

**Diseño de un engranaje hipoide y su fabricación en máquinas CNC multieje técnica 4+1
ejes**

Cristhian Libardo Cárdenas Páez

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico

Director

**Jorge Andrés García Barbosa
Ingeniero mecánico**

Codirector

**Yamid Gonzalo Reyes Flórez
Ingeniero mecánico**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
División de ingeniería
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
2021**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE VARIABLES.....	6
1 RESUMEN	8
2 INTRODUCCIÓN	9
3 OBJETIVOS.....	10
3.1 General	10
3.2 Específicos	10
4 DISEÑO DEL ENGRANAJE	11
4.1 Parámetros de entrada	13
4.2 Datos iniciales	14
4.3 Datos adicionales	22
4.4 Ángulos de paso del piñón y la rueda	28
4.5 Diseño del perfil del diente	32
4.5.1 Parámetros de diseño para la epicicloide	36
4.5.2 Modelo tridimensional del piñón	40
4.5.3 Manufactura aditiva del par de engranajes	42
5 PROCESO DE MANUFACTURA	43
5.1 Elección del dispositivo de sujeción	43
5.1.1 Dispositivo de sujeción	44
5.1.2 Restricción de los grados de libertad	45
5.1.3 Dimensionamiento del dispositivo de sujeción	45
5.2 mecanizado del perfil de revolución	46
5.3 componentes montaje virtual	47
5.3.1 Máquinas virtuales	48
5.3.2 Herramientas de corte	49
6 PROPUESTA CAM PARA LA OBTENCION DE LOS DIENTES DEL PIÑON	50
6.1 Trayectoria generada para desbaste y acabado	50
6.1.1 Desbaste del diente con <i>Turbomachinery Milling</i>	51
6.1.2 Acabado del diente con <i>Turbomachinery Milling</i>	54
6.1.3 Marcación del diente de piñón “<i>variable_contour</i>”	59
6.1.4 desbaste del diente de piñón “<i>Rotary-roughing</i>”	61

6.1.5	Acabado del diente de piñón “ <i>variable_contour</i> ”	62
7	RESULTADOS	64
7.1	Marcación	64
7.2	Desbaste	65
7.3	Acabado	66
8	CONCLUSIONES	68
9	RECOMENDACIONES	69
10	REFERENCIAS	70
11	Anexos	71
11.1	Anexo 1	71
11.2	Anexo 2	72

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. VALORES PARA FACTOR DE MATERIAL	14
TABLA 2. DATOS INICIALES PARA EL MÉTODO 3.....	15
TABLA 3. ECUACIONES PARA DIÁMETRO PRELIMINAR POR PICADURA	17
TABLA 4. ECUACIONES PARA DIÁMETRO PRELIMINAR POR FLEXIÓN	18
TABLA 5. ECUACIONES PARA NÚMERO DE DIENTES DEL PIÑÓN.....	19
TABLA 6. MÍNIMO NÚMERO DE DIENTES DEL PIÑÓN	20
TABLA 7. VALORES DATOS INICIALES.	22
TABLA 8. RELACIÓN ENTRE DATOS I Y II	23
TABLA 9 FACTOR DE PROFUNDIDAD.....	24
TABLA 10 FACTOR DE ADENDUM MEDIO PARA SIGMA:90	25
TABLA 11 ECUACIONES PARA LA SUMA DE ÁNGULOS DEDENDUM.....	26
TABLA 12 ECUACIONES PARA ÁNGULOS DEDENDUM.	27
TABLA 13 VALORES DE DATOS ADICIONALES	27
TABLA 14. VALORES ÁNGULOS DE PASO Y FACTOR HIPOIDE.....	28
TABLA 15. VALORES PARA MODELO POR REVOLUCIÓN.	31
TABLA 16. VALORES ÁNGULOS DE PRESIÓN NORMAL.....	34
TABLA 17 ECUACIONES CURVATURA INVOLUTA LADO CONDUCTOR Y NO CONDUCTOR	34
TABLA 18. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS FINITECH GTX-210	47

