

IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE UN
MICROENGRANAJE POR MEDIO DE MICROFRESADO

JHON FREDDY GONZÁLEZ ARDILA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.

2023

IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE UN
MICROENGRANAJE POR MEDIO DE MICROFRESADO

JHON FREDDY GONZALEZ ARDILA

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE SOLUCIÓN A
UN PROBLEMA DE INGENIERÍA, PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

DIRECTOR
JORGE ANDRÉS GARCÍA BARBOSA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D. C.
2023

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Empty rectangular box for acceptance notes.

X

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

X

FIRMA DEL JURADO

X

FIRMA DEL JURADO

Bogotá D.C, 14/Diciembre/2023

DEDICATORIA

A mis queridos padres:

En agradecimiento profundo por ser los pilares de mi formación, dedico este logro alcanzado. Su orientación y valores han sido el cimiento sobre el cual he construido mi camino hacia el éxito. Cada paso dado ha sido inspirado por su amor incondicional y apoyo constante.

A mis respetados profesores:

Esta dedicatoria se extiende a aquellos que han iluminado mi camino educativo con su conocimiento y paciencia. Su influencia ha sido esencial para mi crecimiento tanto profesional como personal. Cada enseñanza, cada consejo, ha contribuido a mi formación como individuo. Agradezco su labor incansable en guiarme hacia la excelencia académica y en moldear mi perspectiva para enfrentar el mundo.

A mis apreciados amigos:

Quienes han estado a mi lado en las distintas etapas de este viaje. Su amistad ha sido mi refugio en los momentos de desafío y mi compañía en los momentos de celebración. Aprecio su respaldo inquebrantable y sus consejos sinceros.

A todas las personas que compartieron mi trayectoria:

Todos aquellos que, de alguna manera, han sido parte de mi crecimiento y evolución. A cada uno que ha cruzado mi camino, les doy las gracias por ser parte de este logro.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por ser los pilares fundamentales en mi vida y por su apoyo inquebrantable en cada paso que he dado. Sus enseñanzas y amor han sido mi guía constante, y este logro es un reflejo de su dedicación y sacrificio.

A mi familia, por estar siempre presente en cada etapa de mi formación. Su aliento y cariño han sido un motor que me ha impulsado a esforzarme cada día y a nunca rendirme en la búsqueda de mis metas.

A mis respetados profesores y mentores, cuya sabiduría y paciencia han sido fundamentales en mi desarrollo académico y personal. Sus conocimientos compartidos y su orientación han forjado el profesional en el que me he convertido.

A mis amigos, por su apoyo incondicional. Su amistad ha enriquecido mi vida y ha sido un bálsamo en los momentos de desafío.

A todos aquellos que, de alguna manera, contribuyeron en mi trayectoria, ya sea con palabras de aliento, gestos de apoyo o simplemente estando presentes en mi camino.

Agradezco a la Universidad Santo Tomás y a los recursos que puso a mi disposición, así como a todas las personas que formaron parte de mi proceso de aprendizaje y formación académica. Cada experiencia ha sido invaluable en mi crecimiento.

Por último, agradezco de manera especial al director de mi proyecto de grado, el Ingeniero Jorge Andrés García Barbosa, por su valiosa orientación, apoyo constante y dedicación en cada etapa de este proceso. Su experiencia, conocimientos y guía han sido fundamentales para el éxito de este proyecto y para mi crecimiento como profesional. Su compromiso y disposición para compartir su sabiduría han dejado una marca significativa en mi formación.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	14
2	OBJETIVO	16
2.1	GENERAL	16
2.2	ESPECÍFICOS	16
3	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE ENGRANAJES PEQUEÑOS	17
4	DIMENSIONAMIENTO DE UN MICROENGRANAJE CILÍNDRICO RECTO 18	
4.1	NORMA DIN 3960	18
4.2	HERRAMIENTA DISPONIBLE PARA LA FABRICACIÓN	19
4.3	PARÁMETROS DIMENSIONALES DEL MICROENGRANAJE SEGÚN NORMA DIN 3690	20
4.4	MODELADO DEL MICROENGRANAJE EN AUTODESK INVENTOR	21
4.5	MONTAJE CINEMÁTICO DE UN PAR DE ENGRANAJES	24
4.5.1	Engranaje par	24
4.5.2	Eje para engranaje de 12 y 23 dientes	26
4.5.3	Soporte	27
4.5.4	Ensamblaje	28
5	PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA	29
5.1	TORNO TIPO SUIZO	29
5.2	SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	30
5.3	HERRAMIENTA	31
5.4	HOJA DE PROCESOS	32
5.4.1	Proceso de mecanizado eje con engranaje z12	32
5.4.2	Proceso de mecanizado eje con engranaje z23	33
5.5	GENERACIÓN DE CÓDIGOS G	34
5.5.1	Cálculo de las velocidades de avance	35
5.5.2	Programación manual del proceso de torneado	36
5.5.3	Programación con MATLAB del proceso de fresado de los dientes del engranaje	37
5.5.4	Verificación de trayectorias	39
6	FABRICACIÓN DE MICROENGRANAJE	41

6.1	MONTAJE Y COMPENSACIÓN DE HERRAMIENTA	41
6.2	TIEMPO DE FABRICACIÓN	43
6.3	RESULTADO	44
7	RECOMENDACIONES	46
8	CONCLUSIONES	47
9	BIBLIOGRAFÍA	48
	ANEXO A INTEGRACIÓN AUTODESK INVENTOR® CON EXCEL®	49
	ANEXO B MÉTODO DE DIBUJO ENGRANAJE CILÍNDRICO RECTO.....	51
	ANEXO C PLANOS PARA MANUFACTURA	60
	ANEXO D HOJAS DE PROCESOS	62
	ANEXO E CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vano más pequeño al que se puede llegar.....	19
Figura 2. Herramientas ISCAR EC-A3.....	19
Figura 3. Herramienta de Parámetros en AutoDesk Inventor®.....	21
Figura 4. Ecuación paramétrica de la curva de la involuta en AutoDesk Inventor®.....	21
Figura 5. Boceto microengranaje recto usando la herramienta de parámetros.....	22
Figura 6. Modelo generado.....	22
Figura 7. Verificación vano mínimo $DH < Dv$	23
Figura 8. Boceto engranaje par recto z23 usando la herramienta de parámetros.....	25
Figura 9. Modelo generado y verificación del vano.....	25
Figura 10. Eje para el montaje.....	26
Figura 11. Soporte para el montaje.....	27
Figura 12. Planos para manufactura del soporte.....	27
Figura 13. Ensamblaje del montaje.....	28
Figura 14. Po Ly Gim Diamond 20CSB.....	29
Figura 15. Cinemática del torno Suizo Po Ly Gim Diamond 20CSB.....	30
Figura 16. Barra de latón 3/4".....	30
Figura 17. Herramienta ISCAR EC-A3 vista desde microscopio electrónico.....	31
Figura 18. Proceso de mecanizado z12.....	32
Figura 19. Proceso de mecanizado z23.....	33
Figura 20. Estructura básica de un programa.....	34
Figura 21. Ecuaciones parámetros de corte.....	35
Figura 22. Coordenadas cartesianas del eje.....	36
Figura 23. Código programado siguiendo coordenadas cartesianas para realizar el desbaste del eje.....	37
Figura 24. Representación gráfica aproximada de las posiciones de la herramienta con respecto a la involuta.....	38
Figura 25. Panel principal del programa Helical Gear G-Code Generator con los datos del engranaje modulo 0.6.....	39
Figura 26. Verificación de trayectorias para el programa del eje.....	40
Figura 27. Herramienta ISCAR montada en el Slot 8.....	41
Figura 28. Engranaje módulo 0.6 experimental.....	42
Figura 29. Superposición de la imagen obtenida en el microscopio.....	43
Figura 30. Resultado del proceso de mecanizado.....	44
Figura 31. Ensamblaje del montaje cinemático.....	45
Figura 32. Montaje cinemático bajo microscopio.....	45
Figura 33. Hoja parámetros.....	49
Figura 34. Parámetros.....	50
Figura 35. Vinculación de la hoja de Excel® con Inventor.....	50
Figura 36. Parámetros Autodesk Inventor®.....	51
Figura 37. Círculos D_e , D_i , D_b , D_p	51

Figura 38. Cotas De, Di, Db, Dp.....	52
Figura 39. Menú editar cota.....	52
Figura 40. Parámetros aplicados.....	53
Figura 41. Curva paramétrica Autodesk Inventor®.....	54
Figura 42. Ecuación paramétrica de la curva de la involuta.....	54
Figura 43. Flanco.....	55
Figura 44. línea guía para espesor del diente.....	55
Figura 45. Ángulo del diente.....	56
Figura 46. Simetría para crear el perfil del diente.....	56
Figura 47. Perfil del diente.....	57
Figura 48. Radio redondeos de la raíz del diente.....	57
Figura 49. Plano de trabajo.....	58
Figura 50. Proyección del perfil del diente en el plano de trabajo.....	58
Figura 51. Extrusión del perfil del engranaje.....	59
Figura 52. Patrón circular.....	59
Figura 53. Planos detallados para manufactura eje z12.....	60
Figura 54. Planos detallados para manufactura eje z23.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros dimensionales spur gear DIN 3960.	18
Tabla 2. Cálculos hoja de Excel® con el engranaje recto más pequeño.	20
Tabla 3. Cálculos hoja de Excel® con el engranaje recto z23.	24
Tabla 4. Hoja de procesos eje z12.	62
Tabla 5. Hoja de procesos eje z23.	65

RESUMEN

Este trabajo de grado presenta la implementación exitosa del proceso de manufactura de un microengranaje mediante microfresado en un torno CNC tipo suizo.

Se establecieron tres objetivos específicos:

- **Dimensionar el microengranaje:** Se aplicó la norma DIN 3960 para determinar las dimensiones y características del engranaje, asegurando su correcto funcionamiento.
- **Planificar el proceso de manufactura:** Se definió la secuencia de operaciones, selección de materiales, herramientas y parámetros de corte, optimizando el proceso para la producción eficiente del microengranaje.
- **Desarrollar la fabricación:** Se programaron códigos G y se utilizó software MATLAB para controlar el proceso de microfresado con precisión, permitiendo la creación de los dientes del engranaje con las tolerancias y geometrías requeridas.

Se realizaron ajustes y pruebas durante el proceso de fabricación para garantizar la calidad y precisión del microengranaje. Finalmente, se logró el montaje exitoso del microengranaje en un ensamblaje funcional, evidenciando la viabilidad del proceso desarrollado.

Este trabajo de grado aporta conocimiento sobre la manufactura de microengranajes en tornos CNC tipo suizo, incluyendo la selección de materiales, herramientas, programación y estrategias de control.

Los resultados obtenidos establecen una base para investigaciones futuras en el área de microfabricación, con miras a la producción de componentes cada vez más pequeños y precisos.

1 INTRODUCCIÓN

Una de las tendencias a nivel mundial es la miniaturización de piezas tanto en su totalidad como en algunos rasgos geométricos, en donde se busca obtener piezas que pueden ser usadas en industrias como la electrónica, para reducir los tamaños de los circuitos o en la industria médica para piezas que permiten realizar cirugías micro invasivas [1]. Es fundamental tener en cuenta las escalas micro, meso y macro. Micro se refiere a piezas o rasgos geométricos que tienen medidas en micras hasta un máximo de tres milímetros, las piezas meso son las que van de tres milímetros hasta un metro y las piezas macro son las que tienen medidas superiores a un metro [1].

La primera implementación de la micro tecnología fue por diversas investigaciones que realizaron Estados Unidos, Japón y países de Europa con el propósito de generar un crecimiento en el sistema industrial [2], En Colombia, si bien las empresas aún no tienen una gran participación en la escala micro, ya se están implementando investigaciones por parte de las universidades, como la Universidad Nacional de Colombia, que investiga el desarrollo de microdispositivos para la detección temprana de enfermedades, y la Universidad de los Andes, que trabaja en la creación de microrobots para cirugías micro invasivas. Estas investigaciones buscan fomentar el uso de las micro tecnologías en el país, ya que es una tendencia mundial optimizar, reducir volumen y costos en cuanto a piezas de alta precisión en el campo aeroespacial, automotriz, biomédico, electrónico y de joyería [2].

Se debe tener en cuenta que estos procesos requieren maquinas especializadas para la manufactura de micro piezas, pero requieren de una inversión económica significativa por parte de las instituciones. Estas inversiones pueden llegar a representar hasta el 10% del presupuesto anual de una institución, lo que significa una cantidad considerable de recursos. Sin embargo, las máquinas de control numérico (CNC) pueden realizar dichas piezas alcanzando una precisión de 0.001mm y trabajando por encima de las 10000 RPM [3].

La fabricación del microengranaje por medio del fresado es todo un reto, una de las principales dificultades es que se necesita de una herramienta especial para el fresado del micromódulo para asegurar la creación de un mecanismo de transmisión silencioso, confiable y de alta precisión.

Considerando que las tecnologías de micro manufactura no han sido implementadas ampliamente en el país, se pretende determinar cuál sería el engranaje más pequeño que se puede fabricar con la tecnología disponible en la Universidad Santo Tomás, teniendo en cuenta que la escala micro requiere no solo de la fabricación, sino también de los procesos de control de calidad para verificar la precisión dimensional del producto fabricado.

2 OBJETIVO

2.1 GENERAL

- Implementar el proceso de manufactura de un microengranaje por medio de microfresado.

2.2 ESPECÍFICOS

- Dimensionar un microengranaje con las dimensiones mínimas considerando la capacidad tecnológica de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás.
- Planificar el proceso de manufactura considerando los recursos y restricciones disponibles en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás.
- Desarrollar el proceso de fabricación del microengranaje con base en la planificación planteada.

3 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE ENGRANAJES PEQUEÑOS

En el ámbito de la producción de engranajes pequeños, existen varios procesos utilizados para fabricarlos, como la litografía, la impresión 3D, el brochado, el troquelado y el micromecanizado [1]. Estos métodos de fabricación permiten crear engranajes de precisión adaptados a aplicaciones específicas, como los utilizados en relojes. A continuación, se describirá brevemente cada uno de estos procesos:

- **Litografía por rayos X:** El proceso de litografía por rayos X comienza con la creación de una máscara o molde que contiene el patrón de los dientes del engranaje. La máscara se coloca sobre una capa de material fotosensible, como el fotopolímero, y luego se expone a la luz de rayos X. La luz de rayos X endurece el fotopolímero en las áreas expuestas, mientras que las áreas no expuestas se lavan. El fotopolímero endurecido se utiliza entonces como molde para crear el engranaje mediante deposición de material o grabado.[1].
- **Impresión 3D:** La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es un proceso en el cual se crea un objeto tridimensional capa por capa a partir de un modelo digital. En el caso de los engranajes pequeños, se pueden utilizar diferentes tecnologías de impresión 3D, como la estereolitografía (SLA) o la deposición de material fundido (FDM), para fabricar prototipos o incluso productos finales de engranajes [1].
- **Brochado:** El brochado es un proceso de mecanizado que se utiliza para producir engranajes con alta precisión y acabado superficial. Consiste en utilizar una herramienta llamada brocha para cortar gradualmente los dientes del engranaje en la pieza de trabajo. El brochado puede ser utilizado para producir engranajes pequeños con gran precisión, especialmente en grandes volúmenes de producción [1].
- **Troquelado:** El troquelado es un proceso de fabricación en el cual se utilizan troqueles y prensas para cortar, dar forma y perforar materiales. En el caso de los engranajes pequeños, se pueden utilizar troqueles especiales para cortar los dientes del engranaje en láminas metálicas o plásticas. Este proceso es eficiente para la producción en masa de engranajes con formas sencillas [1].
- **Micromecanizado:** El micromecanizado es un proceso de fabricación que se utiliza para producir componentes de tamaño muy reducido con alta precisión. En el contexto de los engranajes pequeños, se emplean técnicas de micromecanizado, como el fresado o el torneado de alta precisión. Este proceso es utilizado en aplicaciones donde se requiere una precisión muy alta y una miniaturización extrema, como en relojes de pulsera [1].

La elección del método depende de factores como el tamaño, la precisión requerida, el costo y la escala de producción [1].

4 DIMENSIONAMIENTO DE UN MICROENGRANAJE CILÍNDRICO RECTO

El análisis de las características dimensionales del microengranaje recto se llevó a cabo utilizando Excel®, siguiendo los parámetros dimensionales establecidos en la Norma DIN 3960. Se creó una hoja de cálculo que automatiza el análisis y permite calcular las dimensiones principales del microengranaje recto a partir del módulo (m), el número de dientes (z) y el ángulo de presión (α). El uso de Excel para realizar este análisis presenta varias ventajas, como la facilidad de uso, la flexibilidad y la capacidad de automatizar el proceso, lo que permite ahorrar tiempo y esfuerzo.

