álabe intermedio sin colisiones. Figura 36.

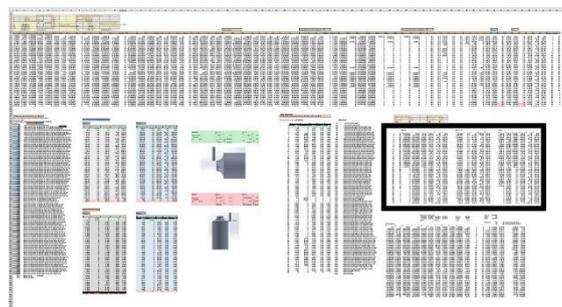


Figura 36. Trayectoria de un álabe intermedio en Excel

9°. Código ISO de la trayectoria de un álabe intermedio. **Anexo 10. Código ISO de un álabe intermedio.** Figura 37.

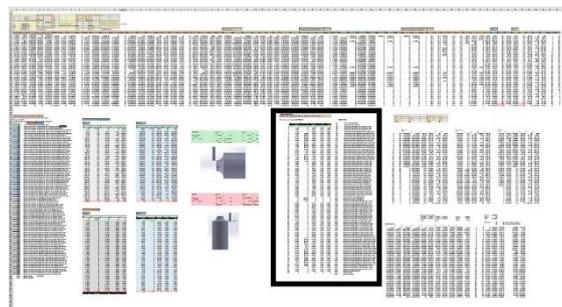


Figura 37. Código ISO de un álabe intermedio en Excel

Todos los datos de la hoja de cálculo Excel se encuentran en los anexos de este proyecto debidamente ordenados.

4.4.2. Programación VBA

Para la extracción del código ISO de las trayectorias, se ha utilizado un programa en lenguaje VBA. Este programa deja preparado el código ISO para copiar en un archivo de texto e introducirlo en el centro de mecanizado.

El programa es denominado ‘macro’ en Excel. Una macro es una sucesión de instrucciones programadas agrupadas en una hoja de cálculo, las cuales automatizan las operaciones que realiza Excel con la finalidad de realizar cálculos complejos sin probabilidad de error y en un pequeño espacio de tiempo o eliminar tareas repetitivas.

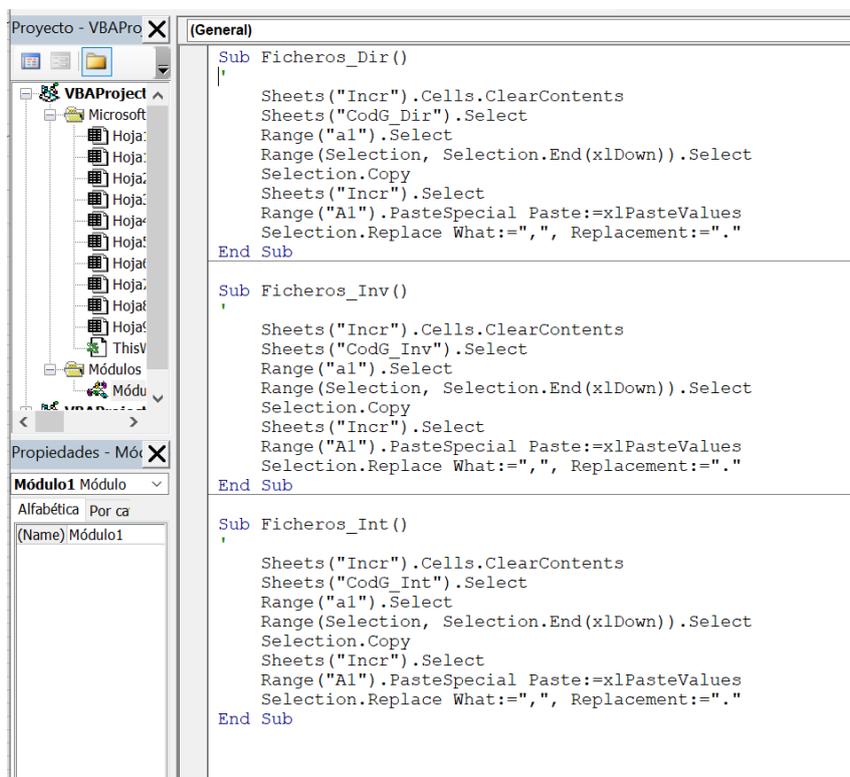


Figura 38. Macros en Excel

La estructura de la macro es la siguiente:

Sub Codigo_ISO	Inicio de la macro ‘Código_ISO’
,	
Sheets("INCR").Cells.ClearContents	Elimina los datos existentes de la hoja de cálculo
Sheets("DATOS").Select	Selecciona la hoja de cálculo ‘DATOS’
Range("B66:C154").Select	Selecciona el Código ISO de un álabe

<i>Selection.Copy</i>	Instrucción copiar selección
<i>Sheets("INCR").Select</i>	Selecciona la hoja de cálculo 'INCR'
<i>Range("A1").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues</i>	Instrucción pegar valores de la selección
<i>Sheets("DATOS").Select</i>	Selecciona la hoja de cálculo 'DATOS'
<i>Range("AO65:AP152 ").Select</i>	Selecciona el Código ISO de un álabe intermedio
<i>Selection.Copy</i>	Instrucción copiar selección
<i>Sheets("INCR").Select</i>	Selecciona la hoja de cálculo 'INCR'
<i>Range("D1").PasteSpecial Paste:=xlPasteValues</i>	Instrucción pegar valores de la selección
<i>Selection.Replace What:="," Replacement:="."</i>	Instrucción remplazar comas por puntos
<i>End Sub</i>	Fin del programa

4.5. Código ISO

Finalmente, con todo lo anterior desarrollado, el código ISO del mecanizado de un álabe puede ser implementado en el centro de mecanizado CNC de 5 ejes.

El código se basa en una parte inicial, donde se definen los parámetros de mecanizado y la posición de inicio de la trayectoria, y en una sucesión de coordenadas pertenecientes a la trayectoria del anverso y el reverso respectivamente, teniendo en cuenta la distancia de seguridad.

La parte final consiste en un giro en C para posicionar la herramienta en el inicio de la trayectoria del siguiente álabe. Si se ejecuta el programa de nuevo, realizará el mecanizado del segundo álabe. El giro en C se obtiene de dividir el rango completo de u entre el número de álabes del rodete, N .

El código ISO del mecanizado de los álabes del rodete están en el **Anexo 9. Código ISO** y **Anexo 10. Código ISO de un álabe intermedio**.

5. Estado de calibración

La calibración es el proceso por el que se establece, en condiciones concretas, el error entre valores indicados en un centro de mecanizado o sistema de medida, y los valores de una magnitud de medida o patrón, certificando así la fiabilidad de los valores obtenidos y procediendo a su ajuste a través de curvas de corrección o tablas.

En el proceso de calibrar un instrumento se debe disponer de uno de mayor precisión o de algún método matemático que facilite el valor real. El valor real se empleará para compararlo con el valor obtenido por el sistema de medida o centro de mecanizado de la calibración

El deterioro de los materiales por el tiempo, el estrés térmico y mecánico o el mal uso de los equipos llevan a un mal funcionamiento de estos. Cuando ocurre, los valores y procesos empiezan a perder calidad, incluso pueden llegar a cometer errores más grandes, estropeando material o equipo importante. Con el proceso de calibrado podemos evitar estas situaciones.

La adecuada calibración de los centros de mecanizado otorga seguridad de que los valores o medidas de los equipos cumplen con las especificaciones requeridas.

Para proceder al correcto mecanizado del rodete es necesario verificar y mantener en buen estado el funcionamiento de los centros de mecanizado, responder a los requisitos establecidos en las normas de calidad y garantizar la fiabilidad y trazabilidad de las medidas.