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CONO DE PASO ENGRANAJES HIPOIDE.....	11
FIGURA 2. METODOLOGÍA DE DISEÑO ENGRANAJES HIPOIDES.....	12
FIGURA 3. CONFIGURACIÓN DE PROFUNDIDAD, MÉTODO 3.	15
FIGURA 4. DESPLAZAMIENTO HIPOIDE.	16
FIGURA 5. DIÁMETRO EXTERIOR DE PASO POR PICADURA RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 4.....	17
FIGURA 6. DIÁMETRO EXTERIOR DE PASO POR FLEXIÓN RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 4.....	18
FIGURA 7. APROXIMACIÓN NÚMERO DE DIENTES DEL PIÑÓN RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 4.....	20
FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO ITERACIÓN FACTOR HIPOIDE.....	28
FIGURA 9. PUNTO DE CRUCE ENTRE LOS ÁNGULOS DE PASO.....	29
FIGURA 10. ANCHO DE CARA Y DISTANCIAS DEL CONO.....	30
FIGURA 11. DIÁMETROS DE CONO INTERNOS Y EXTERNOS DEL PIÑÓN.....	30
FIGURA 12. MODELO CAD DE REVOLUCIÓN.....	31
FIGURA 13. REPRESENTACIÓN APROXIMACIÓN DE TREGOLD.....	32
FIGURA 14. SECCIONES DEL CONO DEL PIÑÓN.....	33
FIGURA 15. ESPESOR DEL DIENTE Y CURVAS INVOLUTAS DEL LADO CONDUCTOR Y NO CONDUCTOR DEL PIÑÓN.....	34
FIGURA 16. PERFIL DEL DIENTE CONO EXTERNO.....	35
FIGURA 17. PERFIL DEL DIENTE CONO MEDIO.....	35
FIGURA 18. PERFIL DEL DIENTE CONO INTERNO.....	35
FIGURA 19. ESQUEMA DEL PLANO DE PASO PARA PROCESO DE CORTE POR FH.....	36
FIGURA 20. ESQUEMA DE CIRCUNFERENCIAS DE LA EPICICLOIDE.....	37
FIGURA 21. DESARROLLO DE LA EPICICLOIDE PLANO DE PASO.....	38
FIGURA 22. SECCIÓN EPICICLOIDE QUE ATRAVIESA EL RADIO MEDIO DE LA RUEDA (RM2).....	39
FIGURA 23. SECCIÓN EPICICLOIDE EN EL PLANO DE PASO MODELO CAD.....	40
FIGURA 24. VISTA PAR DE ENGRANAJES.....	41
FIGURA 25. PAR DE ENGRANAJES FDM.....	42
FIGURA 26. PROCESO DE MANUFACTURA PARA PIÑÓN HIPOIDE.....	43
FIGURA 27. DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN.....	44
FIGURA 28. ENSAMBLE SUJETADOR Y PIÑÓN.....	45
FIGURA 29. SECUENCIA DE TRABAJO PIÑÓN DE REVOLUCIÓN.....	46
FIGURA 30. MAQUINA FINITECH GTX-210.....	48
FIGURA 31. DISTANCIA MÍNIMA ENTRE DIENTES.....	49
FIGURA 32. FRESA PLANA HERRAMIENTA DE DESBASTE.....	49
FIGURA 33. FRESA REDONDA HERRAMIENTA DE ACABADO.....	49
FIGURA 34. GEOMETRÍA DEL IMPELLE EMULADO AL PIÑÓN HIPOIDER RECONOCIDAS POR NX.....	50
FIGURA 35. RESULTADO DE LA ESTRATEGIA DE LA OPERACIÓN "IMPELLER ROUGH".....	51
FIGURA 36. CUADRO DE DIALOGO DIRECCIÓN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DESBASTE.....	52
FIGURA 37. RESULTADO OPERACIÓN DE DESBASTE. "IMPELLER ROUGH".....	53
FIGURA 38. RESULTADO ESTRATEGIA ,OPERACIÓN "IMPELLER BLADE FINISH".....	54
FIGURA 39. CUADRO DE DIALOGO ÁNGULOS "TILT" Y "LEAD".....	55
FIGURA 40. ÁNGULO DE INCLINACIÓN "LEAD" OPERACIÓN DE ACABADO.....	56
FIGURA 41. ÁNGULO DE INCLINACIÓN "TILT" OPERACIÓN DE ACABADO.....	56
FIGURA 42. CUADRO DE DIALOGO DIRECCIÓN Y PROFUNDIDAD DE CORTE ACABADO.....	57
FIGURA 43. RESULTADO OPERACIÓN DE ACABADO. "IMPELLER BLADE FINISH".....	58
FIGURA 44. LÍNEAS GUÍAS Y ÁNGULO TIIT.....	59
FIGURA 45. VISTA FRONTAL ESTRUCTURA ALÁMBRICA DEL CILINDRO ENVOLVENTE.....	60
FIGURA 46. RESULTADO DE LA ESTRATEGIA "VARIABLE_CONTOUR" MARCACIÓN.....	60