4.1 NORMA DIN 3960

La norma DIN 3960, publicada por el Instituto Alemán de Normalización (*Deutsches Institut für Normung*, DIN), es una referencia fundamental en la industria de la ingeniería mecánica y de fabricación, especialmente cuando se trata del diseño y la fabricación de engranajes cilíndricos de dientes rectos [2]. Esta norma establece los conceptos clave y los parámetros técnicos que deben tenerse en cuenta para garantizar la calidad, la precisión y la compatibilidad de los engranajes fabricados. Al basarse en esta norma, los diseñadores y fabricantes pueden asegurar la calidad, la eficiencia y la confiabilidad de los engranajes utilizados en diversas aplicaciones industriales.

La norma DIN 3960 se centra en los engranajes cilíndricos con dientes evolventes, que son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones industriales debido a su eficiencia y capacidad de transmitir grandes cargas. Estos engranajes se utilizan en sistemas de transmisión, maquinaria pesada y una amplia gama de equipos mecánicos.

Tabla 1. Parámetros dimensionales spur gear DIN 3960.

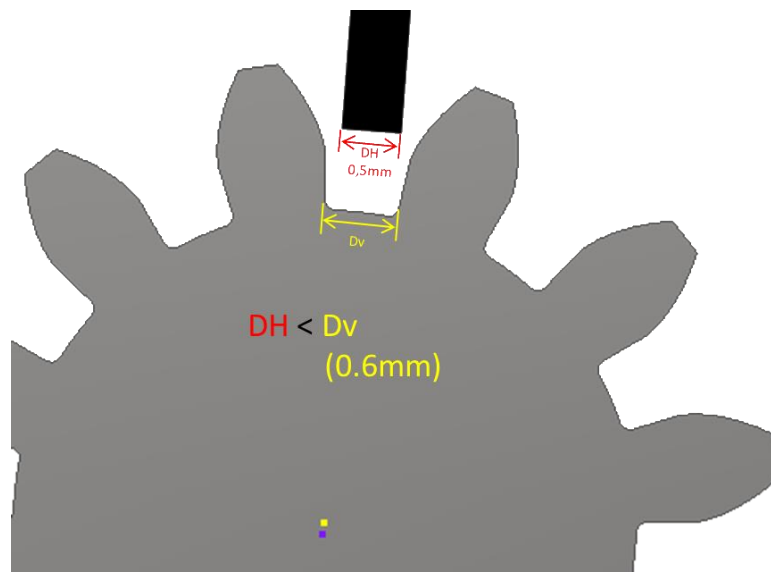
Símbolo	Designación	Formula
Dp	Diámetro primitivo	$m \cdot z$
De	Diámetro exterior	$D_p + (2 \cdot h_a)$
Di	Diámetro interior	$D_p - (2,5 \cdot m)$
Db	Diámetro base	$D_p \cdot \cos(\alpha)$
ha	Addendum	m
hf	Dedendum	$m \cdot 1,157$
WD	Profundidad total	$h_a + h_f$
CL	Holgura	$0,157 \cdot m$
P	Paso circular	$\pi \cdot m$
T	Espesor circular diente	$(\pi/2) \cdot m$
d	Angulo diente	$(T/(D_p/2)) \cdot (180/\pi)$
L	Ancho de cara	$m \cdot 1,5$
k	Fillet	$h_f - h_a$

Fuente: Autor.

4.2 HERRAMIENTA DISPONIBLE PARA LA FABRICACIÓN

Se revisaron las herramientas para micromecanizado con las que cuenta la universidad, y de esta forma establecer cuál es el vano (space width) más pequeño al que se puede llegar con estas. Se encontró que la herramienta más pequeña tiene un diámetro de 0.5mm, por lo que se concluye, que el diámetro de la herramienta debe ser menor que el diámetro del vano tal y como se muestra en la ilustración 1.

Figura 1. Vano más pequeño al que se puede llegar.



Fuente: Autor.

Las herramienta mencionada es la ISCAR EC-A3 005-015C03E38 IC900.

Figura 2. Herramientas ISCAR EC-A3.



Fuente: [3].

4.3 PARÁMETROS DIMENSIONALES DEL MICROENGRANAJE SEGÚN NORMA DIN 3690

Se creó una hoja de cálculo en Excel® con el propósito de utilizarla como una herramienta para calcular la geometría de engranajes con dientes rectos siguiendo los parámetros establecidos en la norma DIN 3690 y así poder encontrar el $DH < D_v$ correcto de acuerdo con la características de la herramienta ISCAR EC-A3 005-015C03E38 IC900 variando los datos de entrada (m , z , α).

Se estableció que el número mínimo de dientes es de 12, porque según la norma DIN 3690 cuando un engranaje tiene un número menor de dientes, se pueden presentar ciertos problemas técnicos. Uno de ellos es la llamada interferencia, que ocurre cuando los dientes del engranaje se solapan o se "chocan" entre sí durante la rotación. Este fenómeno puede provocar un desgaste prematuro de los dientes y una reducción en la eficiencia y la precisión del engranaje. Se pueden aplicar excepciones a la norma DIN 3690, sin embargo, estas situaciones son excepcionales y generalmente requieren un análisis y diseño especializados para garantizar el correcto funcionamiento y la durabilidad del engranaje.

Tabla 2. Cálculos hoja de Excel® con el engranaje recto más pequeño.

VARIABLES DE ENTRADA		
Símbolo	Designación	Valor
α	Ángulo de presión	20
Z	Número de dientes	12
M	Módulo	0,6
Dp	Diametro primitivo mm	7,2
ha	Addendum mm	0,6
hf	Dedendum mm	0,694
WD	Profundidad total mm	1,294
CL	Holgura mm	0,094
De	Diametro exterior mm	8,4
Di	Diametro interior mm	5,7
Db	Diametro base mm	6,766
P	Paso circular mm	1,885
	Diametro base (Db) > Diam interior (Di)?	SI
T	Espesor circular diente mm	0,942
ADDc	Espesor de cabeza de diente mm	0,631
WKG	Profundidad de trabajo (WKG) mm	1,2
d	Ángulo del diente °	15,000
L	Ancho de cara mm	0,9
k	Fillet mm	0,094
α (Rad)	Angulo en radianes	0,349

Fuente: Autor.

4.4 MODELADO DEL MICROENGRANAJE EN AUTODESK INVENTOR

La programación del software Autodesk Inventor® a través de Excel® se llevó a cabo para desarrollar una herramienta de dibujo acelerado por medio de la herramienta llamada “Parámetros” que ofrece Inventor®. Esta herramienta permite que al cambiar los valores en Excel® se actualice automáticamente el boceto en Inventor® y generar los resultados necesarios en el diseño de un engranaje de dientes rectos (El anexo A muestra como integrar Excel® con Autodesk Inventor®).

Figura 3. Herramienta de Parámetros en AutoDesk Inventor®.

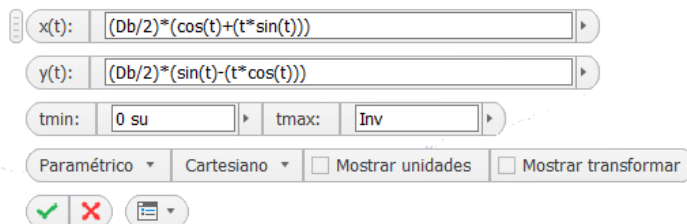
Parámetro	Nombre	Unidad	Valor	Valor	Estado	Valor	Estado	Estado
Z	d168	su	12 su	12,000000	●	12,000000	☐	☐
Dp	d159	mm	7,2 mm	7,200000	●	7,200000	☐	☐
De	d160	mm	8,4 mm	8,400000	●	8,400000	☐	☐
Di	d157	mm	5,7 mm	5,700000	●	5,700000	☐	☐
Db	d158	mm	6,76578687 mm	6,765787	●	6,765787	☐	☐
k	d164	mm	0,0942 mm	0,094200	●	0,094200	☐	☐
L		mm	0,9 mm	0,900000	●	0,900000	☐	☐
d	d163	gr	15 gr	15,000000	●	15,000000	☐	☐
Inv		su	0,7358147835 su	0,735815	●	0,735815	☐	☐

Fuente: Autor.

Se crea un boceto del engranaje con los parámetros generados por Excel®, teniendo en cuenta la ecuación paramétrica de la curva de la involuta la cual es fundamental debido a su papel crucial en el correcto funcionamiento y rendimiento de los dientes del engranaje [4].

Para encontrar el tmax, que es donde se cruza la curva de la involuta con el diámetro exterior, se usa la siguiente ecuación: $\emptyset = \sqrt{\left(\frac{DE}{DB}\right)^2 - 1}$ en donde DE es el diámetro externo y DB el diámetro base.

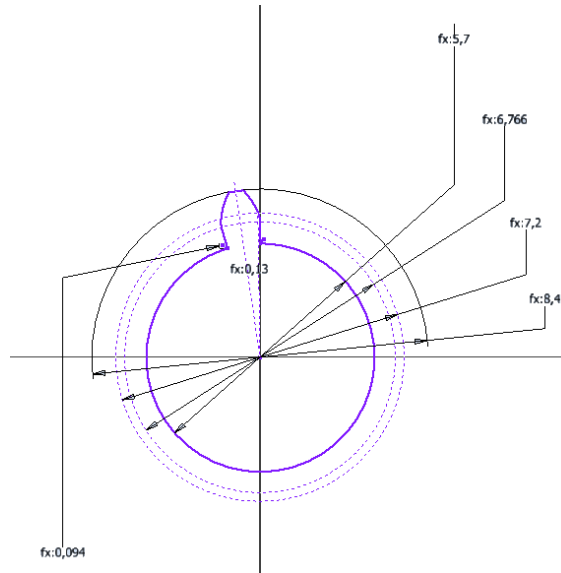
Figura 4. Ecuación paramétrica de la curva de la involuta en AutoDesk Inventor®.



Fuente: Autor.

Boceto parametrizado:

Figura 5. Boceto microengranaje recto usando la herramienta de parámetros.

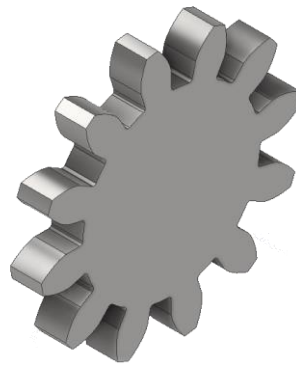


Fuente: Autor.

Al extruir el boceto con el parámetro del ancho de cara (L) y generar un patrón circular con el parámetro del número de dientes (z) se obtiene el siguiente modelo:

(El anexo B muestra el paso a paso para dibujar el modelo).

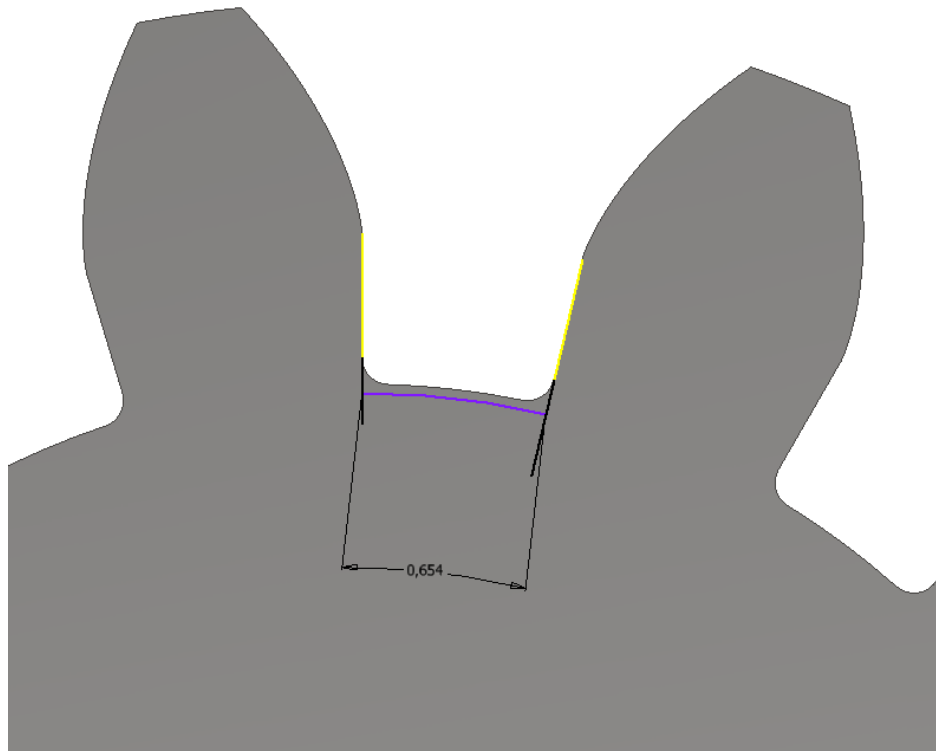
Figura 6. Modelo generado.



Fuente: Autor

Se verifica el vano mínimo buscado:

Figura 7. Verificación vano mínimo $DH < Dv$.



Fuente: Autor.

Se llega a la conclusión de que los datos de entrada que cumplen con $DH < Dv$ son generados por un Módulo estándar de 0.6, 12 dientes y un ángulo de presión estándar de 20° .

4.5 MONTAJE CINEMÁTICO DE UN PAR DE ENGRANAJES

Para realizar un montaje en donde se evidencie que el engranaje es funcional, se concibió fabricar un engranaje par que ofrezca una relación real de 1.916 aproximada a 1:2. Esto se logra variando el número de dientes (z), pero usando el mismo módulo (m) y ángulo de presión (α), con la finalidad de que sus dientes encajen perfectamente entre sí y proporcionen una transmisión suave y eficiente.

4.5.1 Engranaje par

De nuevo usando la hoja de cálculo de Excel®, se cambia el número de dientes y se obtienen los siguientes valores:

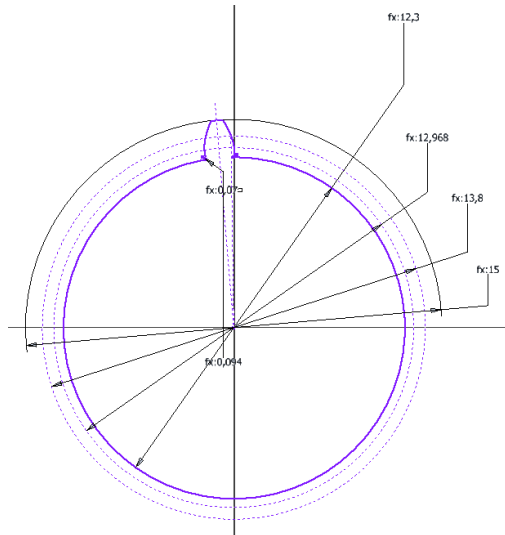
Tabla 3. Cálculos hoja de Excel® con el engranaje recto z23.

VARIABLES DE ENTRADA		
Símbolo	Designacion	Valor
α	Ángulo de presión	20
Z	Número de dientes	23
M	Módulo	0,6
Dp	Diametro primitivo mm	13,8
ha	Addendum mm	0,6
hf	Dedendum mm	0,694
WD	Profundidad total mm	1,294
CL	Holgura mm	0,094
De	Diametro exterior mm	15
Di	Diametro interior mm	12,3
Db	Diametro base mm	12,968
P	Paso circular mm	1,885
	Diametro base (Db)> Diam interior (Di)?	SI
T	Espesor circular diente mm	0,942
ADDc	Espesor de cabeza de diente mm	0,616
WKG	Profundidad de trabajo (WKG) mm	1,2
d	Ángulo del diente °	7,826
L	Ancho de cara mm	0,9
k	Fillet mm	0,094
α (Rad)	Angulo en radianes	0,349

Fuente: Autor.

Se actualizan los parámetros en AutoDesk Inventor® para generar el nuevo boceto y se obtiene el siguiente:

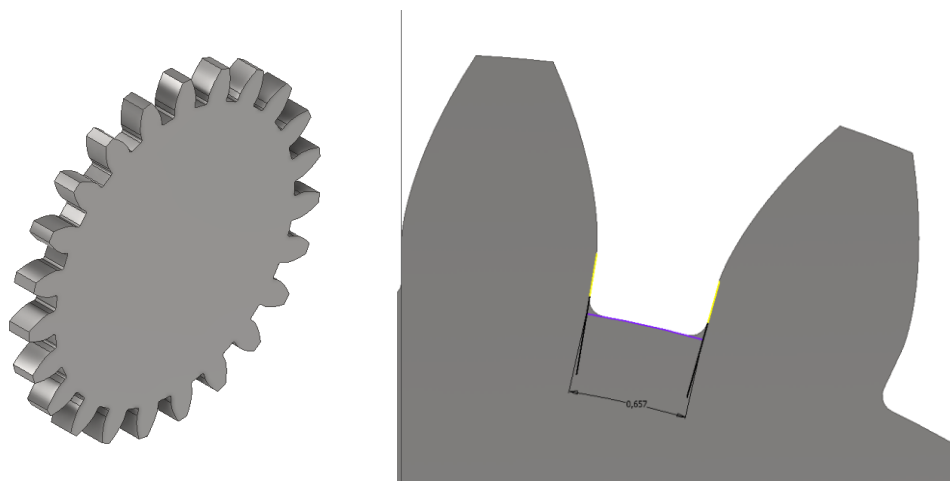
Figura 8. Boceto engranaje par recto z23 usando la herramienta de parámetros.