Los centros de mecanizado utilizados en este proyecto son:

- *Danobat Danumeric NI-650* (Figura 14)
- *LAGUN L850* (Figura 1)

Los centros de mecanizado CNC necesitan haber definido previamente los puntos siguientes de origen y de referencia:

- **Punto de referencia.** Definido en la Figura 39 con la letra ‘R’. Es un punto indicado por la máquina y fijado por el fabricante. Cuando se realiza el calibrado, la herramienta se desplaza sobre este. Las cotas de referencia se encuentran definidas mediante el parámetro de los ejes "REFVALUE".
- **Cero máquina o punto de origen de la máquina.** Definido en la Figura 39 con la letra ‘M’. También es fijado por el fabricante como el origen del sistema de coordenadas de la máquina.

- **Cero pieza o punto de origen de la pieza.** Definido en la Figura 39 con la letra 'W'. Este punto puede ser elegido por el programador o el operario libremente con la referencia del cero máquina para la programación de las medidas de la pieza a mecanizar. Esta operación se realiza a través de un decalaje en el origen.

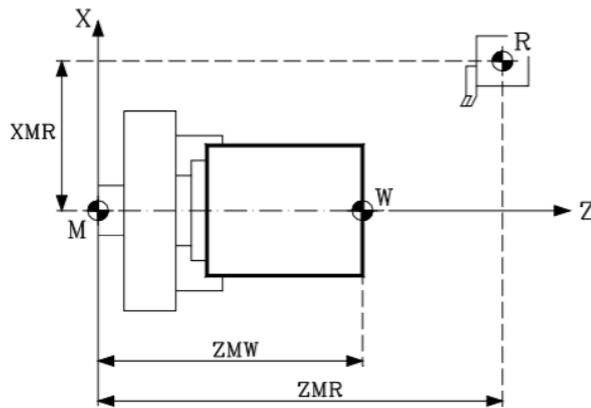


Figura 39. Puntos de referencia

5.1. Danobat Danumeric NI-650

La búsqueda de las referencias del centro de mecanizado CNC *Danobat Danumeric NI-650* puede realizarse de la siguiente forma.

El primer paso es programar la función **G74** junto a los ejes en los que se requiere una nueva referencia. Por ejemplo: **G74 X Y**. El centro de mecanizado CNC empezará con el desplazamiento de los ejes seleccionados que dispongan de una referencia máquina.

Seguidamente, abordará la búsqueda del punto de referencia de todos los ejes seleccionados en la disposición en que se programaron estos. Este movimiento se ejecutará eje a eje respecto el avance indicado en los parámetros de la máquina, hasta que se alcance el punto de referencia de la máquina.

Cuando en un bloque se programa la función **G74**, no deberá estar junto con otra función. Puede perderse el cero pieza seleccionado cuando la búsqueda de referencia máquina se realiza en modo manual, mostrándose las coordenadas del punto de referencia máquina indicadas en los parámetros de la máquina en la función "REFVALUE". Para las demás situaciones se mantendrá el cero pieza seleccionado, las cotas visualizadas en el centro de mecanizado estarán indicadas respecto al cero pieza.

El centro de mecanizado CNC puede realizar decalajes de origen con la finalidad de utilizar coordenadas relativas respecto a la pieza, sin la necesidad de cambiar las coordenadas de los distintos puntos de la pieza cuando se realiza el programa.

El **decalaje** de origen se define como la medida entre el **cero pieza (W)** y el **cero máquina (M)**. Esta descrito en la Figura 40.

El decalaje de origen puede realizarse de las siguientes dos formas:

- Con la preselección de cotas (función **G92**), programada junto a los nuevos valores del cero pieza.
- Con la utilización de traslados de origen (función **G54**), tomando como nuevo cero pieza el punto situado respecto del cero máquina a la medida programada.

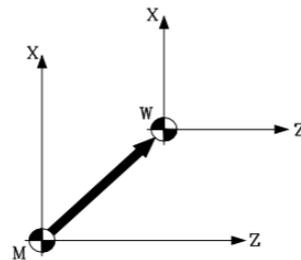


Figura 40. Decalaje de origen

Ambas funciones son incompatibles entre sí y modales. Al habilitar una de estas la otra queda desactivada.

A través de la función **G92** puede preseleccionarse tanto un nuevo valor en los ejes del centro de mecanizado CNC como limitar la velocidad máxima del cabezal de la herramienta. Cuando se realiza un decalaje de origen con **G92**, el centro de mecanizado CNC asume las coordenadas de los nuevos ejes indicados junto al **G92**, como los nuevos valores del cero pieza. En el bloque en que donde se utiliza la función **G92**, no puede programarse otra función distinta.

5.2. LAGUN L850

El centro de mecanizado CNC de 5 ejes *LAGUN L850* del *Laboratorio del Departamento de Fabricación* de la *UPCT* no dispone de la herramienta necesaria para proceder al calibrado o por lo menos comprobarlo. La herramienta en concreto sería un palpador.

Un palpador es una herramienta que puede actuar como aparato de medida mediante el contacto con una superficie. Consta de un vástago con una punta

esférica en su extremo que sobresale una pequeña parte. La punta es empujada contra el extremo del vástago por un muelle elástico o aire comprimido al entrar en contacto con la superficie. La colisión es enviada al ordenador central del centro de mecanizado CNC para su posterior procesado.

Cuando no se dispone de la herramienta anteriormente descrita, se puede proceder al calibrado con un método matemático de calibrado como el utilizado en este proyecto. Consiste en realizar una pequeña ranura en una pieza descartable en posición vertical ($B = 0^\circ$) y otra en posición horizontal ($B = 90^\circ$), se puede observar en la Figura 41. Las medidas de las ranuras deberían coincidir con las ecuaciones si el decalaje es correcto.

Método matemático de calibración

Este método consiste en la comparación de las medidas de una ranura cuando gira el usillo del centro de mecanizado respecto al eje de giro B . Solamente valdría para calibrar este eje de giro.

El primer paso es mecanizar una ranura en posición vertical ($B = 0^\circ$) y tomar las medidas indicadas por el centro de mecanizado. Después, en posición horizontal ($B = 90^\circ$) se realiza la misma ranura. La diferencia entre ambas es el error de calibración en el centro de mecanizado. Como se puede observar en la Figura 41, se obtendrán los siguientes parámetros de la ranura:

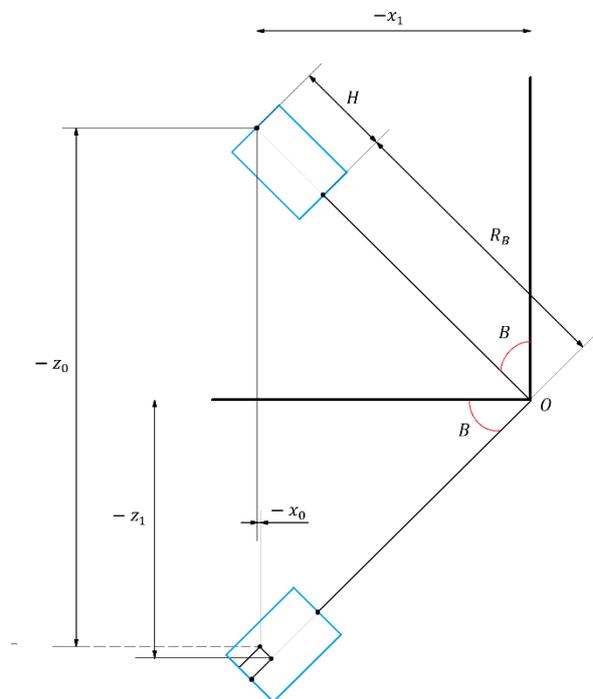


Figura 41. Posición de las ranuras mecanizadas

Se definen x_1 y z_1 como el punto programado en la posición vertical,

$$-x_1 = (R_B + H) * \cos B$$

$$-z_1 = (R_B + H) * \sen B - \left(\frac{d_w}{2} - e_z\right) * \cos B$$

Siendo d_w la distancia al centro de la pieza, H la altura de la pieza respecto su posición en el usillo, R_B la altura del usillo respecto el eje de rotación O , e_z la profundidad de la ranura en el eje cartesiano z y B la desviación del eje de rotación B .