FIGURA 47 CUADRO DE DIALOGO POSICIONAMIENTO DESBASTE "ROTARY-ROUGHING"	61
FIGURA 48 RESULTADO DE LA ESTRATEGIA "ROTARY-ROUGHING" DESBASTE	62
FIGURA 49. PARÁMETROS PARA "VARIABLE_CONTOUR" CON "STREMLINE"	63
FIGURA 50 RESULTADO DE LA ESTRATEGIA"VARIABLE_CONTOUR" CON "STREMLINE" ACABADO.....	63
FIGURA 51 VERIFICACIÓN DEL ANCHO DEL DIENTE EN LA CARA SUPERIOR CONO EXTERNO E INTERNO.....	64
FIGURA 52 RESULTADO DEL PROCESO DE DESBASTE.	65
FIGURA 53. VISTA LATERAL DE LA HERRAMIENTA EN DIRECCIÓN DEL AVANCE DE LA TRAYECTORIA "ÁNGULO DE INCLINACIÓN LEAD"	66
FIGURA 54. VISTA FRONTAL DE LA HERRAMIENTA CON RESPECTO A LA SUPERFICIE DEL DIENTE "ÁNGULO DE INCLINACIÓN TILT"	66
FIGURA 55 RESULTADO DEL PROCESO DE ACABADO.	67

LISTA DE VARIABLES

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
T_1	Torque	N.m
P	Potencia	kW
n	Revoluciones	r/min
R_m	Distancia del cono medio	mm
β_m	Ángulo medio de la espiral	°
r_{c0}	Radio del cortador	mm
d_e	Diámetro exterior de paso	mm
a	Desplazamiento hipoide "offset"	mm
u	Relación de transmisión	-
Delta	Ángulo de paso	°
Σ	Ángulo entre ejes	°
R_e	Distancia del cono externo	mm
m.et	Modulo trasversal externo	-
$z_{1,2}$	Numero de dientes	-
<i>zeta.m</i>	Ángulo de desplazamiento en el plano axial del piñón	°
η	Ángulo de desplazamiento de la rueda en el plano axial	°
u_a	Relación de transmisión equivalente	-
s.mt	Espesor circular trasversal medio	mm
s.mn	Espesor normal circular medio	mm
Kt	Factor de espesor del diente	-
dm	Diámetro de paso medio	mm
d.mn	Diámetro normal medio del piñón	mm
Alfa.n	Ángulo de presión normal generado	°
Alfa.d	Ángulo de presión normal	°
Alfa.lim	Límite de ángulo de presión	°
h.amc	Adendum cordal medio	mm
Alfa.n1	Ángulo de presión normal generado flanco conductor	°
Alfa.n2	Ángulo de presión normal generado flanco conducido	°