Fuente: Autor.

Se extruye el boceto, se aplica el patrón circular y se verifica el vano:

Figura 9. Modelo generado y verificación del vano.



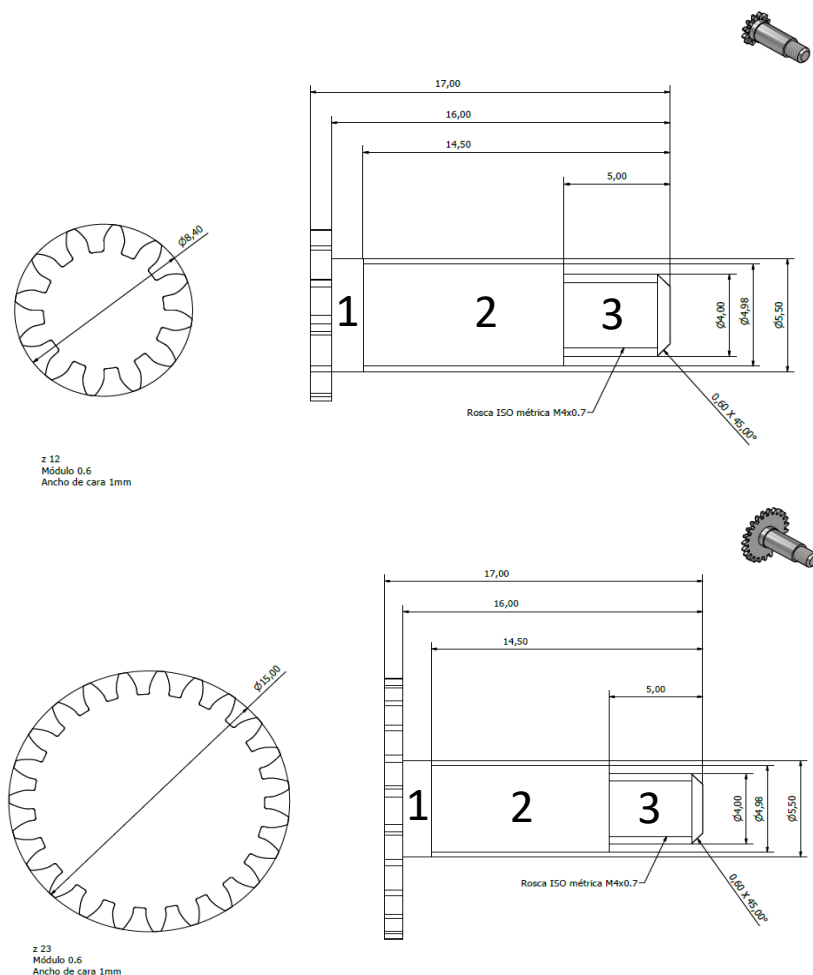
Fuente: Autor.

4.5.2 Eje para engranaje de 12 y 23 dientes

Para proporcionar el soporte y la estabilidad necesarios para mantener los engranajes en su lugar, asegurar que estén alineados adecuadamente (es decir, que sus ejes sean paralelos y que sus dientes estén correctamente engranados) y que mantengan una distancia precisa y exacta entre sí, se diseñó un solo eje común para ambos engranajes.

Este eje está compuesto por 3 secciones: la primera evita que el engranaje roce con la superficie sobre la que va a estar apoyado; la segunda es la encargada de encajar en el agujero del montaje y permitir un deslizamiento suave gracias a la tolerancia deslizante E; y la tercera es una rosca M4x0.7 que evita el movimiento axial, pero sin ajustarse totalmente al montaje permitiendo la rotación. (En el anexo C se muestran los planos para manufactura completos).

Figura 10. Eje para el montaje.



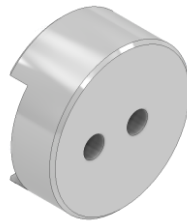
Fuente: Autor.

4.5.3 Soporte

El soporte fue diseñado teniendo en cuenta la distancia entre centros de los engranajes. Para determinar esta distancia, se empleó la fórmula de distancia entre centros, que precisa de los diámetros primitivos de los engranajes ($\frac{Dp+dp}{2}$), lo que garantiza una alineación precisa y adecuada.

El agujero del soporte se planifica con una herramienta de broca para asegurar agujeros precisos de 5 mm de diámetro. Además, el agujero contará con un ajuste H7 según las normas ISO, que proporciona un equilibrio perfecto entre tolerancia y precisión. Este ajuste asegura que el eje encaje de manera adecuada en el soporte y permita un movimiento suave y libre de fricciones.

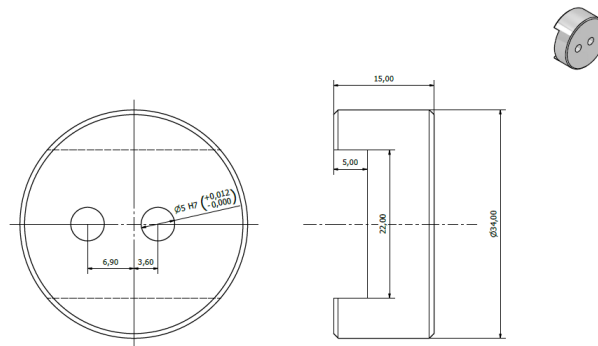
Figura 11. Soporte para el montaje.



Fuente: Autor.

Debido a las características tan especiales de este soporte, será fabricado en el centro de mecanizado de la Universidad y se optó por utilizar duraluminio sobrante del taller, lo que permitió ahorrar costos, reducir el desperdicio y contribuir a la sostenibilidad del proyecto.

Figura 12. Planos para manufactura del soporte.

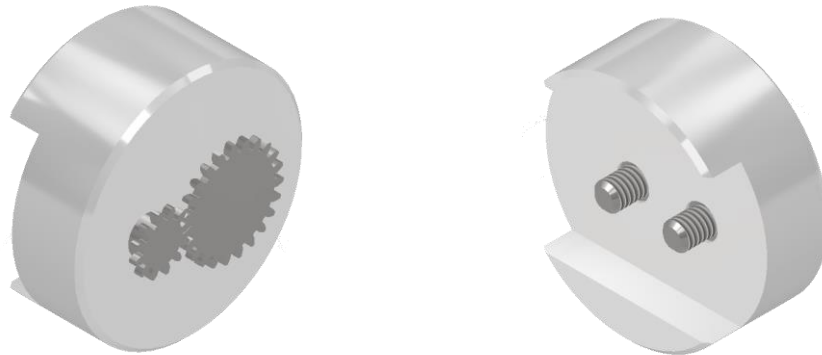


Fuente: Autor.

4.5.4 Ensamblaje

Se lleva a cabo el ensamblaje en AutoDesk Inventor® para verificar que el soporte y los ejes forman un conjunto sólido y bien alineado, esto para asegurar una transmisión de movimiento suave y eficiente del sistema de engranajes.

Figura 13. Ensamblaje del montaje.



Fuente: Autor.

5 PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA

Se planifica el proceso de mecanizado para asegurar que la fabricación de la pieza se lleve a cabo de manera eficiente, precisa y segura. Esta planificación detallada permite definir los pasos específicos que se deben seguir, las herramientas, las velocidades de corte adecuadas y otros parámetros clave.

5.1 TORNO TIPO SUIZO

El torno Diamond 20CSB es un torno CNC tipo suizo diseñado por la empresa Taiwanesa Po Ly Gim. Los tornos CNC de tipo suizo son máquinas altamente especializadas utilizadas en la industria para llevar a cabo el mecanizado de piezas de precisión. Estas máquinas se destacan por su capacidad para producir componentes pequeños y alargados, como tornillos, ejes o componentes electrónicos con una precisión excepcional. Su denominación como "suizo" proviene de su origen en Suiza, donde fueron inicialmente desarrollados para la fabricación de relojes [5].

Figura 14. Po Ly Gim Diamond 20CSB.

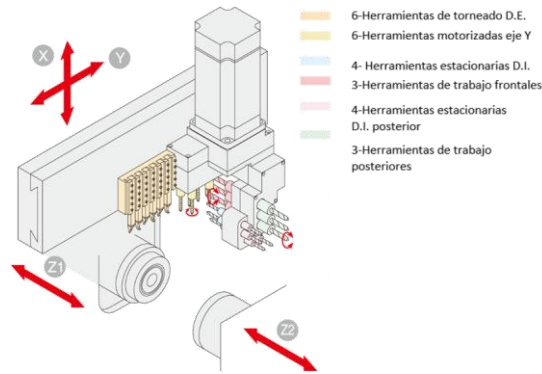


Fuente: [6].

Los tornos CNC de tipo suizo también se destacan por su capacidad de mecanizado simultáneo. Gracias a los cabezales gemelos, estos tornos pueden llevar a cabo operaciones de torneado y fresado de manera simultánea, lo que incrementa la eficiencia del proceso y agiliza la producción de piezas complejas [5].

La tecnología de control numérico computarizado (CNC) es fundamental en estos tornos, permitiendo la programación y supervisión de las operaciones con gran precisión. Gracias a esto, se logra una fabricación de piezas altamente precisa y repetible, asegurando altos estándares de calidad en la producción industrial [5].

Figura 15. Cinemática del torno Suizo Po Ly Gim Diamond 20CSB.



Fuente: [6].

5.2 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para la selección de la materia se optó por el Latón, debido a su fácil maquinabilidad, lo que significa que es fácil de cortar, perforar y dar forma con herramientas de corte. Esta característica se debe a la naturaleza relativamente suave del latón en comparación con otros materiales metálicos, lo que minimiza el desgaste a las herramientas de corte durante el proceso de mecanizado. Es importante tener en cuenta la capacidad máxima del cabezal principal del torno ($\text{Ø}20\text{mm}$), razón por la cual se seleccionó una barra de $\frac{3}{4}$ ".

Figura 16. Barra de latón $\frac{3}{4}$ ".



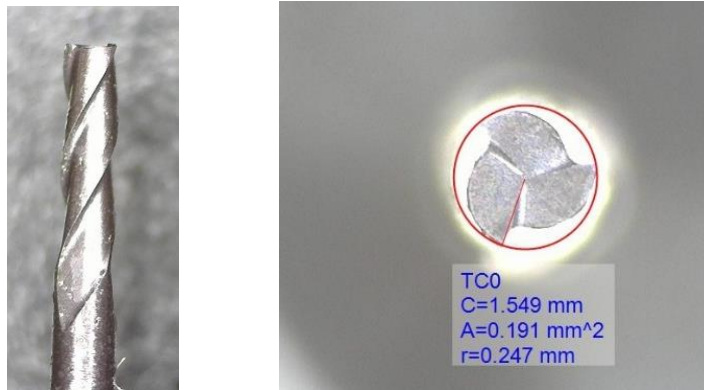
Fuente: Autor.

5.3 HERRAMIENTA

La ISCAR EC-A3 005-015C03E38 es un tipo de fresa punta plana de carburo de tungsteno, con un recubrimiento PVD (Physical Vapor Deposition) de Nitruro de aluminio y titanio (AlTiN) que aumenta su resistencia al desgaste. Adecuada para velocidades de corte medias a altas y diseñada para mecanizar varios materiales como acero, acero inoxidable, titanio y aleaciones resistentes al calor [3].

Esta fresa tiene una configuración de tres filos, lo que se refiere a la cantidad de estrías o surcos en la herramienta. El número de filos afecta la capacidad de corte y la evacuación de virutas durante el proceso de mecanizado.

Figura 17. Herramienta ISCAR EC-A3 vista desde microscopio electrónico.



Fuente: Autor.

Características:

- Línea de productos: ISCAR
- Diámetro: 0.5 mm
- Schacht (Vástago): 3 mm
- Longitud de corte (ap): 1.5 mm
- Longitud total: 38 mm

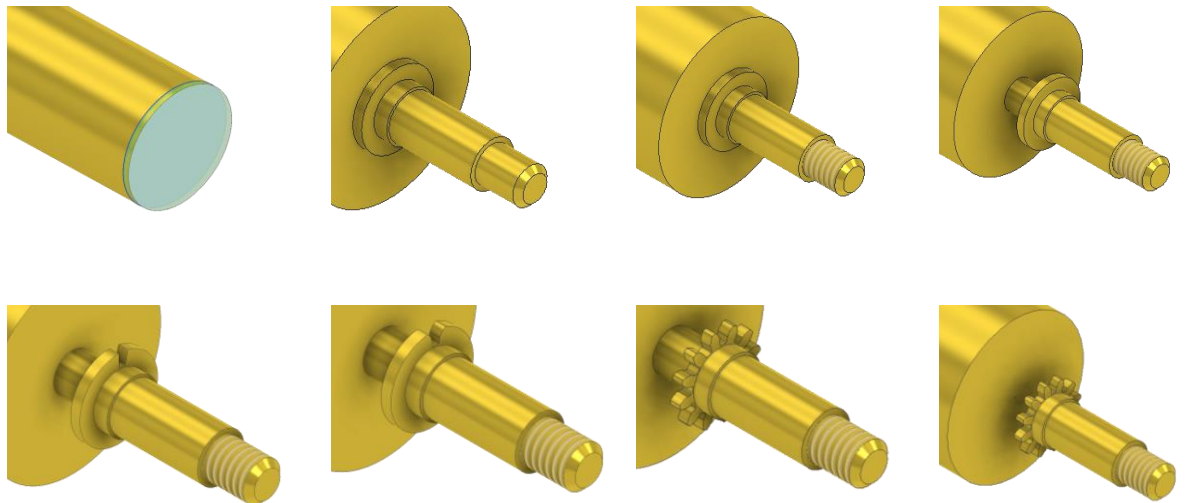
5.4 HOJA DE PROCESOS

La hoja de procesos es un documento detallado en la que se recopila toda la información necesaria de manera organizada y sistemática para llevar a cabo un proceso de mecanizado. En esta hoja se registran los datos como lo son las secuencias de operación, herramienta usada, velocidades de corte, avances, parámetros de control, etc. (El anexo D muestra las hojas de procesos completas).

5.4.1 Proceso de mecanizado eje con engranaje z12

El proceso inicia mediante un refrentado en la materia prima, seguido por un desbaste (G71) que da la forma del eje y un proceso de acabado (G70). Posteriormente, se realiza un roscado M4x0.7 (G76), y un tronzado parcial (G75) para proporcionarle un espacio de trabajo seguro a la fresa ISCAR EC-A3. A continuación, se efectúa un desbaste para crear el valle de los dientes y se les da un acabado a los flancos de este, se procede al fresado de la involuta izquierda y derecha, se repiten estos procesos de fresado 12 veces. Finalmente se tronza completamente la pieza (G75).

Figura 18. Proceso de mecanizado z12.

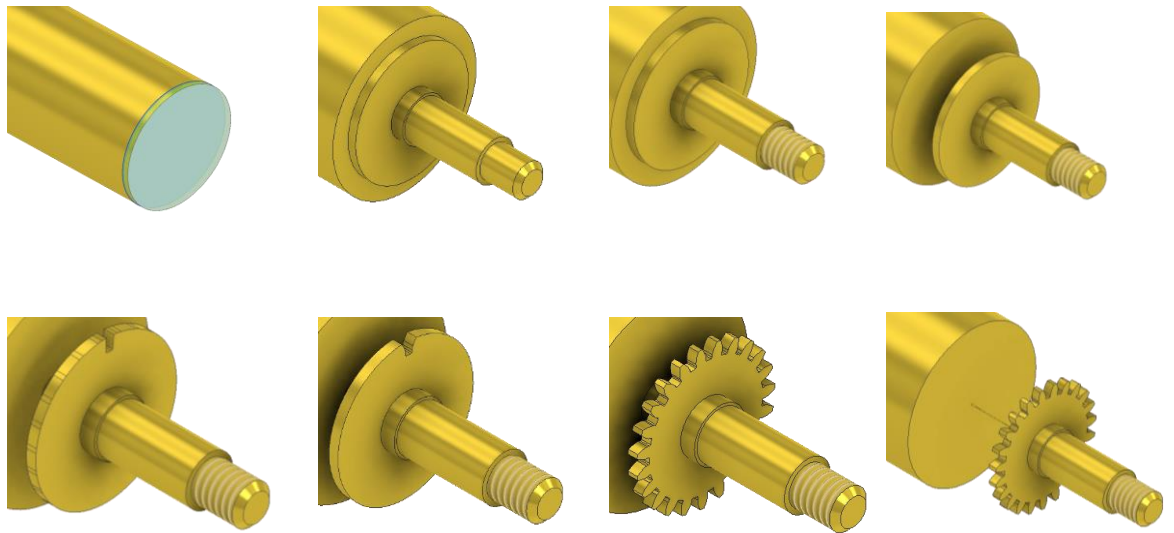


Fuente: Autor.