Se definen x_0 y z_0 como el punto programado en la posición horizontal,

$$-x_0 = \left(R_B + H - e_x + \frac{d_t}{2}\right) * \cos B - \left(R_B + H - \frac{d_w}{2} + e_z\right) * \sen B \quad (37)$$

$$-z_0 = \left(R_B + H - e_x + \frac{d_t}{2}\right) * \sen B + \left(R_B + H - \frac{d_w}{2} + e_z\right) * \cos B \quad (38)$$

Siendo d_t el diámetro de la herramienta y e_x la profundidad ranura en el eje cartesiano x .

Para simplificar las ecuaciones, se agrupan los parámetros D y E y se supone la siguiente condición:

$$B \approx 0^\circ \rightarrow \begin{aligned} \cos B &= 1 \\ \sen B &= B \end{aligned}$$

$$D = R_B + H - e_x + \frac{d_t}{2} = R_B + a$$

$$E = R_B + H - \frac{d_w}{2} + e_z = R_B + b$$

Por lo tanto, la simplificación de las ecuaciones (37) y (38) es

$$-x_0 = D * \cos B - E * \sen B$$

$$-z_0 = D * \sen B - E * \cos B$$

$$-x_0 = D - E * B$$

$$-z_0 = D * B - E$$

Despejando B en las ecuaciones anteriores,

$$D^2 + x_0 * D + E^2 + z_0 = 0$$

y simplificando la ecuación anterior con los parámetros a y b , se obtiene la ecuación de 2º:

$$2 * R_B^2 + R_B * (2 * (b - a) + (x_0 + z_0)) + a^2 + b^2 + a * x_0 + b * z_0 = 0 \quad (39)$$

De donde se consigue, mediante interacciones, el decalaje exacto de B y R_B .

6. Mecanizado CNC del rodete

El mecanizado ha sido realizado en el taller de mecanizado del departamento de ingeniería Mecánica, Materiales y Fabricación, en el sótano 1 del edificio ELDI, UPCT, Cartagena.

6.1. Material base

El material base utilizado ha sido aluminio, por su bajo coste y fácil mecanizado. Podría utilizarse cualquier otro, siempre que los parámetros de mecanizado se modifiquen acorde al material.

Las dimensiones del bruto están limitadas por los parámetros de diseño iniciales, excepto la longitud del tocho. La longitud en este proyecto es irrelevante, basta con dejar una distancia de seguridad para no estropear el bruto en el mecanizado.

Se ha utilizado para el mecanizado del rodete un cilindro de aluminio con 50 mm de diámetro y 40 mm de longitud (Figura 42). Además, se ha fabricado un utillaje de acero para la pieza, como se puede ver en la Figura 43. La finalidad del utillaje es la estabilidad dimensional y el ahorro de material durante el mecanizado.

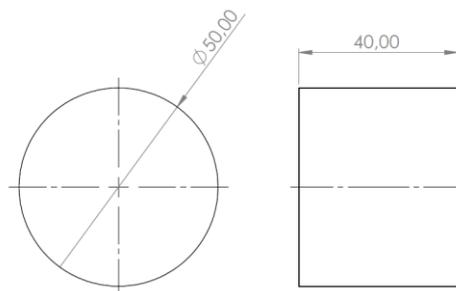


Figura 42. Dimensiones del bruto

6.2. Memoria de taller

La última parte del proyecto consta de dos fases ya descritas anteriormente, una primera fase que transcurre en el centro de mecanizado **Danobat Danumeric NI-650**, y una segunda fase en el centro de mecanizado **LAGUN L850**.

En la primera fase, se realizó el mecanizado del toroide en el bruto de aluminio. El centro de mecanizado estaba perfectamente calibrado y solamente había que definir los puntos de referencia. Con lo descrito en los apartados Programa de mecanizado del toroide y Estado de calibración, se procedió al mecanizado sin novedad.

El resultado fue el esperado, una superficie tórica en la que poder mecanizar los álabes. Se puede apreciar en la Figura 43. Toroide mecanizado. La superficie tórica fue marcada de negro para la siguiente fase del mecanizado.



Figura 43. Toroide mecanizado.

En la segunda fase, se procedió al mecanizado de los álabes y álabes intermedios en el centro de mecanizado **LAGUN L850**. Mediante una unidad de almacenamiento USB, se introdujo el código ISO definido en el *Anexo 9. Código ISO* en el ordenador del centro de mecanizado. Con cuidado de realizar una correcta fijación de la pieza en el utillaje de la máquina y una distancia de seguridad prudente de la herramienta, se procedió a la ejecución del programa.

La herramienta comenzó desplazándose lentamente a la posición de inicio del mecanizado siguiendo con el mecanizado del primer álabe. Para mecanizar los siguientes álabes, se tuvo que repetir el programa por cada uno de ellos. En la Figura 44 y Figura 45 se puede observar el proceso de mecanizado.

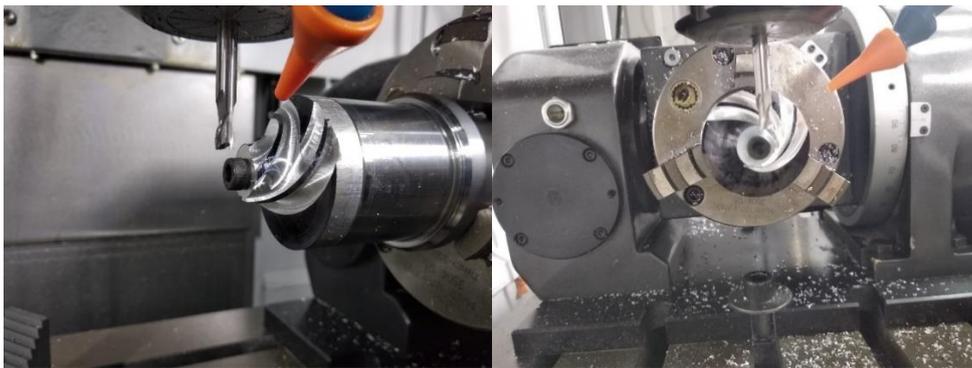


Figura 44. Mecanizando un álabe.

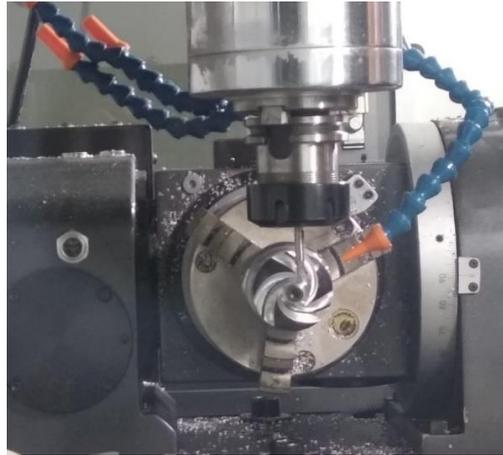


Figura 45. Alabes mecanizados

Finalmente, se obtuvo el rodete completamente mecanizado, sin errores de diseño visibles. Retirando la pieza del soporte fabricado para su fabricación, la pieza resultante se puede observar en la Figura 46. Los álabes están diferenciados por el marcado negro.



Figura 46. Rodete. Resultado final

7. Memoria económica

Los costes y los tiempos de producción son muy importantes para las empresas dedicadas al sector industrial, por lo que requieren modelos productivos para conseguir la mejor utilización de los recursos de fabricación. La mejora de una de las variables del proceso de mecanizado tiene un efecto muy notable en la productividad, y por lo tanto en el rendimiento de la inversión inicial.

Los centros de mecanizado tienen un valor económico inicial muy elevado, por lo tanto, es el factor económico más importante del proyecto. Sin los centros mecanizados del Departamento de Ingeniería de fabricación de la UPCT no se hubiera podido realizar este proyecto.

La materia prima empleada para el mecanizado del rodete ha sido aluminio, un material de bajo coste (*2.02 euros/kg*). Gracias a la poca dureza del aluminio, las herramientas de mecanizado sufren un desgaste mínimo durante el proceso, por lo tanto, no se tiene en cuenta el remplazo de herramienta.

En cuanto al tiempo empleado en el proyecto, el tiempo de mecanizado real representa solamente entorno al 10% del tiempo total. Hay que tener en cuenta otros factores, como el tiempo de carga/descarga de la pieza, averías, mediciones de máquina, además del tiempo de cambio de herramienta y del tiempo de programación. La parte del proyecto donde más tiempo se ha invertido con diferencia ha sido en la elaboración del programa.

Si se ignora el coste del equipo utilizado y la elaboración del programa y se supone que un único operario podría realizar el mecanizado del rodete, el proceso de fabricación se realiza en un breve periodo de tiempo y con un coste reducido. El programa podría ser modificado para la producción de piezas en serie abaratando aún más los costes.

8. Conclusiones

El programa del proyecto ha sido realizado con éxito. Durante el periodo de programación han surgido varios fallos e inconvenientes, pero han sido solventados. En cuanto a las mejoras, se podría modificar el programa para conseguir reducir tiempos, mejorar la calidad o ahorrar costes.

En el comienzo del proyecto, el principal problema fue descomponer la geometría y trasladarla a una serie de ecuaciones, pero con una búsqueda académica se encontró la forma de describir el problema matemáticamente.

Durante el proceso de mecanizado, el mayor problema se presentó en la calibración y medida de los centros de mecanizado CNC. Un mínimo error en las medidas de los parámetros del proyecto podría estropear todo el mecanizado. Por ejemplo, a la hora de mecanizar el soporte que acompaña el rodete, se cometió el error de realizar el taladro descentrado del centro de la pieza. Cuando el conjunto de la pieza giraba en el utillaje del torno, se producía una oscilación de la pieza, resultando incluso peligroso. El eje de rotación del soporte y el eje de rotación del rodete no eran concordantes.

En definitiva, con este proyecto se ha conseguido desarrollar un programa capaz de crear la trayectoria de la herramienta en un centro de mecanizo CNC de 5 ejes para la fabricación de los álabes de un rodete de un compresor centrífugo según los parámetros de diseño programados.

9. Bibliografía

- Cuenca, A. L. (1997). *Geometría diferencial*. Madrid: CLAGSA.
- FAGOR AUTOMATION. (s.f.). CNC 8055T. Manual de programación.
- QA Stack*. (s.f.). Obtenido de <https://qastack.mx/engineering/25813/how-do-i-calculate-the-force-coming-from-the-centrifugal-compressor-exhaust>
- Rida T. Farouki, S. L. (2012). Optimal tool orientation control for 5-axis CNC milling with ball-end cutters. *Computer Aided Geometric Design*, 226-239.
- S. Larry Dixon, C. A. (1978). *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*. ELSELVIER.
- Sánchez Reinoso, H. T. (s.f.). *Fabricación Asistida por Ordenador*. Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación: UPCT.
- Struik, D. (1988). *Lectures on Classical Differential Geometry*. New York: Dover Publications.

Anexos

Anexo 1. Discretización del ángulo ν y u	54
Anexo 2. Geometría de la fibra media de un álabe	55
Anexo 3. Triedro de Darboux.....	56
Anexo 4. Ángulo de giro B y C	59
Anexo 5. Geometría de un álabe transformada	60
Anexo 6. Trayectoria de la herramienta anverso.....	64
Anexo 7. Trayectoria de la herramienta reverso	65
Anexo 8. Distancia de seguridad	66
Anexo 9. Código ISO de un álabe	67
Anexo 10. Código ISO de un álabe intermedio.....	69

Anexo 1. Discretización del ángulo v y u

Utilizando 40 puntos para discretizar el rango v en la ecuación (6), se obtienen los siguientes resultados de u :

v	u
3.14159265	1.570796327
3.18086256	1.649305887
3.22013247	1.727634467
3.25940238	1.805603855
3.29867229	1.883041264
3.33794219	1.959781799
3.3772121	2.03567063
3.41648201	2.110564819
3.45575192	2.184334757
3.49502183	2.256865186
3.53429174	2.328055813
3.57356164	2.397821535
3.61283155	2.466092305
3.65210146	2.532812701
3.69137137	2.597941233
3.73064128	2.661449455
3.76991118	2.723320941
3.80918109	2.783550164
3.848451	2.842141328
3.88772091	2.899107199
3.92699082	2.954467954
3.96626073	3.008250086
4.00553063	3.060485368
4.04480054	3.111209898
4.08407045	3.160463236
4.12334036	3.208287619
4.16261027	3.25472727
4.20188017	3.299827794
4.24115008	3.343635651
4.28041999	3.386197705
4.3196899	3.427560845
4.35895981	3.467771666
4.39822972	3.506876204
4.43749962	3.544919728
4.47676953	3.581946562
4.51603944	3.617999961
4.55530935	3.653122005
4.59457926	3.687353528
4.63384916	3.720734073
4.67311907	3.753301857
4.71238859	3.785093448

Anexo 2. Geometría de la fibra media de un álabe

Los parámetros de diseño del rodete se han definido como:

R 25 mm

r 15 mm

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
2.83302E-15	10	1.83772E-15
-0.78519632	9.98072591	-0.58889724
-1.56918191	9.92293334	-1.17688644
-2.35074795	9.82671142	-1.76306096
-3.1286893	9.69220851	-2.34651698
-3.90180644	9.51963201	-2.92635483
-4.66890728	9.30924801	-3.50168046
-5.428809	9.06138091	-4.07160675
-6.18033989	8.77641291	-4.63525492
-6.92234114	8.4547834	-5.19175586
-7.65366865	8.09698831	-5.74025149
-8.37319475	7.70357935	-6.27989606
-9.07980999	7.2751631	-6.8098575
-9.77242483	6.81240018	-7.32931862
-10.4499713	6.31600411	-7.83747847
-11.1114047	5.78674031	-8.3335535
-11.755705	5.22542486	-8.81677878
-12.381879	4.63292327	-9.28640924
-12.988961	4.01014914	-9.74172072
-13.5760149	3.35806274	-10.1820112
-14.1421356	2.67766953	-10.6066017
-14.6864502	1.97001864	-11.0148376
-15.2081193	1.23620121	-11.4060895
-15.7063386	0.47734873	-11.779754
-16.1803399	-0.3053687	-12.1352549
-16.6293922	-1.1107442	-12.4720442
-17.0528033	-1.9375359	-12.7896025
-17.4499201	-2.784469	-13.0874401
-17.8201305	-3.6502375	-13.3650979
-18.1628635	-4.5335066	-13.6221476
-18.4775907	-5.4329142	-13.858193
-18.7638267	-6.3470736	-14.07287
-19.0211303	-7.2745751	-14.2658477
-19.2491047	-8.2139888	-14.4368285
-19.4473984	-9.1638659	-14.5855488
-19.6157056	-10.122742	-14.7117792
-19.7537668	-11.089138	-14.8153251
-19.8613691	-12.061565	-14.8960269
-19.9383467	-13.038523	-14.95376
-19.9845807	-14.018505	-14.9884355
-20	-14.99999	-15