5.4.2 Proceso de mecanizado eje con engranaje z23

El proceso es similar al mecanizado del primer eje, con la única diferencia en el diámetro del engranaje y la repetición del proceso de fresado que esta vez será de 23 repeticiones.

Figura 19. Proceso de mecanizado z23.

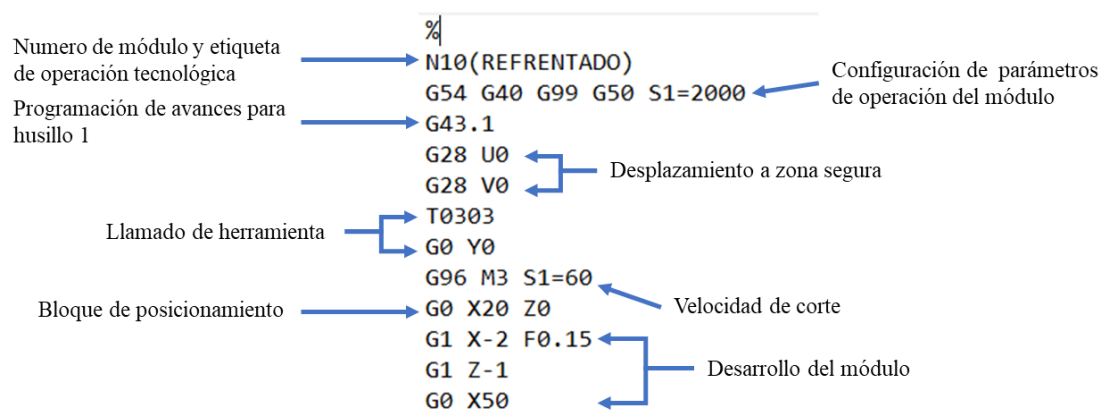


Fuente: Autor.

5.5 GENERACIÓN DE CÓDIGOS G

La generación de códigos G es uno de los aspectos más importantes en la programación de máquinas para mecanizado. Estos códigos G, también conocidos como comandos preparatorios [6], desempeñan un papel fundamental al guiar el movimiento, la velocidad y la funcionalidad de la máquina durante el proceso de mecanizado. Cada código G tiene una función específica, como establecer sistemas de coordenadas, definir movimientos y velocidades, o activar funciones auxiliares (El anexo “” muestra la programación completa).

Figura 20. Estructura básica de un programa.



Fuente: Autor.

Código G: Los códigos G en la programación del torno suizo Po Ly Gim indican funciones geométricas. G54 se refiere a un sistema de coordenadas, en este caso, el sistema 1. G40 cancela la compensación de radio, G99 establece el avance por revolución en mm/min, G50 se utiliza para limitar la velocidad de rotación del husillo a un valor específico, G43.1 determina el modo de control del primer husillo, G96 activa la velocidad constante del husillo y define la velocidad del husillo [6].

En el ejemplo, también se pueden ver los códigos G específicos de posicionamiento. G0 se utiliza para movimientos rápidos entre puntos sin mecanizado, mientras que G1 se utiliza para movimientos controlados con interpolación lineal, G28 U0 y G28 V0 indican que la herramienta se mueve a la posición de referencia segura y G0 Y0 coloca la herramienta en la posición Y=0 [6].

Código T: El código T se refiere al número de herramienta. En el ejemplo proporcionado, T0303 indica que se está utilizando la herramienta 03.

Código M: Los códigos M se refieren a funciones auxiliares. M3 se utiliza para encender el husillo en sentido horario, M5 se utiliza para detener el husillo, y el código M30 se utiliza para finalizar el programa completo de mecanizado y apagar el husillo.

Código S: Son los encargados de indicar la velocidad del husillo. Por ejemplo, S1=2000 establece la velocidad del husillo en 2000 RPM.

Código F: Son los que especifican la velocidad de avance en unidades por minuto, puede ser mm/min o in/min, esto dependerá si se usan los códigos G99 o G98.

5.5.1 Cálculo de las velocidades de avance

El cálculo de las velocidades de avance desempeña un rol fundamental en la etapa de planificación y ejecución de procesos de mecanizado. Estas velocidades determinan la tasa a la cual la herramienta se desplaza a lo largo de la pieza durante el proceso de corte, torneado o fresado. Este cálculo es crucial no solo para garantizar la calidad y la precisión de las piezas mecanizadas, sino también para maximizar la eficiencia del proceso y la vida útil de las herramientas. Un cálculo inadecuado puede resultar en una eliminación de material insuficiente, lo que lleva a un mecanizado deficiente, o en una eliminación excesiva de material, que puede afectar negativamente la integridad de la pieza y causar un desgaste prematuro de las herramientas.

Figura 21. Ecuaciones parámetros de corte.

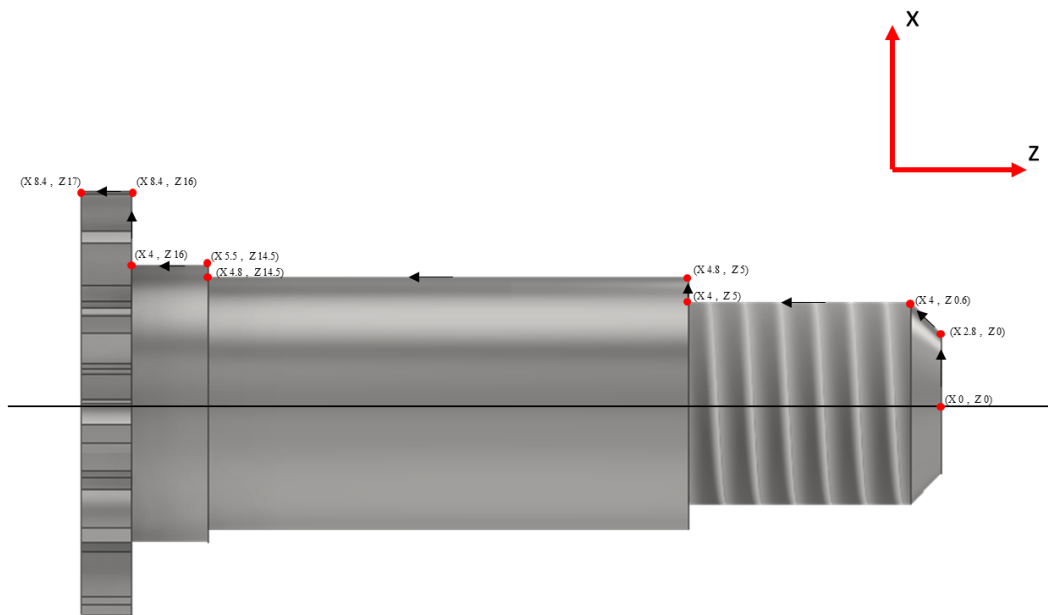
Velocidad de corte	$Vc = \frac{\pi * \emptyset * n}{1000}$	Vc = Velocidad de corte (m/min) π = Constante circular
Velocidad de husillo	$n = \frac{Vc * 1000}{\pi * \emptyset}$	\emptyset = Diámetro herramienta (mm) n = Velocidad de husillo (m/min)
Avance	$F = n * Fz * Z$	F = Avance (mm/min)
Avance por diente	$Fz = \frac{F}{n * Z}$	Fz = Avance por diente (mm/diente) Z = Numero de filos

Fuente: Autor.

5.5.2 Programación manual del proceso de torneado

La programación manual del proceso de torneado en el torno suizo Po Ly Gim se basa en el uso de coordenadas cartesianas. Estas coordenadas cartesianas en la programación de torneado determinan cómo se desplaza la herramienta de corte en los planos X, Y, Z.

Figura 22. Coordenadas cartesianas del eje.



Fuente: Autor.

En la figura 22 se representan los puntos cartesianos por donde la herramienta se desplaza a lo largo del proceso de mecanizado, y la flecha entre estos puntos indica la dirección del movimiento de la herramienta, que es programada siguiendo un plano cartesiano en el que el eje X indica la posición vertical y el eje Z indica la posición horizontal.

Figura 23. Código programado siguiendo coordenadas cartesianas para realizar el desbaste del eje.

```
N20(DESBASTE)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0303
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z-1
G71 U1.5 R0.5 F0.15
G71 P21 Q22 U0.2 W0.1
N21 G0 X0
G1 Z0
G1 X2.8
G1 X4 Z0.6
G1 Z5
G1 X4.98
G1 Z14.5
G1 X5.5
G1 Z16
G1 X8.40
G1 Z17
N22 X20
G0 X50
```

Fuente: Autor.

Es importante tener en cuenta que en los tornos tipo suizo, solo se planifica mecanizar la mitad de la pieza, pues gracias a la rotación en el husillo, se logra una simetría perfecta en el proceso de corte.

5.5.3 Programación con MATLAB del proceso de fresado de los dientes del engranaje

El aplicativo Helical Gear G-Code Generator fue Desarrollado por el grupo de investigación GEAMEC en julio de 2022 y se utiliza para generar códigos G para el fresado de engranajes cilíndricos rectos y helicoidales en el centro de mecanizado vertical con cuarto eje de movimiento con el que cuenta la universidad.

El programa utiliza la derivada de la ecuación paramétrica de la involuta para generar una serie de puntos que representan la trayectoria de la herramienta. Estos puntos se generan en el sistema de coordenadas cartesianas, pero luego se transforman al sistema de coordenadas cilíndrico para que puedan ser utilizados por un torno. Los puntos de la trayectoria representan la posición de la herramienta en el plano de rotación del engranaje. La herramienta se mueve a lo largo de esta trayectoria para tallar el perfil del diente.

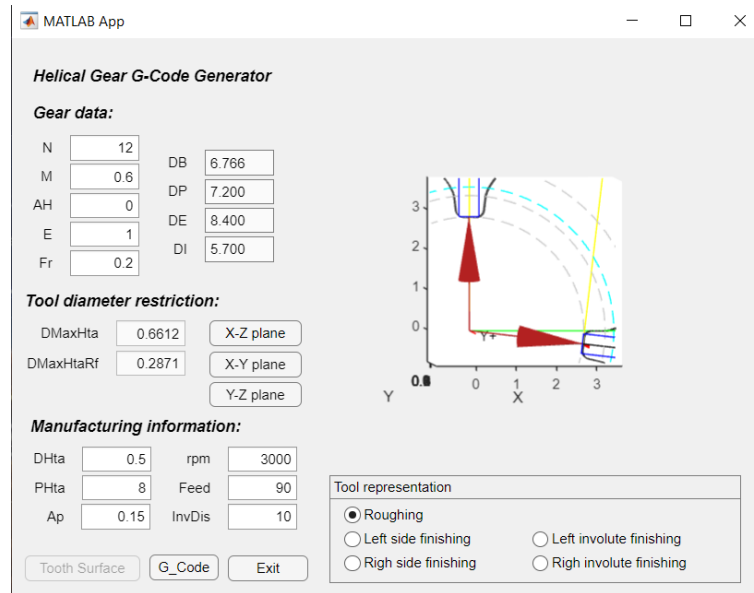
Figura 24. Representación gráfica aproximada de las posiciones de la herramienta con respecto a la involuta.



Fuentes: Autor.

La ventana principal del aplicativo en MATLAB® le solicita al usuario ingresar datos clave del engranaje, como el número de dientes (N), el módulo del engranaje (M), el ángulo de hélice (AH , siempre y cuando el usuario desee manufacturar un engranaje helicoidal), el ancho de cara del engranaje (E), y el radio de entalle (Fr). Así como también la información de manufactura, como el diámetro de la herramienta (DH_{ta}), el slot en el que se encuentra la herramienta (PH_{ta}), la profundidad de corte para el proceso de desbaste (Ap), el número de rpm deseados para el husillo (rpm), el avance de la herramienta expresado en mm/min (Feed), y el número de pasadas para tallar el perfil de la involuta, el número de pasadas influye en la precisión del perfil de la involuta (InvDis) [7]. Una vez ingresados estos datos, al presionar el botón "Tooth Surface", el algoritmo realiza cálculos para determinar los diámetros de base, primitivo, externo e interno, presentando los resultados al usuario.

Figura 25. Panel principal del programa Helical Gear G-Code Generator con los datos del engranaje modulo 0.6.



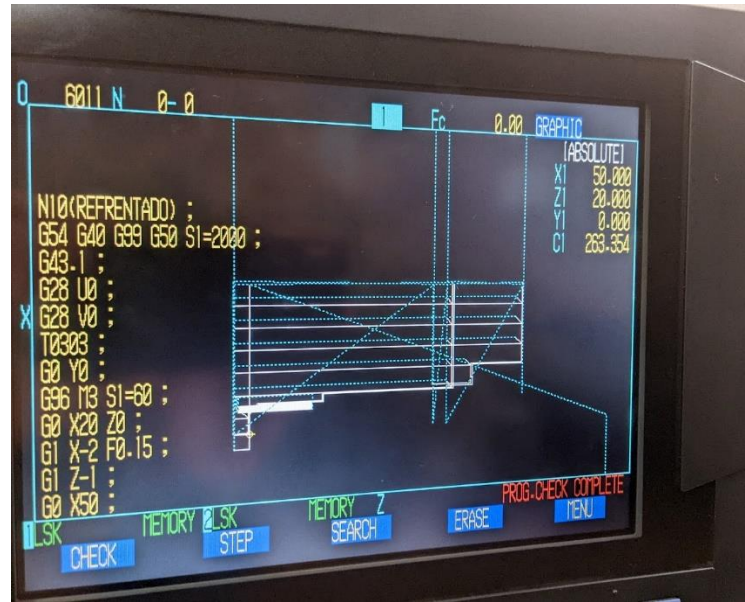
Fuentes: Autor.

Para adaptar el aplicativo al torno tipo suizo utilizado en la universidad, se realizaron modificaciones significativas en el código original. Esto incluyó ajustes en los sistemas de coordenadas para que fueran compatibles con el torno tipo suizo y cambios en los parámetros de entrada para cumplir con los requisitos específicos de la máquina. (En el anexo E se muestran los códigos completos).

5.5.4 Verificación de trayectorias

A través de la función "Check" en el panel SFG del torno, se habilita una revisión minuciosa de las rutas que la herramienta seguirá durante el mecanizado. Esta simulación previa es clave para asegurar la integridad del proceso, prevenir posibles colisiones y evitar daños a la herramienta, la pieza y la máquina en general. Dicho chequeo permite corroborar el código programado, verificar que las trayectorias están correctamente definidas y que el mecanizado se llevará a cabo sin incidentes.

Figura 26. Verificación de trayectorias para el programa del eje.



Fuente: Autor.

6 FABRICACIÓN DE MICROENGRANAJE

Una vez que se ha completado y verificado meticulosamente la planificación del proceso de manufactura se sientan las bases para dar paso a la etapa de fabricación.

6.1 MONTAJE Y COMPENSACIÓN DE HERRAMIENTA

El montaje de la herramienta ISCAR EC-A3 en el torno resultó ser una de las tareas más complejas debido a la posición en el que se encuentran los slots para las herramientas motorizadas de eje Y, lo cual dificulta e incómoda el proceso para el montaje.

Esta herramienta se ubicó en el slot 8, al apretar la herramienta para asegurarla en su lugar, tiende a subir de su posición original, lo que implica que debe bajarse manualmente al punto de referencia de la materia prima. Este proceso se realiza a ojo, lo que lo hace sumamente complicado, especialmente porque la herramienta es muy pequeña y delicada. Por razones de seguridad y para evitar daños a la herramienta, se debe llevar a cabo este ajuste con extrema precaución y cuidado.

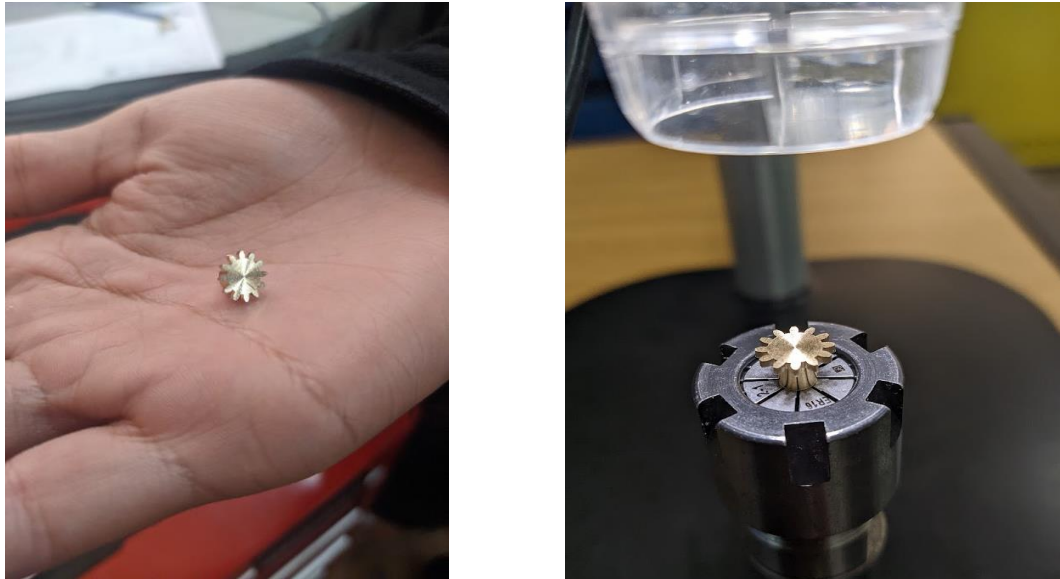
Figura 27. Herramienta ISCAR montada en el Slot 8.