Anexo 3. Triedro de Darboux

N_x	N_y	N_z
2.83302E-16	1	-1.2251E-16
-0.078368467	0.99615112	0.039259816
-0.155714442	0.98468126	0.078459096
-0.231043136	0.9658178	0.117537397
-0.303413705	0.93992999	0.156434465
-0.371962694	0.90751502	0.195090322
-0.435923594	0.86918001	0.233445364
-0.494641753	0.82562075	0.27144045
-0.547584232	0.77759887	0.309016994
-0.594344581	0.72591838	0.346117057
-0.634642819	0.67140292	0.382683432
-0.668321173	0.61487465	0.418659738
-0.695336312	0.55713557	0.4539905
-0.7157489	0.4989517	0.488621241
-0.729711315	0.44104041	0.522498565
-0.737454335	0.38406096	0.555570233
-0.739273503	0.32860795	0.587785252
-0.735515752	0.27520767	0.619093949
-0.726566752	0.22431671	0.649448048
-0.712839299	0.17632266	0.678800746
-0.69476296	0.1315463	0.707106781
-0.672775061	0.09024505	0.734322509
-0.647313057	0.05261723	0.760405966
-0.618808225	0.01880689	0.785316931
-0.587680601	-0.01109119	0.809016994
-0.554335042	-0.03702627	0.831469612
-0.519158285	-0.05898665	0.852640164
-0.482516857	-0.07699481	0.872496007
-0.444755721	-0.09110281	0.891006524
-0.406197513	-0.10138815	0.908143174
-0.367142271	-0.10794981	0.923879533
-0.32786755	-0.11090485	0.938191336
-0.288628829	-0.11038524	0.951056516
-0.249660143	-0.10653512	0.962455236
-0.211174878	-0.09950834	0.97236992
-0.173366668	-0.08946637	0.98078528
-0.136410367	-0.07657646	0.987688341
-0.100463044	-0.06100997	0.993068457
-0.065664996	-0.0429411	0.996917334
-0.032140742	-0.02254564	0.999229036
-3.14159E-07	-2.3562E-07	1

t_x	t_y	t_z
-0.8	1.2251E-16	-0.6
-0.799383229	-0.03925982	-0.5995374
-0.797533867	-0.0784591	-0.5981504
-0.794454766	-0.1175374	-0.5958411
-0.790150672	-0.15643447	-0.592613
-0.784628224	-0.19509032	-0.5884712
-0.777895936	-0.23344536	-0.583422
-0.769964189	-0.27144045	-0.5774731
-0.760845213	-0.30901699	-0.5706339
-0.750553069	-0.34611706	-0.5629148
-0.739103626	-0.38268343	-0.5543277
-0.726514539	-0.41865974	-0.5448859
-0.712805219	-0.4539905	-0.5346039
-0.697996806	-0.48862124	-0.5234976
-0.682112131	-0.52249856	-0.5115841
-0.66517569	-0.55557023	-0.4988818
-0.647213595	-0.58778525	-0.4854102
-0.628253545	-0.61909395	-0.4711902
-0.608324772	-0.64944805	-0.4562436
-0.587458008	-0.67880075	-0.4405935
-0.565685425	-0.70710678	-0.4242641
-0.543040596	-0.73432251	-0.4072804
-0.519558439	-0.76040597	-0.3896688
-0.495275159	-0.78531693	-0.3714564
-0.470228202	-0.80901699	-0.3526712
-0.444456186	-0.83146961	-0.3333421
-0.417998852	-0.85264016	-0.3134991
-0.390896993	-0.87249601	-0.2931727
-0.3631924	-0.89100652	-0.2723943
-0.33492779	-0.90814317	-0.2511958
-0.306146746	-0.92387953	-0.2296101
-0.276893646	-0.93819134	-0.2076702
-0.247213595	-0.95105652	-0.1854102
-0.21715236	-0.96245524	-0.1628643
-0.186756291	-0.97236992	-0.1400672
-0.156072258	-0.98078528	-0.1170542
-0.125147572	-0.98768834	-0.0938607
-0.094029918	-0.99306846	-0.0705224
-0.062767277	-0.99691733	-0.0470755
-0.031407853	-0.99922904	-0.0235559
-3.14159E-07	-1	-2.356E-07

b_x	b_y	b_z
0.6	-2.6799E-16	-0.8
0.59568854	0.078368467	-0.7993832
0.58283166	0.155714442	-0.7975339
0.56165888	0.231043136	-0.7944548
0.53254299	0.303413705	-0.7901507
0.49598619	0.371962694	-0.7846282
0.45260196	0.435923594	-0.7778959
0.40309389	0.494641753	-0.7699642
0.34823278	0.547584232	-0.7608452
0.28883319	0.594344581	-0.7505531
0.22573064	0.634642819	-0.7391036
0.15976055	0.668321173	-0.7265145
0.09173948	0.695336312	-0.7128052
0.0224493	0.7157489	-0.6979968
-0.0473755	0.729711315	-0.6821121
-0.1170573	0.737454335	-0.6651757
-0.1859819	0.739273503	-0.6472136
-0.2536022	0.735515752	-0.6282535
-0.3194397	0.726566752	-0.6083248
-0.3830838	0.712839299	-0.587458
-0.4441896	0.69476296	-0.5656854
-0.5024745	0.672775061	-0.5430406
-0.5577139	0.647313057	-0.5195584
-0.6097367	0.618808225	-0.4952752
-0.65842	0.587680601	-0.4702282
-0.7036841	0.554335042	-0.4444562
-0.7454875	0.519158285	-0.4179989
-0.7838221	0.482516857	-0.390897
-0.8187085	0.444755721	-0.3631924
-0.8501923	0.406197513	-0.3349278
-0.8783398	0.367142271	-0.3061467
-0.9032346	0.32786755	-0.2768936
-0.924975	0.288628829	-0.2472136
-0.9436708	0.249660143	-0.2171524
-0.9594411	0.211174878	-0.1867563
-0.9724122	0.173366668	-0.1560723
-0.9827158	0.136410367	-0.1251476
-0.9904875	0.100463044	-0.0940299
-0.9958656	0.065664996	-0.0627673
-0.9989897	0.032140742	-0.0314079
-1	3.14159E-07	-3.142E-07

Anexo 4. Ángulo de giro *B* y *C*

Giro <i>C</i>	Giro <i>B</i>
-4.712389	1.57079633
-4.6338794	1.53152642
-4.5555508	1.49225651
-4.4775815	1.4529866
-4.400144	1.41371669
-4.3234035	1.37444679
-4.2475147	1.33517688
-4.1726205	1.29590697
-4.0988506	1.25663706
-4.0263201	1.21736715
-3.9551295	1.17809725
-3.8853638	1.13882734
-3.817093	1.09955743
-3.7503726	1.06028752
-3.6852441	1.02101761
-3.6217359	0.9817477
-3.5598644	0.9424778
-3.4996351	0.90320789
-3.441044	0.86393798
-3.3840781	0.82466807
-3.3287174	0.78539816
-3.2749352	0.74612826
-3.2226999	0.70685835
-3.1719754	0.66758844
-3.1227221	0.62831853
-3.0748977	0.58904862
-3.028458	0.54977871
-2.9833575	0.51050881
-2.9395497	0.4712389
-2.8969876	0.43196899
-2.8556245	0.39269908
-2.8154136	0.35342917
-2.7763091	0.31415927
-2.7382656	0.27488936
-2.7012387	0.23561945
-2.6651853	0.19634954
-2.6300633	0.15707963
-2.5958318	0.11780972
-2.5624512	0.07853982
-2.5298835	0.03926991
-2.4980919	3.927E-07

Anexo 5. Geometría de un álabe transformada

x	y	z
-233.95	0	-223.95
-232.78814	0	-214.78444
-231.26733	0	-205.67156
-229.38993	0	-196.62541
-227.15883	0	-187.65995
-224.57746	0	-178.78899
-221.64981	0	-170.02621
-218.38039	0	-161.38513
-214.77425	0	-152.87906
-210.83694	0	-144.52113
-206.57453	0	-136.32422
-201.9936	0	-128.30098
-197.10121	0	-120.46376
-191.90491	0	-112.82466
-186.4127	0	-105.39546
-180.63306	0	-98.187604
-174.57489	0	-91.212215
-168.24755	0	-84.480047
-161.66077	0	-78.00148
-154.82473	0	-71.786503
-147.74996	0	-65.844699
-140.44737	0	-60.18523
-132.92822	0	-54.816823
-125.20411	0	-49.747755
-117.28693	0	-44.985843
-109.18892	0	-40.538428
-100.92254	0	-36.412369
-92.500539	0	-32.614028
-83.935914	0	-29.149261
-75.241866	0	-26.023411
-66.431801	0	-23.241298
-57.519302	0	-20.807211
-48.518113	0	-18.724903
-39.442112	0	-16.997586
-30.305295	0	-15.627923
-21.121749	0	-14.618026
-11.905635	0	-13.969451
-2.6711627	0	-13.6832
6.5674279	0	-13.759712
15.795892	0	-14.198872
24.9999081	0	-14.99999

Anexo 6. Trayectoria de la herramienta anverso

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
-239.7	-2.4	-234.9	1.57079633	-4.712389
-238.53124	-2.4	-225.38306	1.53152642	-4.6338794
-236.98974	-2.4	-215.91935	1.49225651	-4.5555508
-235.07789	-2.4	-206.52345	1.4529866	-4.4775815
-232.79864	-2.4	-197.20986	1.41371669	-4.400144
-230.15549	-2.4	-187.99293	1.37444679	-4.3234035
-227.15252	-2.4	-178.88687	1.33517688	-4.2475147
-223.79437	-2.4	-169.90573	1.29590697	-4.1726205
-220.0862	-2.4	-161.06336	1.25663706	-4.0988506
-216.03375	-2.4	-152.37338	1.21736715	-4.0263201
-211.64325	-2.4	-143.84921	1.17809725	-3.9551295
-206.92148	-2.4	-135.50397	1.13882734	-3.8853638
-201.87572	-2.4	-127.35054	1.09955743	-3.817093
-196.51375	-2.4	-119.4015	1.06028752	-3.7503726
-190.84383	-2.4	-111.66909	1.02101761	-3.6852441
-184.87471	-2.4	-104.16525	0.9817477	-3.6217359
-178.6156	-2.4	-96.901537	0.9424778	-3.5598644
-172.07613	-2.4	-89.889156	0.90320789	-3.4996351
-165.26641	-2.4	-83.13892	0.86393798	-3.441044
-158.19692	-2.4	-76.661236	0.82466807	-3.3840781
-150.87857	-2.4	-70.466093	0.78539816	-3.3287174
-143.32264	-2.4	-64.563044	0.74612826	-3.2749352
-135.54078	-2.4	-58.96119	0.70685835	-3.2226999
-127.545	-2.4	-53.669169	0.66758844	-3.1719754
-119.34761	-2.4	-48.695141	0.62831853	-3.1227221
-110.96127	-2.4	-44.046775	0.58904862	-3.0748977
-102.3989	-2.4	-39.73124	0.54977871	-3.028458
-93.673699	-2.4	-35.755189	0.51050881	-2.9833575
-84.799129	-2.4	-32.124753	0.4712389	-2.9395497
-75.788871	-2.4	-28.84553	0.43196899	-2.8969876
-66.656817	-2.4	-25.922576	0.39269908	-2.8556245
-57.41705	-2.4	-23.360398	0.35342917	-2.8154136
-48.083815	-2.4	-21.162947	0.31415927	-2.7763091
-38.671504	-2.4	-19.333612	0.27488936	-2.7382656
-29.194631	-2.4	-17.875212	0.23561945	-2.7012387
-19.667807	-2.4	-16.789997	0.19634954	-2.6651853
-10.105723	-2.4	-16.07964	0.15707963	-2.6300633
-0.5231224	-2.4	-15.745237	0.11780972	-2.5958318
9.06521899	-2.4	-15.787302	0.07853982	-2.5624512
18.6445167	-2.4	-16.205772	0.03926991	-2.5298835
28.1999046	-2.4	-16.99999	3.927E-07	-2.4980919

Anexo 7. Trayectoria de la herramienta reverso

x	y	z	B	C
-246.1	2.4	-234.9	1.57079633	-4.712389
-244.93124	2.4	-225.38306	1.53152642	-4.6338794
-243.38974	2.4	-215.91935	1.49225651	-4.5555508
-241.47789	2.4	-206.52345	1.4529866	-4.4775815
-239.19864	2.4	-197.20986	1.41371669	-4.400144
-236.55549	2.4	-187.99293	1.37444679	-4.3234035
-233.55252	2.4	-178.88687	1.33517688	-4.2475147
-230.19437	2.4	-169.90573	1.29590697	-4.1726205
-226.4862	2.4	-161.06336	1.25663706	-4.0988506
-222.43375	2.4	-152.37338	1.21736715	-4.0263201
-218.04325	2.4	-143.84921	1.17809725	-3.9551295
-213.32148	2.4	-135.50397	1.13882734	-3.8853638
-208.27572	2.4	-127.35054	1.09955743	-3.817093
-202.91375	2.4	-119.4015	1.06028752	-3.7503726
-197.24383	2.4	-111.66909	1.02101761	-3.6852441
-191.27471	2.4	-104.16525	0.9817477	-3.6217359
-185.0156	2.4	-96.901537	0.9424778	-3.5598644
-178.47613	2.4	-89.889156	0.90320789	-3.4996351
-171.66641	2.4	-83.13892	0.86393798	-3.441044
-164.59692	2.4	-76.661236	0.82466807	-3.3840781
-157.27857	2.4	-70.466093	0.78539816	-3.3287174
-149.72264	2.4	-64.563044	0.74612826	-3.2749352
-141.94078	2.4	-58.96119	0.70685835	-3.2226999
-133.945	2.4	-53.669169	0.66758844	-3.1719754
-125.74761	2.4	-48.695141	0.62831853	-3.1227221
-117.36127	2.4	-44.046775	0.58904862	-3.0748977
-108.7989	2.4	-39.73124	0.54977871	-3.028458
-100.0737	2.4	-35.755189	0.51050881	-2.9833575
-91.199129	2.4	-32.124753	0.4712389	-2.9395497
-82.188871	2.4	-28.84553	0.43196899	-2.8969876
-73.056817	2.4	-25.922576	0.39269908	-2.8556245
-63.81705	2.4	-23.360398	0.35342917	-2.8154136
-54.483815	2.4	-21.162947	0.31415927	-2.7763091
-45.071504	2.4	-19.333612	0.27488936	-2.7382656
-35.594631	2.4	-17.875212	0.23561945	-2.7012387
-26.067807	2.4	-16.789997	0.19634954	-2.6651853
-16.505723	2.4	-16.07964	0.15707963	-2.6300633
-6.9231224	2.4	-15.745237	0.11780972	-2.5958318
2.66521899	2.4	-15.787302	0.07853982	-2.5624512
12.2445167	2.4	-16.205772	0.03926991	-2.5298835
21.7999046	2.4	-16.99999	3.927E-07	-2.4980919