Fuente: Autor.

Para el proceso de compensación de la herramienta, se llevó a cabo el mecanizado de un engranaje experimental, con el propósito de examinarlo en un microscopio y tomar fotografías de alta precisión.

Figura 28. Engranaje módulo 0.6 experimental.

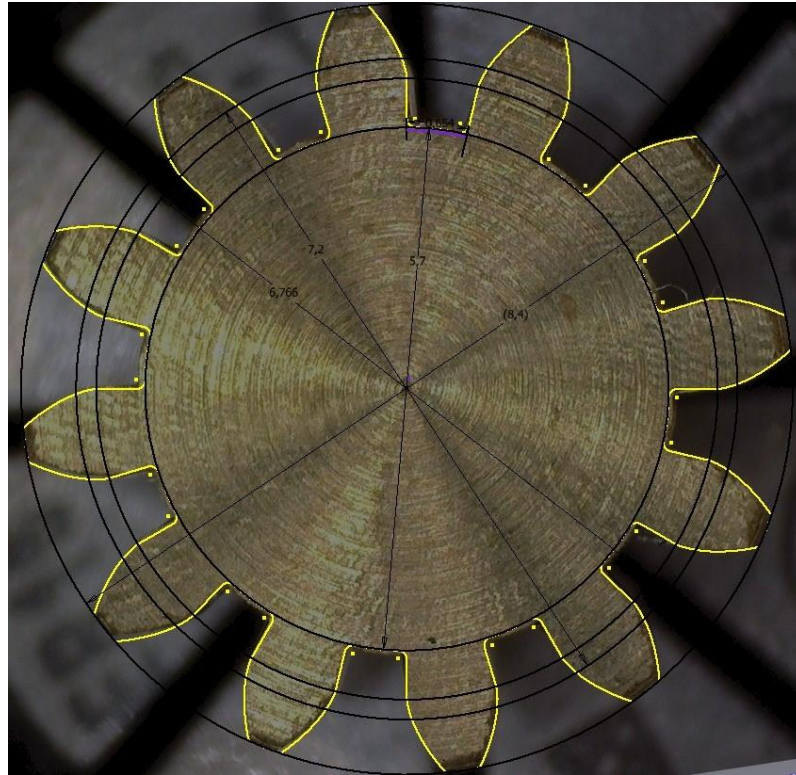


Fuente: Autor.

Estas imágenes obtenidas en el microscopio fueron superpuestas con el boceto previamente generado en AutoDesk Inventor®. Esta superposición de imágenes tiene dos propósitos principales.

El primero es verificar si la geometría del engranaje cumple con las especificaciones deseadas. Al comparar las imágenes del microscopio con el boceto, se puede confirmar si la forma y los detalles del engranaje se ajustan adecuadamente a lo planificado en el diseño. Y la segunda es que esta superposición permite medir cualquier desfase entre el boceto y la imagen del microscopio, especialmente en la zona del diámetro interior del engranaje. Estas mediciones son fundamentales para determinar las compensaciones necesarias en la herramienta y garantizar que la mecanización futura sea precisa y acorde a los requerimientos de diseño.

Figura 29. Superposición de la imagen obtenida en el microscopio.



Fuente: Autor.

Se observó un pequeño desfase de aproximadamente 0.166 mm entre el boceto y las imágenes del microscopio. Posteriormente, se introdujo este resultado en el panel de compensación del torno, específicamente para bajar 0.166 mm la herramienta ubicada en el slot 8.

6.2 TIEMPO DE FABRICACIÓN

El proceso de mecanizado de cada diente con la fresa que incluye el desbaste, acabado de los flancos izquierdo y derecho, así como los 10 movimientos de la involuta izquierda y derecha, toma aproximadamente 115 segundos. Basándonos en este tiempo de mecanizado, podemos calcular el tiempo total necesario para fabricar el conjunto completo de engranajes con 12 y 23 dientes.

- Tiempo total para los 12 dientes = 12 dientes * 115 segundos/diente = 1380 segundos \approx 23 minutos.
- Tiempo total para los 23 dientes = 23 dientes * 115 segundos/diente = 2645 segundos \approx 44 minutos.

Por otro lado, el tiempo de mecanizado para cada eje que incluye el refrentado, desbaste, acabado, roscado y tronzado, es de aproximadamente 3 minutos. Con esta información, podemos calcular el tiempo total para producir el conjunto completo de engranajes y su respectivo eje:

- Tiempo total de fabricación eje con engranaje de 12 dientes \approx 26 minutos.
- Tiempo total de fabricación eje con engranaje de 23 dientes \approx 47 minutos.

6.3 RESULTADO

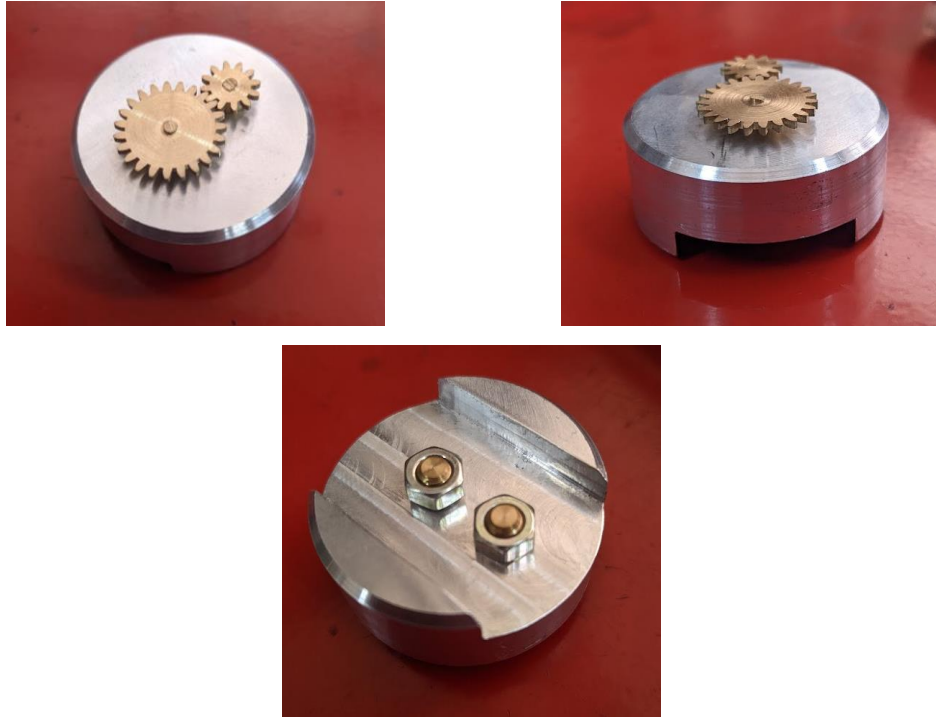
Tras completar el minucioso proceso de manufactura, y ensamblar todas las partes se obtuvo el resultado final:

Figura 30. Resultado del proceso de mecanizado.



Fuente: Autor.

Figura 31. Ensamblaje del montaje cinemático.



Fuente: Autor.

Figura 32. Montaje cinemático bajo microscopio.



Fuente: Autor.

7 RECOMENDACIONES

- La opción de la curva paramétrica en el software de AutoDesk Inventor® es solo una línea de cálculos, para extruir bocetos con esta opción hay que crear proyectar la geometría sobre un plano de trabajo.
- Realizar diferentes simulaciones en el panel de verificación de trayectorias antes de ejecutar el programa.
- Verificar que la materia prima no tenga desviaciones pronunciadas, pues pueden generar vibraciones no deseadas al momento de girar el cabezal de torno causando imprecisiones en las geometrías finales y afectar la calidad del engranaje.
- Ajustar las velocidades de corte pues una velocidad demasiado alta puede causar desgaste prematuro de la herramienta, rotura o un acabado superficial deficiente.

8 CONCLUSIONES

- Se logró la producción eficiente de microengranajes mediante una planificación meticulosa del proceso de mecanizado en tornos CNC tipo suizo.
- Se evidenció la viabilidad de la fabricación de microengranajes en tornos CNC tipo suizo, considerando las limitaciones de la maquinaria disponible.
- Se identificó la necesidad de herramientas de mecanizado con diámetros más pequeños para la producción de microengranajes aún más diminutos, lo que abre oportunidades para futuros proyectos.
- Se aportó conocimiento sobre la planificación y el mecanizado de microengranajes en tornos CNC tipo suizo
- Se estableció una base para investigaciones futuras en el área de microfabricación, con miras a la producción de componentes cada vez más pequeños y precisos.

9 BIBLIOGRAFÍA

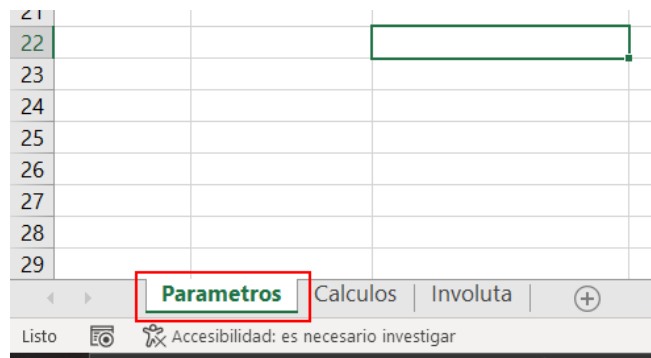
- [1] Sandvik., “Fabricación de engranajes.” Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/gear-manufacturing>
- [2] Instituto Alemán de Normalización (DIN)., “Norma DIN 3960: Concepts and parameter associated with cylindrical gears and cylindrical gear pairs with involute teeth.” 1980.
- [3] ISCAR, “Iscar SolidMill EC-A3.” Accessed: Aug. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.iscar.com/Ecatalog/Family.aspx?fnum=1955&mapp=ML&app=75>
- [4] S. C. Chacón, “Engranajes cilíndricos curva involuta,” Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2019.
- [5] Modern Machine Shop., “¿Por qué usar torneado tipo suizo?” Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.mms-mexico.com/articulos/por-que-usar-torneado-tipo-suizo>
- [6] Po Ly Gim, “PO LY GIM Swiss Type CNC Auto Lathe Diamond II&III SERIES Maintenance Manual.” 2002.
- [7] Grupo de investigación GEAMEC, “Helical Gear G-Code Generator.” Bogotá, Jul. 2022.
- [8] Bertoline Wiebe, *Dibujo en Ingeniería y Comunicación Gráfica*, Segunda Edición. 1999.

ANEXO A INTEGRACIÓN AUTODESK INVENTOR® CON EXCEL®

Una vez que se ha completado y perfeccionado la hoja de cálculo en Excel®, esta se integra con el software Autodesk Inventor® para poder usar la herramienta parámetros. Para lograr esta integración entre la hoja de cálculo diseñada para engranajes de dientes rectos y Autodesk Inventor®, se precisa de los siguientes pasos:

- 1) Crear una hoja nueva dentro del archivo de Excel® que contiene los cálculos, esta obligatoriamente tiene que estar ubicada en la primera posición.

Figura 33. Hoja parámetros.



Fuente: Autor.

- 2) Traer de la hoja de cálculos las celdas que contienen los resultados que se van a necesitar para el dibujo del boceto (obligatoriamente ubicar el primer resultado en la celda A1). En la primera columna debe seleccionarse una letra que identifique el parámetro, la segunda columna son los resultados que se trajeron de la hoja de cálculos, y la tercera columna su unidad. (Guardar el archivo).

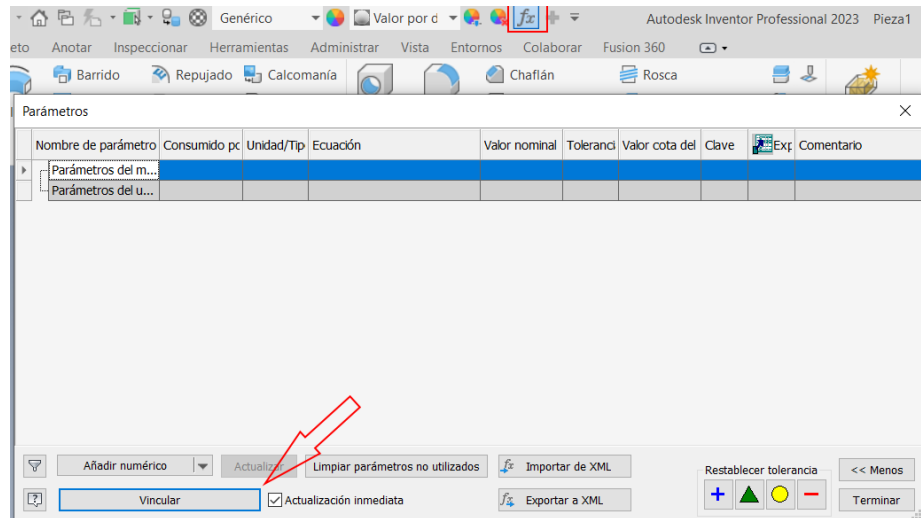
Figura 34. Parámetros.

	A	B	C
1	Z	12	su
2	Dp	7,2	mm
3	De	8,4	mm
4	Di	5,7	mm
5	Db	6,76578687	mm
6	k	0,0942	mm
7	L	0,9	mm
8	d	15	°
9	Inv	0,735814783	su

Fuente: Autor.

- 3) Abrir Autodesk Inventor®, y crear un nuevo Standard (mm).ipt . Una vez creado abrir la opción de parámetros que se encuentra en la parte central superior. Y vincular el archivo con la hoja de cálculos de Excel®. (Buscar el Archivo de la hoja de cálculos de Excel y hacer clic en aceptar).

Figura 35. Vinculación de la hoja de Excel® con Inventor.



Fuente: Autor.

- 4) Comprobar que los datos que están en la hoja de parámetros de Excel® sean los mismos que en la herramienta de parámetros de Autodesk Inventor® y dar clic en terminar.

Figura 36. Parámetros Autodesk Inventor®.

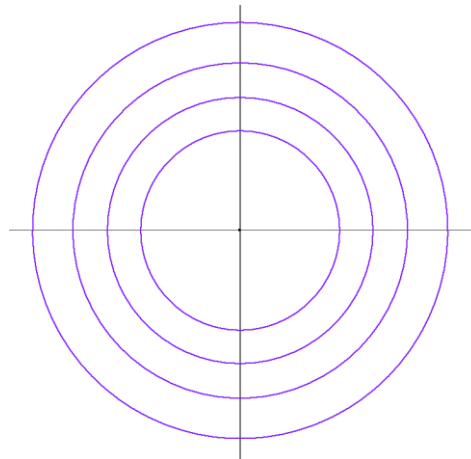
Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tolerancia	Valor cota del	Clave	Exp	Comentario
Parámetros del m...									
Parámetros del u...									
C:\Users\jhofr\D...									
Z		su	12 su	12,000000	●	12,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dp		mm	7,2 mm	7,200000	●	7,200000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
De		mm	8,4 mm	8,400000	●	8,400000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Di		mm	5,7 mm	5,700000	●	5,700000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Db		mm	6,76578687 mm	6,765787	●	6,765787	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
k		mm	0,0942 mm	0,094200	●	0,094200	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
L		mm	0,9 mm	0,900000	●	0,900000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d		gr	15 gr	15,000000	●	15,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Inv		su	0,7358147835 su	0,735815	●	0,735815	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Fuente: Autor.

ANEXO B MÉTODO DE DIBUJO ENGRANAJE CILÍNDRICO RECTO

Se siguen los pasos del método de dibujo que se encuentran en el libro “Dibujo en Ingeniería y Comunicación Gráfica 2ed” [8]. Este libro explica cómo dibujar paso a paso un engranaje cilíndrico recto basado en la norma DIN 3960 [2]. Crear un nuevo boceto en el plano de preferencia y dibujar 4 círculos (No importan sus diámetros).

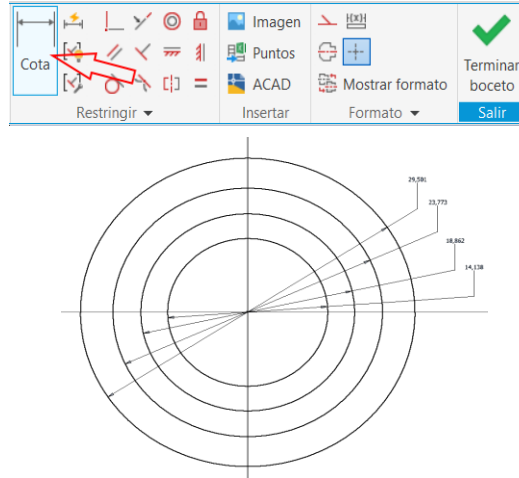
Figura 37. Círculos De, Di, Db, Dp.



Fuente: Autor.

- 1) Hacer clic en la función de cota general, y crear una cota para cada uno de estos círculos.

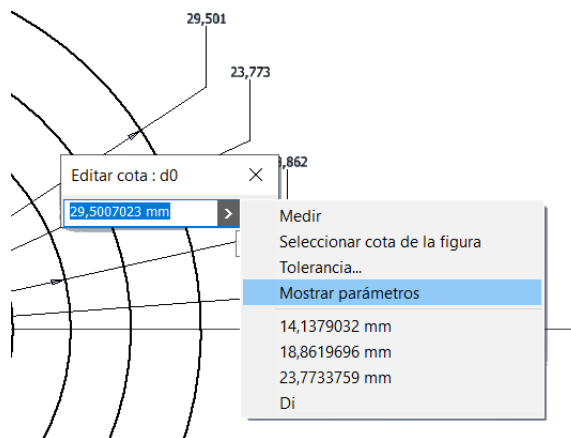
Figura 38. Cotas De, Di, Db, Dp.



Fuente: Autor.

- 2) Al hacer doble clic sobre cualquier cota se despliega el menú de editar cota, en este menú se encuentra la opción mostrar parámetros.

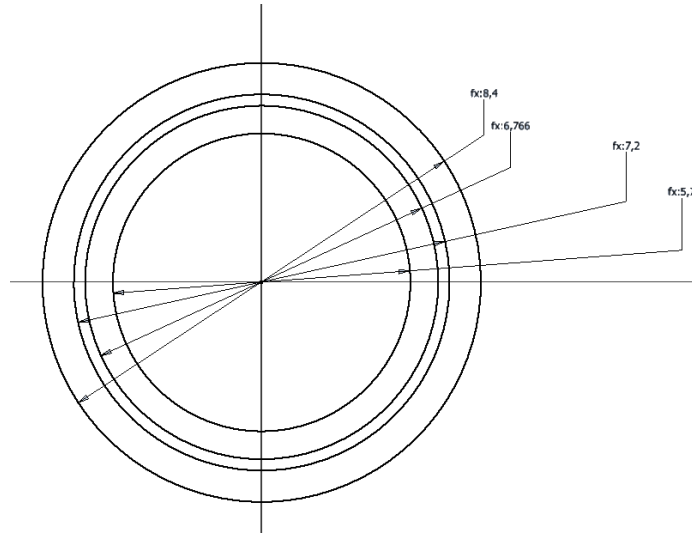
Figura 39. Menú editar cota.



Fuente: Autor.

- 3) Seleccionar el parámetro deseado, en este caso para cada círculo se escoge un parámetro de los diámetros D_e , D_i , D_b y D_p . Y automáticamente se le asigna a la cota el valor que tenga programado el parámetro (fx:). Para más comodidad convertir los diámetros D_p y D_b en cotas de construcción.

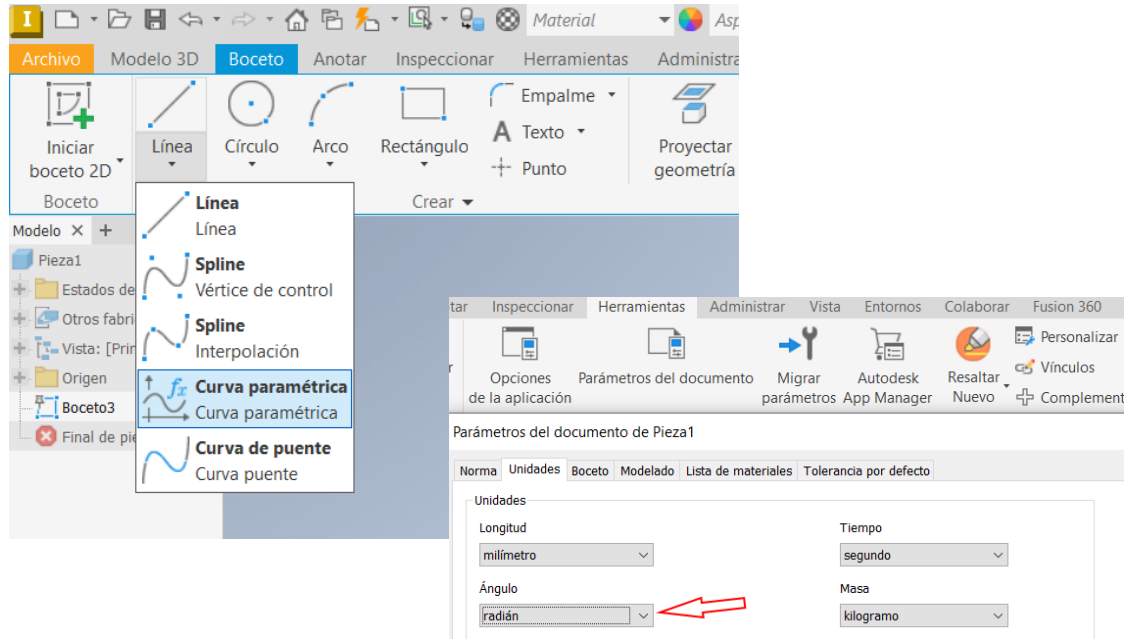
Figura 40. Parámetros aplicados.



Fuente: Autor.

- 4) Para crear la curva de la involuta se selecciona la opción de “curva paramétrica” (Importante que en los parámetros del documento las unidades de ángulo estén en radianes).

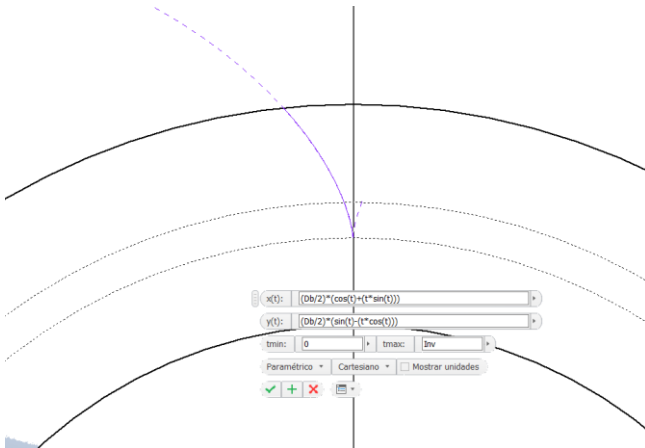
Figura 41. Curva paramétrica Autodesk Inventor®.



Fuente: Autor.

- 5) En el panel que se abre escribir las ecuaciones de la curva de la involuta X ; Y. Para tmax seleccionar el parámetro de Inv el cual fue explicado en el título 4.4.

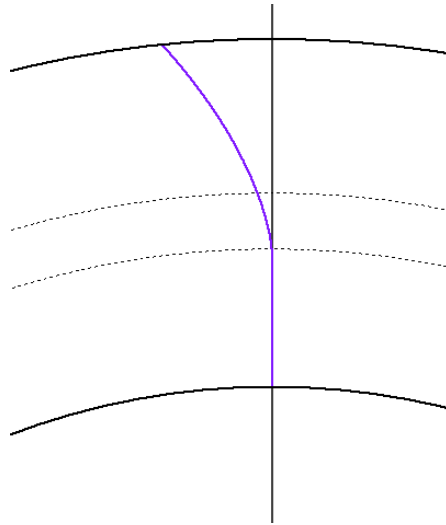
Figura 42. Ecuación paramétrica de la curva de la involuta.



Fuente: Autor.

- 6) Crear una línea que una el Diámetro interno (D_i) con la curva de la involuta (Asegurarse que la línea quede fijada a la involuta y no al diámetro base (D_b)).

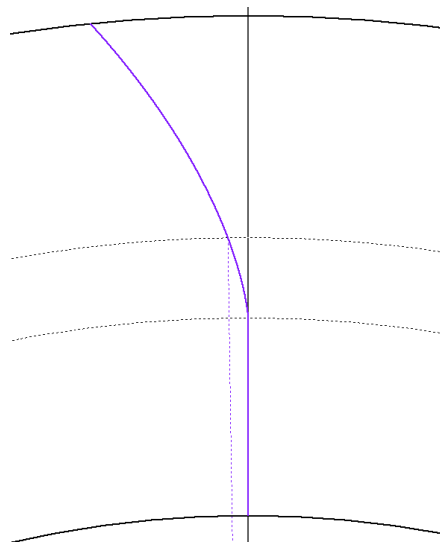
Figura 43. Flanco.



Fuente: Autor.

- 7) Desde el centro de los círculos crear una línea que se conecte al punto en donde se intercepta la involuta con el diámetro perimetral (D_p) y volverla una línea de construcción.

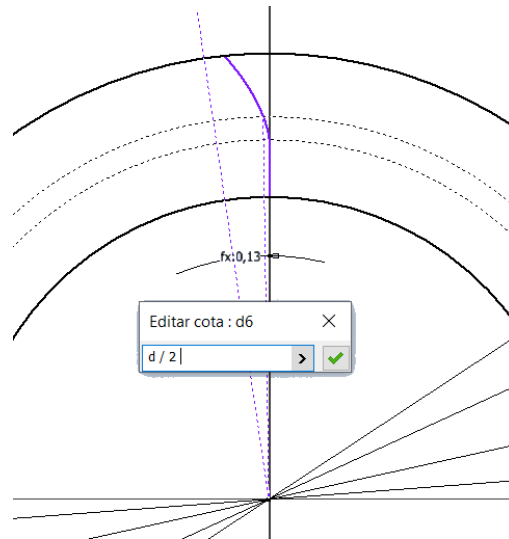
Figura 44. línea guía para espesor del diente.



Fuente: Autor.

- 8) Crear otra línea de construcción desde el centro, con la opción de cota crear un ángulo entre estas 2 líneas de construcción y asignarle el parámetro del ángulo del diente. Importante que esté dividido entre 2.

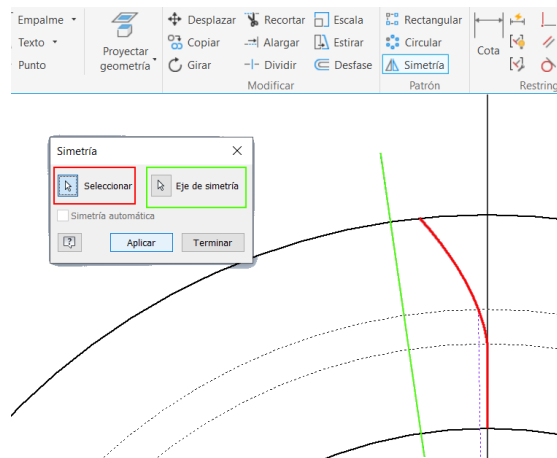
Figura 45. Ángulo del diente.



Fuente: Autor.

- 9) Con la opción de simetría, seleccionar la involuta y la línea que la conecta con el Diámetro interior (Di). Luego seleccionar la segunda línea de construcción que se creó con el ángulo como eje de simetría y aplicar.

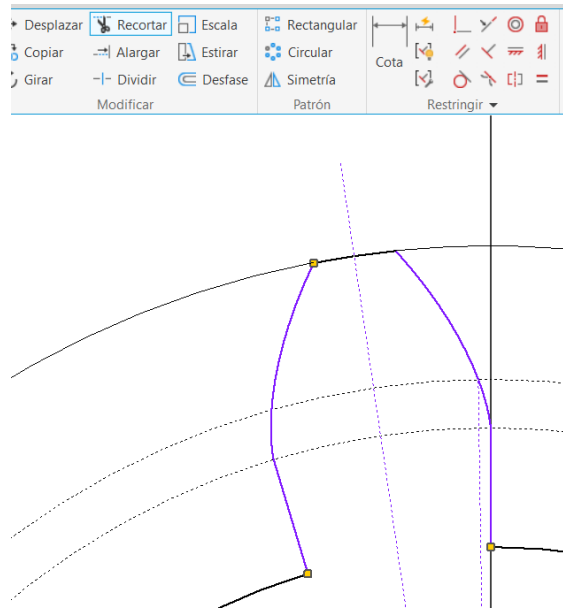
Figura 46. Simetría para crear el perfil del diente.



Fuente: Autor.

10) Con la opción recortar, se eliminan las líneas que ya no se necesitan para así poder obtener el perfil del diente y terminar el boceto.

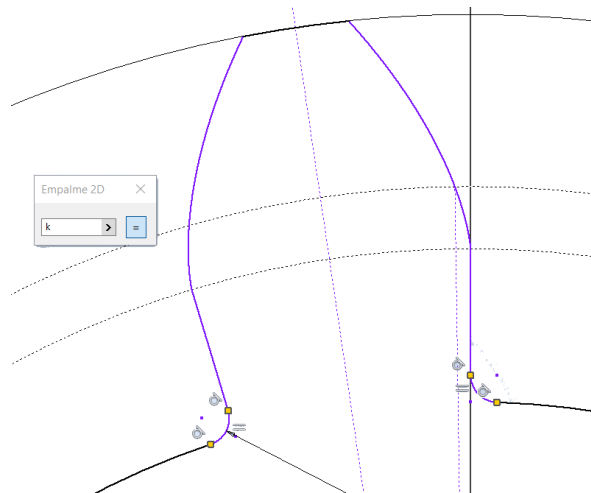
Figura 47. Perfil del diente.



Fuente: Autor.

11) Con la opción empalme se crean los radio redondeos de la raíz del diente. Se selecciona el parámetro de dicho redondeo.

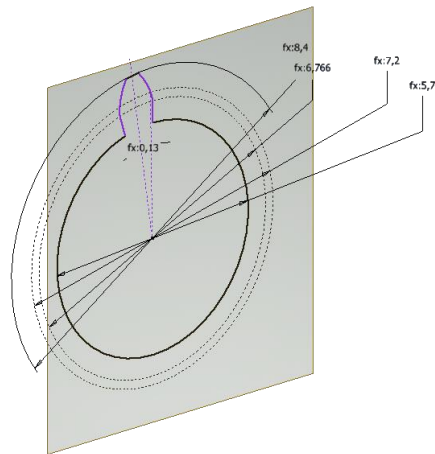
Figura 48. Radio redondeos de la raíz del diente.



Fuente: Autor.

- 12) La opción de la curva paramétrica es solo una línea de cálculos, lo que significa que no se puede extruir. Para solucionar este problema se crea un plano de trabajo sobre el plano de preferencia que se haya escogido en el paso 1.

Figura 49. Plano de trabajo.



Fuente: Autor.

- 13) Sobre el plano de trabajo se crea un nuevo boceto, y con la opción de proyectar geometría se proyecta el perfil del engranaje.

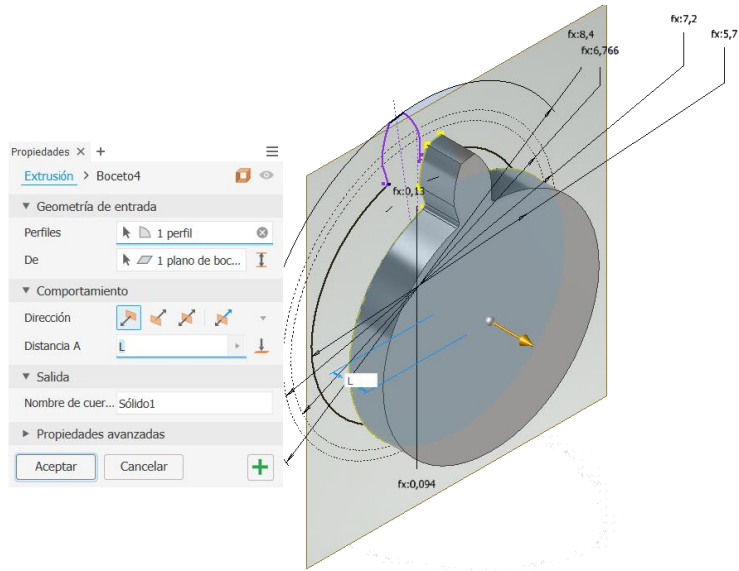
Figura 50. Proyección del perfil del diente en el plano de trabajo.



Fuente: Autor.

- 14) Se extruye el boceto proyectado en el plano de trabajo, y para la distancia de extrusión se selecciona el parámetro del ancho de cara.