Anexo 8. Distancia de seguridad

Ángulo entrada (β)	Anverso		Reverso	
	Δx	Δy	Δx	Δy
36.8698976°	-11.2	-14.9333333	-4.8	-6.4
	$\Delta x + x_a$	$\Delta y + y_a$	$\Delta x + x_r$	$\Delta y + y_r$
	-250.9	-17.3333333	-250.9	-4

Ángulo salida (β)	Anverso		Reverso	
	Δx	Δy	Δx	Δy
36.8698976°	4.8	6.4	11.2	14.9333333
	$\Delta x + x_a$	$\Delta y + y_a$	$\Delta x + x_r$	$\Delta y + y_r$
	32.9999	4	32.9999	17.3333333

Anexo 9. Código ISO de un álabe

N10	G91 M3 M11 M13
N20	G1 X11.2 Y14.933 Z0 B0 C0
N30	G1 X1.169 Y0 Z9.517 B-2.25 C4.498
N40	G1 X1.541 Y0 Z9.464 B-2.25 C4.488
N50	G1 X1.912 Y0 Z9.396 B-2.25 C4.467
N60	G1 X2.279 Y0 Z9.313 B-2.25 C4.437
N70	G1 X2.644 Y0 Z9.217 B-2.25 C4.397
N80	G1 X3.002 Y0 Z9.106 B-2.25 C4.348
N90	G1 X3.359 Y0 Z8.981 B-2.25 C4.291
N100	G1 X3.708 Y0 Z8.843 B-2.25 C4.227
N110	G1 X4.052 Y0 Z8.69 B-2.25 C4.156
N120	G1 X4.391 Y0 Z8.524 B-2.25 C4.079
N130	G1 X4.722 Y0 Z8.345 B-2.25 C3.997
N140	G1 X5.045 Y0 Z8.153 B-2.25 C3.912
N150	G1 X5.362 Y0 Z7.949 B-2.25 C3.822
N160	G1 X5.67 Y0 Z7.733 B-2.25 C3.732
N170	G1 X5.969 Y0 Z7.504 B-2.25 C3.639
N180	G1 X6.259 Y0 Z7.263 B-2.25 C3.545
N190	G1 X6.54 Y0 Z7.013 B-2.25 C3.451
N200	G1 X6.81 Y0 Z6.75 B-2.25 C3.357
N210	G1 X7.069 Y0 Z6.478 B-2.25 C3.264
N220	G1 X7.318 Y0 Z6.195 B-2.25 C3.172
N230	G1 X7.556 Y0 Z5.903 B-2.25 C3.081
N240	G1 X7.782 Y0 Z5.602 B-2.25 C2.993
N250	G1 X7.996 Y0 Z5.292 B-2.25 C2.906
N260	G1 X8.197 Y0 Z4.974 B-2.25 C2.822
N270	G1 X8.387 Y0 Z4.648 B-2.25 C2.74
N280	G1 X8.562 Y0 Z4.316 B-2.25 C2.661
N290	G1 X8.725 Y0 Z3.976 B-2.25 C2.584
N300	G1 X8.875 Y0 Z3.63 B-2.25 C2.51
N310	G1 X9.01 Y0 Z3.279 B-2.25 C2.439
N320	G1 X9.132 Y0 Z2.923 B-2.25 C2.37
N330	G1 X9.24 Y0 Z2.563 B-2.25 C2.304
N340	G1 X9.333 Y0 Z2.197 B-2.25 C2.24
N350	G1 X9.412 Y0 Z1.829 B-2.25 C2.18
N360	G1 X9.477 Y0 Z1.459 B-2.25 C2.121
N370	G1 X9.527 Y0 Z1.085 B-2.25 C2.066
N380	G1 X9.562 Y0 Z0.71 B-2.25 C2.012
N390	G1 X9.583 Y0 Z0.335 B-2.25 C1.962
N400	G1 X9.588 Y0 Z-0.042 B-2.25 C1.912
N410	G1 X9.58 Y0 Z-0.419 B-2.25 C1.866
N420	G1 X9.555 Y0 Z-0.794 B-2.25 C1.822
N430	G1 X4.8 Y6.4 Z0 B0 C0
N440	G1 X0 Y13.333 Z0 B0 C0
N450	G1 X-11.2 Y-14.933 Z0 B0 C0

N460	G1 X1.169 Y0 Z9.517 B-2.25 C4.498
N470	G1 X1.541 Y0 Z9.464 B-2.25 C4.488
N480	G1 X1.912 Y0 Z9.396 B-2.25 C4.467
N490	G1 X2.279 Y0 Z9.314 B-2.25 C4.437
N500	G1 X2.643 Y0 Z9.217 B-2.25 C4.397
N510	G1 X3.003 Y0 Z9.106 B-2.25 C4.348
N520	G1 X3.358 Y0 Z8.981 B-2.25 C4.291
N530	G1 X3.708 Y0 Z8.842 B-2.25 C4.227
N540	G1 X4.052 Y0 Z8.69 B-2.25 C4.156
N550	G1 X4.39 Y0 Z8.524 B-2.25 C4.079
N560	G1 X4.722 Y0 Z8.345 B-2.25 C3.997
N570	G1 X5.046 Y0 Z8.153 B-2.25 C3.912
N580	G1 X5.362 Y0 Z7.949 B-2.25 C3.823
N590	G1 X5.67 Y0 Z7.732 B-2.25 C3.732
N600	G1 X5.969 Y0 Z7.504 B-2.25 C3.639
N610	G1 X6.259 Y0 Z7.264 B-2.25 C3.545
N620	G1 X6.539 Y0 Z7.012 B-2.25 C3.451
N630	G1 X6.81 Y0 Z6.75 B-2.25 C3.357
N640	G1 X7.069 Y0 Z6.478 B-2.25 C3.264
N650	G1 X7.318 Y0 Z6.195 B-2.25 C3.172
N660	G1 X7.556 Y0 Z5.903 B-2.25 C3.081
N670	G1 X7.782 Y0 Z5.602 B-2.25 C2.993
N680	G1 X7.996 Y0 Z5.292 B-2.25 C2.906
N690	G1 X8.197 Y0 Z4.974 B-2.25 C2.822
N700	G1 X8.386 Y0 Z4.648 B-2.25 C2.74
N710	G1 X8.562 Y0 Z4.316 B-2.25 C2.661
N720	G1 X8.725 Y0 Z3.976 B-2.25 C2.584
N730	G1 X8.875 Y0 Z3.63 B-2.25 C2.51
N740	G1 X9.01 Y0 Z3.279 B-2.25 C2.439
N750	G1 X9.132 Y0 Z2.923 B-2.25 C2.37
N760	G1 X9.24 Y0 Z2.562 B-2.25 C2.304
N770	G1 X9.333 Y0 Z2.197 B-2.25 C2.241
N780	G1 X9.412 Y0 Z1.829 B-2.25 C2.18
N790	G1 X9.477 Y0 Z1.458 B-2.25 C2.121
N800	G1 X9.527 Y0 Z1.085 B-2.25 C2.066
N810	G1 X9.562 Y0 Z0.71 B-2.25 C2.012
N820	G1 X9.583 Y0 Z0.334 B-2.25 C1.961
N830	G1 X9.588 Y0 Z-0.042 B-2.25 C1.913
N840	G1 X9.579 Y0 Z-0.418 B-2.25 C1.866
N850	G1 X9.555 Y0 Z-0.794 B-2.25 C1.822
N860	G1 X-4.8 Y-6.4 Z0 B0 C0
N870	G1 X0 Y-13.333 Z0 B0 C0
N880	G1 C90
N890	G90 M30