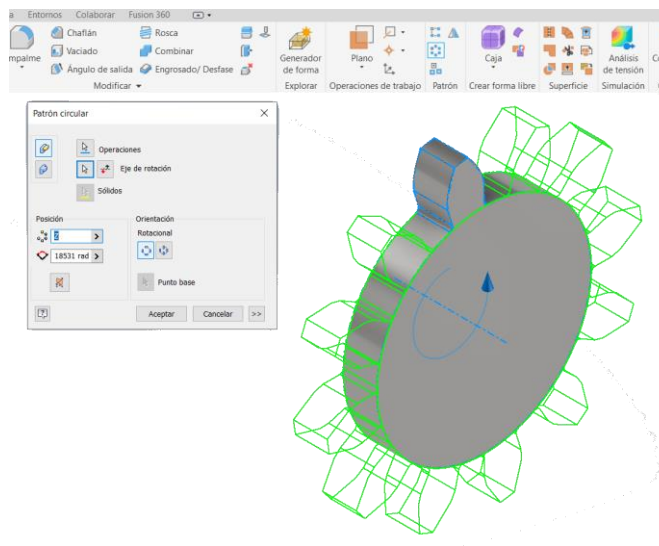
Figura 51. Extrusión del perfil del engranaje.



Fuente: Autor.

- 15) Con la opción de patrón circular, se selecciona la operación del diente, alrededor del eje de rotación con el parámetro del número de dientes. Y de esta forma se finaliza.

Figura 52. Patrón circular.

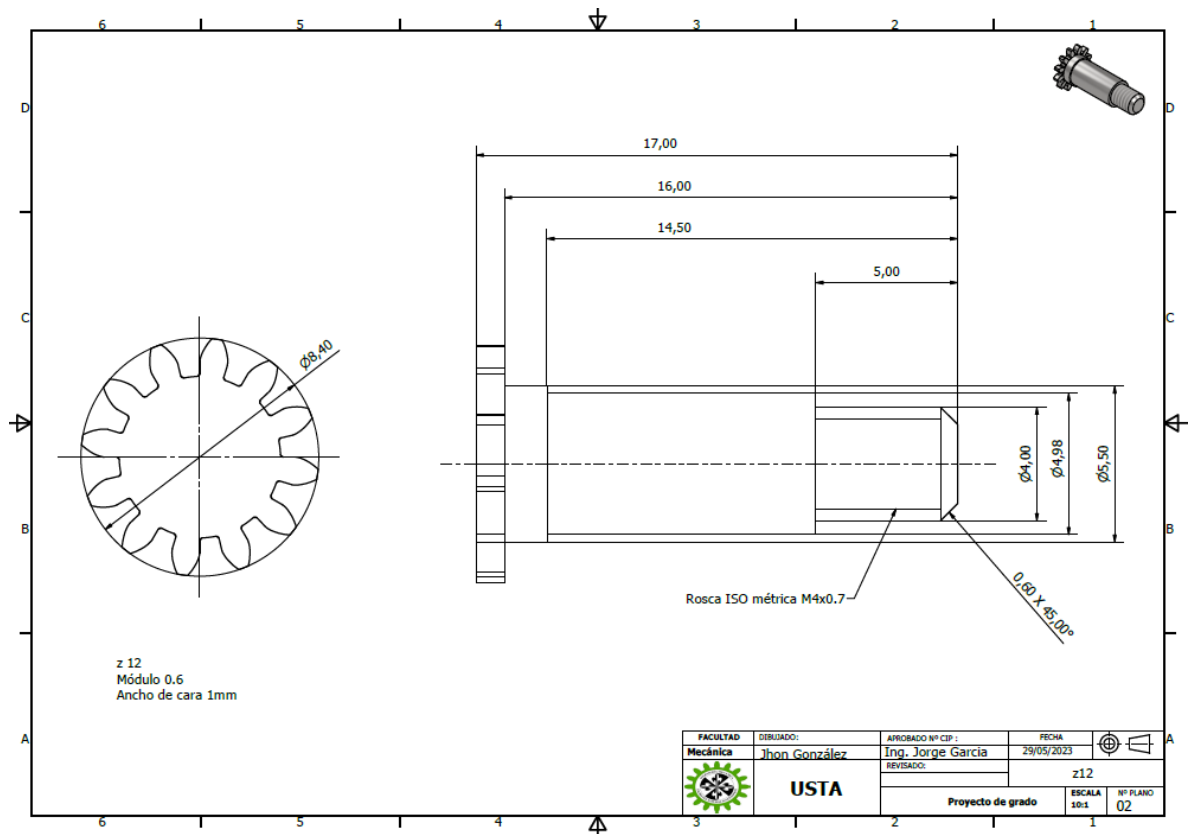


Fuente: Autor.

ANEXO C PLANOS PARA MANUFACTURA

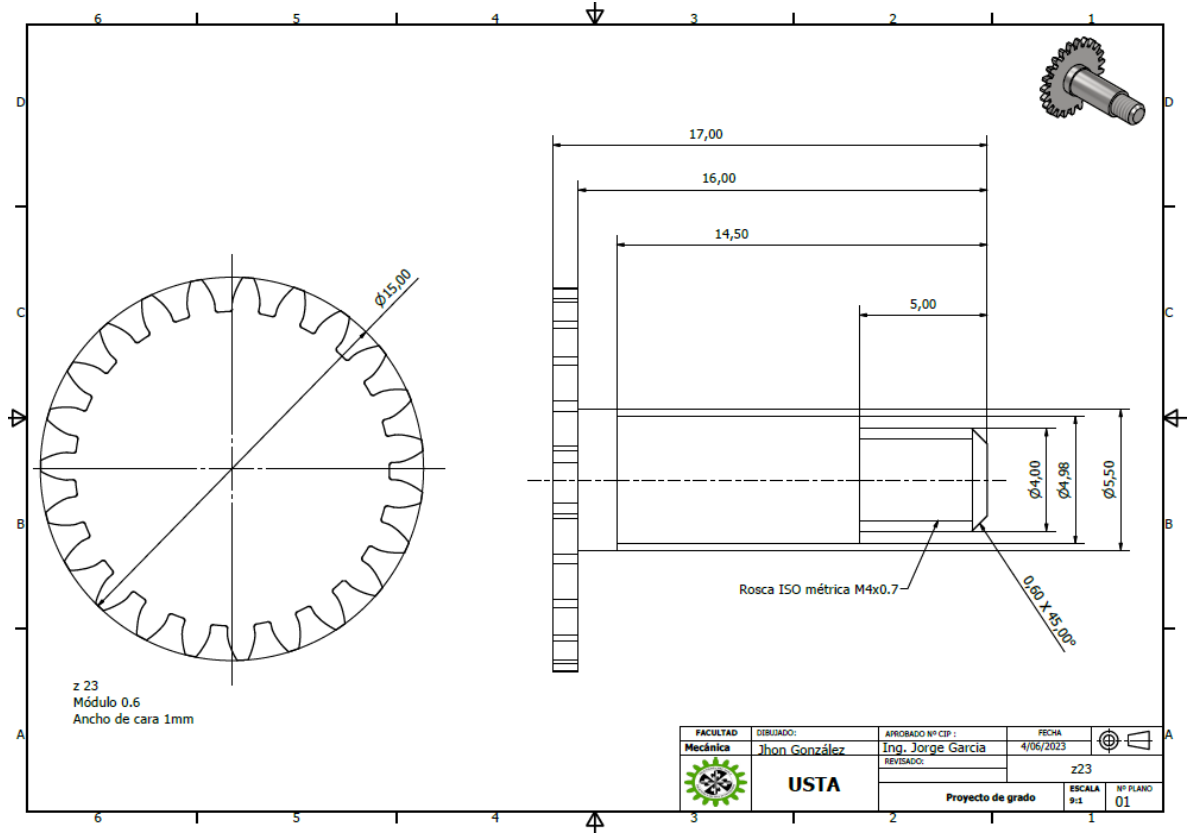
En este anexo se presentan los planos detallados destinados a guiar el proceso de manufactura. Estos planos proporcionan una referencia visual que sirve como guía para el mecanizado de las piezas.

Figura 53. Planos detallados para manufactura eje z12.



Fuente: Autor.

Figura 54. Planos detallados para manufactura eje z23.



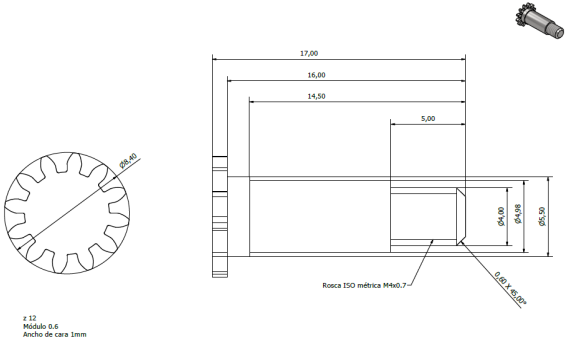
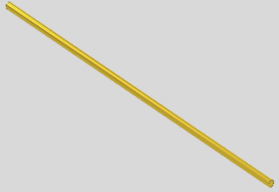


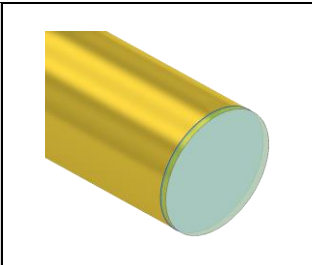
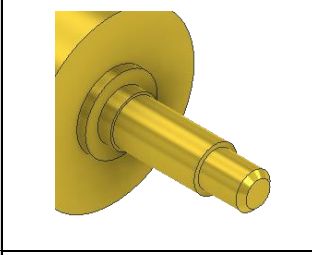
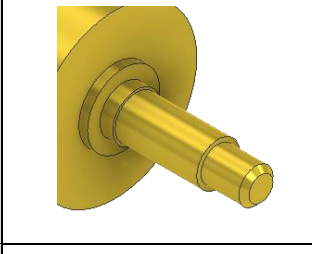
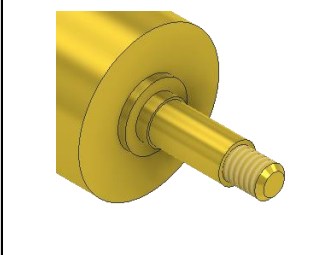
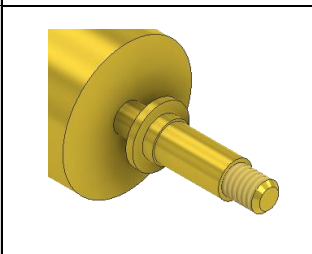
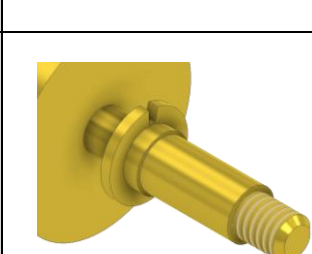
Fuente: Autor.

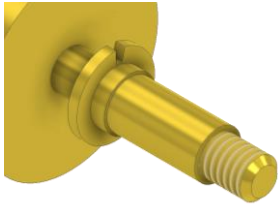
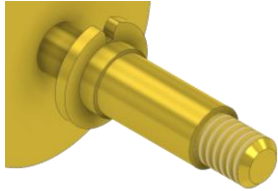
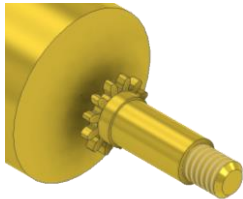
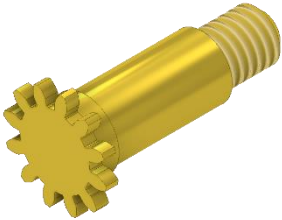
ANEXO D HOJAS DE PROCESOS

En este anexo se presentan las 2 hojas de procesos completas.

Tabla 4. Hoja de procesos eje z12.



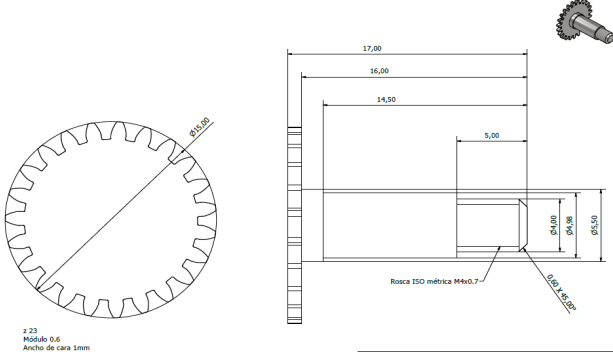

Material: Latón.		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Manufactura eje z12</p> 		<p style="text-align: right;">Jhon F. González Ardila.</p>			
Material en bruto(mm): Ø19.05x1000				<p style="text-align: right;">Fecha: 15/07/2023</p>			
Universidad Santo Tomás		IMPLEMENTACION DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE UN MICROENGRANAJE POR MEDIO DE MICROFRESADO		Facultad de Ingeniería Mecánica			
Máquina		Torno tipo Suizo Poly Gim Diamond 20CSB					
 <p style="text-align: center;">z 12 Módulo 0.6 Ancho de cara 1mm</p> <p style="text-align: center;">Rosca ISO métrica M4x0.7 0.6 x 0.52</p>							
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Vf (mm/min)	Nº RPM	Ap(mm)
	1.1	Pieza en bruto		PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR			

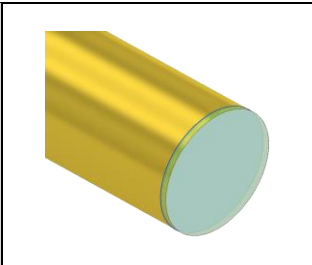
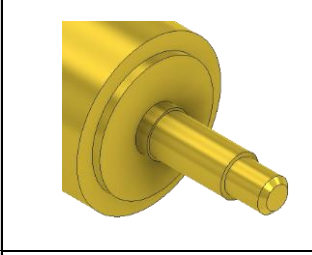
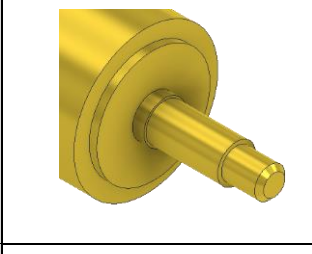
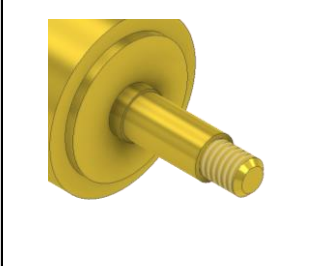
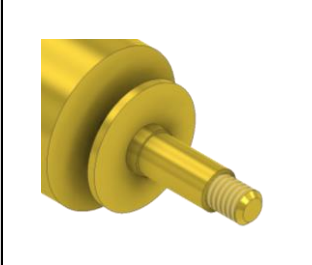
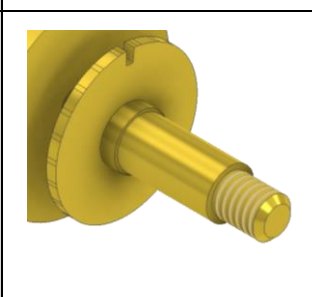
<u>1.2</u>	Refrentado.		Herramienta N°: 0303 Inserto para desbaste Mitsubishi.	0.15	60	0.5
<u>1.3</u>	Desbaste eje G71.		Herramienta N°: 0303 Inserto para desbaste Mitsubishi.	0.15	60	1.5
<u>1.4</u>	Acabado superficial al G70.		Herramienta N°: 0404 Inserto para acabados superficiales Mitsubishi.	0.03	60	0.2
<u>1.5</u>	Roscado M4x0.7 G76.		Herramienta N°: 0505 Inserto para roscados Vargus.	0.7	500	0.48
<u>1.6</u>	Tronzado parcial G75.		Herramienta N°: 0101 Inserto para tronzados.	0.05	50	0.5
<u>1.7</u>	Desbaste valle de los dientes del engranaje.		Herramienta N°: 0808 Fresa punta plana ISCAR EC-A3 Diámetro: 0.5mm 3 filos.	90	3000	0.15

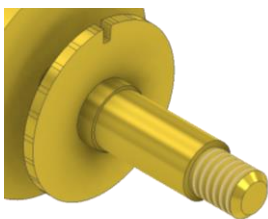
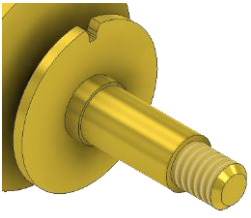
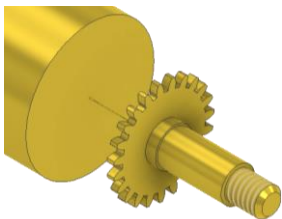
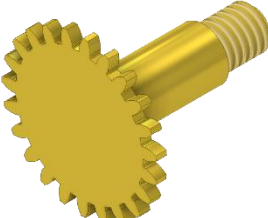
<u>1.8</u>	Acabado flancos izquierdo y derecho.		Herramienta N°: 0808 Fresa punta plana ISCAR EC-A3 Diámetro: 0.5mm 3 filos.	90	3000	
<u>1.9</u>	Fresado de la curva de la involuta.		Herramienta N°: 0808 Fresa punta plana ISCAR EC-A3 Diámetro: 0.5mm 3 filos.	90	3000	
<u>1.10</u>	Tronzado final G75.		Herramienta N°: 0101 Inserto para tronzados.	0.05	50	0.5
<u>1.11</u>	Pieza final.					

Fuente: Autor.

Tabla 5. Hoja de procesos eje z23.

Material: Latón.		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Manufactura eje z23</p> 		<u>Jhon F. González Ardila.</u>			
Material en bruto(mm): Ø19.05x1000				Fecha: 15/07/2023			
Universidad Santo Tomás		IMPLEMENTACION DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE UN MICROENGRANAJE POR MEDIO DE MICROFRESADO		Facultad de Ingeniería Mecánica			
Máquina		Torno tipo Suizo Poly Gim Diamond 20CSB					
 <p style="text-align: center; font-size: small;">z 23 Módulo 0.6 Ancho de cara 1mm</p>							
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Vf (mm/min)	Nº RPM	Ap(mm)
	1.1	Pieza en bruto		PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR			

<u>1.2</u>	Refrentado.		Herramienta N°: 0303 Inserto para desbaste Mitsubishi.	0.15	60	0.5
<u>1.3</u>	Desbaste eje G71.		Herramienta N°: 0303 Inserto para desbaste Mitsubishi.	0.15	60	1.5
<u>1.4</u>	Acabado superficial al G70.		Herramienta N°: 0404 Inserto para acabados superficiales Mitsubishi.	0.03	60	0.2
<u>1.5</u>	Roscado M4x0.7 G76.		Herramienta N°: 0505 Inserto para roscados Vargus.	0.7	500	0.48
<u>1.6</u>	Tronzado parcial G75.		Herramienta N°: 0101 Inserto para tronzados.	0.05	50	0.5
<u>1.7</u>	Desbaste valle de los dientes del engranaje.		Herramienta N°: 0808 Fresa punta plana ISCAR EC-A3 Diámetro: 0.5mm 3 filos.	90	3000	0.15

<u>1.8</u>	Acabado flancos izquierdo y derecho.		Herramienta N°: 0808 Fresa punta plana ISCAR EC-A3 Diámetro: 0.5mm 3 filos.	90	3000	
<u>1.9</u>	Fresado de la curva de la involuta.		Herramienta N°: 0808 Fresa punta plana ISCAR EC-A3 Diámetro: 0.5mm 3 filos.	90	3000	
<u>1.10</u>	Tronzado final G75.		Herramienta N°: 0101 Inserto para tronzados.	0.05	50	0.5
<u>1.11</u>	Pieza final.					

Fuente: Autor.

ANEXO E CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN

En este anexo, se encuentran completos todos los códigos CNC programados para los procesos de mecanizado.

1) Programa 6011 (Eje z12)

```
%;  
N10 (REFRENTADO)  
G54 G40 G99 G50 S1=2000  
G43.1  
G28 U0  
G28 V0  
T0303  
G0 Y0  
G96 M3 S1=60  
G0 X20 Z0  
G1 X-2 F0.15  
G1 Z-1  
G0 X50  
  
N20 (DESBASTE)  
G54 G40 G99 G50 S1=2000  
G43.1  
G28 U0  
G28 V0  
T0303  
G0 Y0  
G96 M3 S1=60  
G0 X20 Z-1  
G71 U1.5 R0.5 F0.15  
G71 P21 Q22 U0.2 W0.1  
N21 G0 X0  
G1 Z0  
G1 X2.8  
G1 X3.95 Z0.6  
G1 Z5  
G1 X4.98  
G1 Z14.5  
N22 X20  
G0 X50  
  
N30 (ACABDO)  
G54 G40 G99 G50 S1=2000  
G43.1  
G28 U0
```

G28 V0
T0404
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z-1
G41
G70 P21 Q22 F0.03
G0 X50

N40 (ROSCADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0505
G0 Y0
G97 M3 S1=500
G0 X5 Z-1
G76 P020560 Q0.05 R0.01
G76 X3.04 Z4.2 P0.48 Q0.1 F0.7
G0X50

N50 (DESBASTE)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0303
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z13
G71 U1.5 R0.5 F0.15
G71 P51 Q52 U0.2 W0.1
N51 G0 X5.5
G1 Z16
G1 X8.40
G1 Z20
N52 X20
G0 X50

N60 (ACABADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0404
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z14
G41
G70 P51 Q52 F0.03
G0 X50

N70 (TRONZADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0101
G0 Y0
G96 M3 S1=50
G0 X20 Z20
G75 R0.5 F0.05
G75 X4 P0.5
G0 X50
M5
M30
%

2) Programa 6012 (Tallado del engranaje z12)

%
(UNIVERSIDAD SANTO TOMAS)
(FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA)
(18-Jul-2023)
(MANUFACTURA DE MICRO-ENGRANAJE CILINDRICO)
G54 G17 G98 G50 S3=2500
G43.1
M92
G28 U0
G28 V0 M5
M90
T0808
G0 Y0
G97 M103 S3=3000
G0 Y0
#100=12
#101=0
#102=30
N10 #101=#101+1

(DESBASTE)

G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X8.400
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X8.100
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400

G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X7.800
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X7.500
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X7.200
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X6.900
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X6.600
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X6.300
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X6.000
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 C-96.646
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X5.700
G1 Z17.500 C-96.646 F90
G0 X12.400
G0 X48.4

(ACABADO FLANCO IZQUIERDO)

G0 C-90.000
G0 Y0.250 Z17.500
G0 X5.687
G1 Z15.500 C-90.000 F90
G0 X48.400

(ACABADO FLANCO DERECHO)

G0 C-103.2921
G0 Y-0.250 Z15.500
G0 X5.687
G1 Z17.500 C-103.292 F90
G0 X48.400

(ACABADO INVOLUTA IZQUIERDA)

G0 C-85.784
G0 Y0.499 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-85.784 F90
G0 X12.400
G0 C-81.568
G0 Y0.748 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-81.568 F90
G0 X12.400
G0 C-77.352
G0 Y0.997 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-77.352 F90
G0 X12.400
G0 C-73.136
G0 Y1.246 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-73.136 F90
G0 X12.400
G0 C-68.920
G0 Y1.495 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-68.920 F90
G0 X12.400
G0 C-64.705
G0 Y1.744 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-64.705 F90
G0 X12.400
G0 C-60.489
G0 Y1.992 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-60.489 F90
G0 X12.400
G0 C-56.273
G0 Y2.241 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-56.273 F90
G0 X12.400
G0 C-52.057
G0 Y2.490 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-52.057 F90

G0 X12.400
G0 C-47.841
G0 Y2.739 Z17.500
G0 X5.766
G1 Z15.500 C-47.841 F90
G0 X12.400

(ACABADO INVOLUTA DERECHA)

G0 C-107.508
G0 Y-0.499 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-107.508 F90
G0 X12.400
G0 C-111.724
G0 Y-0.748 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-111.724 F90
G0 X12.400
G0 C-115.940
G0 Y-0.997 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-115.940 F90
G0 X12.400
G0 C-120.156
G0 Y-1.246 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-120.156 F90
G0 X12.400
G0 C-124.372
G0 Y-1.495 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-124.372 F90
G0 X12.400
G0 C-128.588
G0 Y-1.744 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-128.588 F90
G0 X12.400
G0 C-132.803
G0 Y-1.992 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-132.803 F90
G0 X12.400
G0 C-137.019
G0 Y-2.241 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-137.019 F90
G0 X12.400
G0 C-141.235
G0 Y-2.490 Z15.500
G0 X5.766

```
G1 Z17.500 C-141.235 F90
G0 X12.400
G0 C-145.451
G0 Y-2.739 Z15.500
G0 X5.766
G1 Z17.500 C-145.451 F90
G0 X12.400
```

```
IF [#101EQ#100]GOTO30
G0 C#102
G50 C0
GOTO10
```

```
N30 M105
M92
M30
%
```

3) Programa 6013 (Eje z23)

```
%
N10 (REFRENTADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0303
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z0
G1 X-2 F0.15
G1 Z-1
G0 X50
```

```
N20 (DESBASTE)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0303
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z-1
G71 U1.5 R0.5 F0.15
G71 P21 Q22 U0.2 W0.1
N21 G0X0
G1 Z0
G1 X2.8
G1 X3.95 Z0.6
G1 Z5
G1 X4.98
```

G1 Z14.5
N22 X20
G0 X50

N30 (ACABDO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0404
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z-1
G41
G70 P21 Q22 F0.03
G0 X50

N40 (ROSCADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0505
G0 Y0
G97 M3 S1=500
G0 X5 Z-1
G76 P020560 Q0.05 R0.01
G76 X3.04 Z4.2 P0.48 Q0.1 F0.7
G0 X50

N50 (DESBASTE)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0303
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z13
G71 U1.5 R0.5 F0.15
G71 P51 Q52 U0.2 W0.1
N51 G0 X5.5
G1 Z16
G1 X15
G1 Z20
N52 X20
G0 X50

N60 (ACABADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0

G28 V0
T0404
G0 Y0
G96 M3 S1=60
G0 X20 Z14
G41
G70 P51 Q52 F0.03
G0 X50

N70 (TRONZADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0101
G0 Y0
G96 M3 S1=50
G0 X20 Z20
G75 R0.5 F0.05
G75 X4 P0.5
G0 X50
M5
M30
%

4) Programa 6014 (Tallado engranaje z23)

%
(UNIVERSIDAD SANTO TOMAS)
(FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA)
(18-Jul-2023)
(MANUFACTURA DE MICRO-ENGRANAJE CILINDRICO)
G54 G17 G98 G50 S3=2500
G43.1
M92
G28 U0
G28 V0 M5
M90
T0808
G0 Y0
G97 M103 S3=3000
G0 Y0
#100=23
#101=0
#102=15.6522
N10 #101=#101+1

(DESBASTE)

G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500

G0 X15.000
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X14.700
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X14.400
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X14.100
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X13.800
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X13.500
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X13.200
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X12.900
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X12.600
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 C-93.059
G0 Y-0.000 Z15.500
G0 X12.300
G1 Z17.500 C-93.059 F90
G0 X19.000
G0 X55

(ACABADO FLANCO IZQUIERDO)

G0 C-90.000
G0 Y0.250 Z17.500
G0 X12.294
G1 Z15.500 C-90.000 F90
G0 X55.000

(ACABADO FLANCO DERECHO)

G0 C-96.1182
G0 Y-0.250 Z15.500
G0 X12.294
G1 Z17.500 C-96.118 F90
G0 X55.000

(ACABADO INVOLUTA IZQUIERDA)

G0 C-86.669
G0 Y0.627 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-86.669 F90
G0 X19.000
G0 C-83.338
G0 Y1.004 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-83.338 F90
G0 X19.000
G0 C-80.007
G0 Y1.381 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-80.007 F90
G0 X19.000
G0 C-76.676
G0 Y1.758 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-76.676 F90
G0 X19.000
G0 C-73.345
G0 Y2.135 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-73.345 F90
G0 X19.000
G0 C-70.014
G0 Y2.512 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-70.014 F90
G0 X19.000
G0 C-66.683
G0 Y2.889 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-66.683 F90
G0 X19.000
G0 C-63.352

G0 Y3.266 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-63.352 F90
G0 X19.000
G0 C-60.021
G0 Y3.643 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-60.021 F90
G0 X19.000
G0 C-56.690
G0 Y4.020 Z17.500
G0 X11.968
G1 Z15.500 C-56.690 F90
G0 X19.000

(ACABADO INVOLUTA DERECHA)

G0 C-99.449
G0 Y-0.627 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-99.449 F90
G0 X19.000
G0 C-102.780
G0 Y-1.004 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-102.780 F90
G0 X19.000
G0 C-106.111
G0 Y-1.381 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-106.111 F90
G0 X19.000
G0 C-109.442
G0 Y-1.758 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-109.442 F90
G0 X19.000
G0 C-112.773
G0 Y-2.135 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-112.773 F90
G0 X19.000
G0 C-116.104
G0 Y-2.512 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-116.104 F90
G0 X19.000
G0 C-119.435
G0 Y-2.889 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-119.435 F90
G0 X19.000

```
G0 C-122.766
G0 Y-3.266 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-122.766 F90
G0 X19.000
G0 C-126.097
G0 Y-3.643 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-126.097 F90
G0 X19.000
G0 C-129.428
G0 Y-4.020 Z15.500
G0 X11.968
G1 Z17.500 C-129.428 F90
G0 X19.000
```

```
IF [#101EQ#100]GOTO30
G0 C#102
G50 C0
GOTO10
```

```
N30 M105
M92
M30
%
```

5) Programa 6003 (Tronzado)

```
%
N10 (TRONZADO)
G54 G40 G99 G50 S1=2000
G43.1
G28 U0
G28 V0
T0101
G0 Y0
G96 M3 S1=50
G0 X20 Z20
M26
G75 R0.5 F0.05
G75 X-1 P0.5
M27
G0 X50
M5
M30
%
```

6) Programa para mecanizar soporte en el centro de mecanizado (Cara superior).

␣

```
N20 (CILINDRADO)
G40 G80 G21 G17 G98 G90 G54
G28 G91 Z0
G28 G91 X0 Y0
M06 T15
G00 G90 X0 Y0
G00 G43 Z20 H15
M03 S3183
M08
G00 X35
G01 Z-5 F668
G01 X22
G02 X-22 R22
G02 X22 R22
G01 X35
G01 Z-10 F668
G01 X22
G02 X-22 R22
G02 X22 R22
G01 X35
G01 Z-15 F668
G01 X22
G02 X-22 R22
G02 X22 R22
G01 X35
G01 Z-20 F668
G01 X22
G02 X-22 R22
G02 X22 R22
G01 X35
G91 G28 Z0
G90
M5
M9
```

```
N20 (BROCA DE CENTRO)
G40 G80 G21 G17 G98 G90 G54
G91 G28 Z0
G28 X0 Y0
M6 T02
G0 G90 X0 Y0
M3 S2500
G43 Z20 H02
M8
G01 X3.6 Y0
G81 Z-4 R2 F60 K1
```

X-6.9 Y0
G80
G91 G28 Z0
G90
M5
M9

N50 (DEEP DRILL B)
G40 G49 G21 G17 G98 G90 G54
G91 G28 Z0
G28 X0 Y0
M6T04
G90 G0 X0 Y0
M3 S3100
G43 Z20 H04
M8
G0 X3.6 Y0
G83 Z-25 R2 Q3 F100 K1
X-6.9 Y0
G80
G91 G28 Z0
G90
M5
M9

N60 (RIMADO)
G40 G49 G21 G17 G98 G90 G54
G91 G28 Z0
G28 X0 Y0
M6T14
G90 G0 X0 Y0
M3 S3100
G43 Z20 H14
M8
G0 X3.6 Y0
G86 Z-20 R2 F50 K1
X-6.9 Y0
G80
G91 G28 Z0
G90
M5
M9

N110 (CHAFLAN CIRCULO)
G40 G80 G21 G17 G98 G90 G54
G28 G91 Z0
G28 G91 X0 Y0
M06 T01
G00 G90 X0 Y0
G00 G43 Z20 H01
M03 S3183

```

M08
G00 X35
G01 Z-3.169 F668
G01 X19.5
G02 X-19.5 R9.5
G02 X19.5 R9.5
G01 X35
G91 G28 Z0
G90
M5
M9
M30
%
```

7) Programa para mecanizar soporte en el centro de mecanizado (Cara inferior).

```

%
N10 (CHAFLAN CIRCULO)
G40 G80 G21 G17 G98 G90 G54
G28 G91 Z0
G28 G91 X0 Y0
M06 T01
G00 G90 X0 Y0
G00 G43 Z20 H01
M03 S3183
M08
G00 X35
G01 Z-3.169 F668
G01 X19.5
G02 X-19.5 R19.5
G02 X19.5 R19.5
G01 X35
G91 G28 Z0
G90
M5
M9

N20 (RANURA)
G40 G80 G21 G17 G98 G90 G54
G28 G91 Z0
G28 G91 X0 Y0
M06 T15
G00 G90 X0 Y0
G00 G43 Z20 H15
M03 S3183
M08
G00 X35 Y6
G01 Z-2.5 F668
G01 X-35
G01 Y0
G01 X35
G01 Z5
```

```
G00 X35 Y-6
G01 Z-2.5
G01 X35
G01 Z5
```

```
G00 X35 Y6
G01 Z-5 F668
G01 X-35
G01 Y0
G01 X35
G01 Z5
G00 X35 Y-6
G01 Z-5
G01 X35
G01 Z5
```

```
G91 G28 Z0
G90
M5
M9
M30
%
```