Anexo 10. Código ISO de un álabe intermedio

N10	G91 M3 M11 M13
N20	G1 X8 Y4 Z0 B0 C0
N30	G1 X1.169 Y0 Z9.517 B-2.25 C4.498
N40	G1 X1.541 Y0 Z9.464 B-2.25 C4.488
N50	G1 X1.911 Y0 Z9.396 B-2.25 C4.467
N60	G1 X2.278 Y0.001 Z9.314 B-2.25 C4.437
N70	G1 X2.64 Y0.003 Z9.217 B-2.25 C4.397
N80	G1 X2.996 Y0.005 Z9.106 B-2.25 C4.348
N90	G1 X3.346 Y0.009 Z8.981 B-2.25 C4.291
N100	G1 X3.688 Y0.015 Z8.842 B-2.25 C4.227
N110	G1 X4.02 Y0.024 Z8.69 B-2.25 C4.156
N120	G1 X4.343 Y0.036 Z8.524 B-2.25 C4.079
N130	G1 X4.653 Y0.052 Z8.345 B-2.25 C3.997
N140	G1 X4.95 Y0.072 Z8.153 B-2.25 C3.912
N150	G1 X5.231 Y0.098 Z7.949 B-2.25 C3.823
N160	G1 X5.496 Y0.13 Z7.732 B-2.25 C3.732
N170	G1 X5.743 Y0.17 Z7.504 B-2.25 C3.639
N180	G1 X5.968 Y0.218 Z7.264 B-2.25 C3.545
N190	G1 X6.171 Y0.276 Z7.012 B-2.25 C3.451
N200	G1 X6.35 Y0.345 Z6.75 B-2.25 C3.357
N210	G1 X6.502 Y0.425 Z6.478 B-2.25 C3.264
N220	G1 X6.626 Y0.52 Z6.195 B-2.25 C3.172
N230	G1 X7.556 Y0 Z5.903 B-2.25 C3.081
N240	G1 X7.782 Y0 Z5.602 B-2.25 C2.993
N250	G1 X7.996 Y0 Z5.292 B-2.25 C2.906
N260	G1 X8.197 Y0 Z4.974 B-2.25 C2.822
N270	G1 X8.386 Y0 Z4.648 B-2.25 C2.74
N280	G1 X8.562 Y0 Z4.316 B-2.25 C2.661
N290	G1 X8.725 Y0 Z3.976 B-2.25 C2.584
N300	G1 X8.875 Y0 Z3.63 B-2.25 C2.51
N310	G1 X9.01 Y0 Z3.279 B-2.25 C2.439
N320	G1 X9.132 Y0 Z2.923 B-2.25 C2.37
N330	G1 X9.24 Y0 Z2.562 B-2.25 C2.304
N340	G1 X9.333 Y0 Z2.197 B-2.25 C2.241
N350	G1 X9.412 Y0 Z1.829 B-2.25 C2.18
N360	G1 X9.477 Y0 Z1.458 B-2.25 C2.121
N370	G1 X9.527 Y0 Z1.085 B-2.25 C2.066
N380	G1 X9.562 Y0 Z0.71 B-2.25 C2.012
N390	G1 X9.583 Y0 Z0.334 B-2.25 C1.961
N400	G1 X9.588 Y0 Z-0.042 B-2.25 C1.913
N410	G1 X9.579 Y0 Z-0.418 B-2.25 C1.866
N420	G1 X9.555 Y0 Z-0.794 B-2.25 C1.822
N430	G1 X11.2 Y14.933 Z0 B0 C0
N440	G1 X0 Y-13.333 Z0 B0 C0

N450	G1 X-4.8 Y-6.4 Z0 B0 C0
N460	G1 X-9.555 Y0 Z0.794 B2.25 C-1.822
N470	G1 X-9.579 Y0 Z0.418 B2.25 C-1.866
N480	G1 X-9.588 Y0 Z0.042 B2.25 C-1.913
N490	G1 X-9.583 Y0 Z-0.334 B2.25 C-1.961
N500	G1 X-9.562 Y0 Z-0.71 B2.25 C-2.012
N510	G1 X-9.527 Y0 Z-1.085 B2.25 C-2.066
N520	G1 X-9.477 Y0 Z-1.458 B2.25 C-2.121
N530	G1 X-9.412 Y0 Z-1.829 B2.25 C-2.18
N540	G1 X-9.333 Y0 Z-2.197 B2.25 C-2.241
N550	G1 X-9.24 Y0 Z-2.562 B2.25 C-2.304
N560	G1 X-9.132 Y0 Z-2.923 B2.25 C-2.37
N570	G1 X-9.01 Y0 Z-3.279 B2.25 C-2.439
N580	G1 X-8.875 Y0 Z-3.63 B2.25 C-2.51
N590	G1 X-8.725 Y0 Z-3.976 B2.25 C-2.584
N600	G1 X-8.562 Y0 Z-4.316 B2.25 C-2.661
N610	G1 X-8.386 Y0 Z-4.648 B2.25 C-2.74
N620	G1 X-8.197 Y0 Z-4.974 B2.25 C-2.822
N630	G1 X-7.996 Y0 Z-5.292 B2.25 C-2.906
N640	G1 X-7.782 Y0 Z-5.602 B2.25 C-2.993
N650	G1 X-7.556 Y0 Z-5.903 B2.25 C-3.081
N660	G1 X-8.011 Y0.52 Z-6.195 B2.25 C-3.172
N670	G1 X-7.637 Y0.425 Z-6.478 B2.25 C-3.264
N680	G1 X-7.269 Y0.345 Z-6.75 B2.25 C-3.357
N690	G1 X-6.907 Y0.276 Z-7.012 B2.25 C-3.451
N700	G1 X-6.55 Y0.218 Z-7.264 B2.25 C-3.545
N710	G1 X-6.196 Y0.17 Z-7.504 B2.25 C-3.639
N720	G1 X-5.844 Y0.13 Z-7.732 B2.25 C-3.732
N730	G1 X-5.492 Y0.098 Z-7.949 B2.25 C-3.823
N740	G1 X-5.142 Y0.072 Z-8.153 B2.25 C-3.912
N750	G1 X-4.791 Y0.052 Z-8.345 B2.25 C-3.997
N760	G1 X-4.438 Y0.036 Z-8.524 B2.25 C-4.079
N770	G1 X-4.085 Y0.024 Z-8.69 B2.25 C-4.156
N780	G1 X-3.729 Y0.015 Z-8.842 B2.25 C-4.227
N790	G1 X-3.371 Y0.009 Z-8.981 B2.25 C-4.291
N800	G1 X-3.01 Y0.005 Z-9.106 B2.25 C-4.348
N810	G1 X-2.647 Y0.003 Z-9.217 B2.25 C-4.397
N820	G1 X-2.281 Y0.001 Z-9.314 B2.25 C-4.437
N830	G1 X-1.912 Y0 Z-9.396 B2.25 C-4.467
N840	G1 X-1.542 Y0 Z-9.464 B2.25 C-4.488
N850	G1 X-1.169 Y0 Z-9.517 B2.25 C-4.498
N860	G1 X-8 Y0 Z0 B0 C0
N870	G1 C90
N880	G90 M30