1 RESUMEN

Se desarrolló un piñón hipoide siguiendo la metodología de diseño del proceso de *face-hobbing*¹ (tallado frontal) propuesto por la norma ISO 23509, el cual debido a sus características geométricas tales como ángulos de presión desiguales y cambios en el espesor del diente a lo largo del piñón, genera una geometría compleja. Para la obtención de dicha geometría se empleó un centro de mecanizado vertical que cuenta con cuarto y quinto eje de movimiento para verificar que no es requerimiento el uso de máquinas y herramientas de tallado especializadas para la obtención de estas geometrías en lotes de producción bajos. El proceso de diseño a diferencia de la mayoría de los tipos de engranajes que tienen ecuaciones de forma cerrada que definen su forma, la geometría de los engranajes hipoidales solo se puede calcular resolviendo ecuaciones gobernadas por el proceso de fabricación, incluidos los ajustes de la máquina y las especificaciones del cortador.[1] Como punto de partida se establecen la potencia y número de revoluciones de trabajo del par de engranajes, estos valores son obtenidos de estudios cinemáticos o requerimientos de ingeniería para el funcionamiento. Después del diseño CAD se planificó el proceso de manufactura seleccionando material y herramientas para cada una de las operaciones de remoción de material haciendo uso del software Nx CAM para verificar trayectorias en procesos de desbaste y acabado del perfil del diente del piñón.

¹ tallado frontal FH proceso de mecanizado que utiliza un cortador circular con cuchillas internas y externas alternas que cortan las superficies dentales en ambos lados de un espacio dentario al mismo tiempo.

2 INTRODUCCIÓN

Los engranajes son elementos mecánicos de transmisión de potencia comúnmente usados en diferentes tipos de máquinas, cuando los ejes de estas máquinas son paralelos se suelen utilizar engranajes de tipo cilíndricos rectos o cilíndricos helicoidales, en el caso cuando no son paralelos se utilizan engranajes de tipo cónicos rectos o cónicos helicoidales y finalmente cuando los ejes no son paralelos y adicionalmente no son coplanares son llamados cónicos hipoidales, este tipo de engranajes poseen un desplazamiento del plano de su eje con respecto al eje de la corona.

En Colombia la gran mayoría de empresas del sector metalmecánico de mecanizado poseen máquinas de control numérico computarizado (CNC) con 2 y 3 ejes suficientes para generar geometrías complejas, pero aun así estos 3 ejes no tienen la capacidad de manufacturar superficies como las requeridas en los dientes del piñón, limitando la capacidad competitiva de la industria colombiana.

Los engranes hipoidales son engranajes especiales de tipo cónicos en espiral, poseen variables geométricas complejas debido a que sus ejes rotatorios no se interceptan. En su fabricación se emplean máquinas especializadas de tallado que disponen de control numérico por computadora (CNC). Este tipo de maquinaria requiere de una parametrización de herramienta muy compleja y cuentan con un alto valor económico.

Actualmente en colombiana ya existen empresas con centros de mecanizados de 5 ejes capaces de manufacturar este tipo de geometrías complejas. En este trabajo de grado se pretende realizar la fabricación de un engranaje tipo hipoide, realizando un modelo computacional que se basa en ecuaciones de diseño según la norma ISO23509 y parámetros de máquinas generadoras para el perfil del diente. La fabricación se realizó en un centro de mecanizado vertical de propósito general con 4 y 5 ejes.

El foco de este trabajo está en desarrollar un modelo tridimensional de un piñón hipoide, el cual nos permita obtener superficies para el posterior mecanizado.

3 OBJETIVOS

3.1 General

- Desarrollar el proceso de manufactura de un engranaje hipoide en centro de mecanizado vertical con 4+1 ejes de la universidad Santo Tomás.

3.2 Específicos

- Definir la geometría del engranaje haciendo uso de herramientas CAD.
- Realizar el plan de manufactura del engranaje.
- Fabricar el engranaje en máquina vertical con 4+1 ejes.

4 DISEÑO DEL ENGRANAJE

Los engranajes cónicos e hipoidales, están diseñados para la transformación de movimientos entre ejes cruzados, la superficie de referencia del piñón y la rueda son conos de paso que están en tangencia en un punto P y separación entre ejes a. (ver Figura 1), por lo general los ejes de rotación de los engranajes hipoidales forman un ángulo de 90 grados [2] este tipo de engranajes se utilizan ampliamente en la transmisión de automóviles, tractores y otros elementos mecánicos. [3]

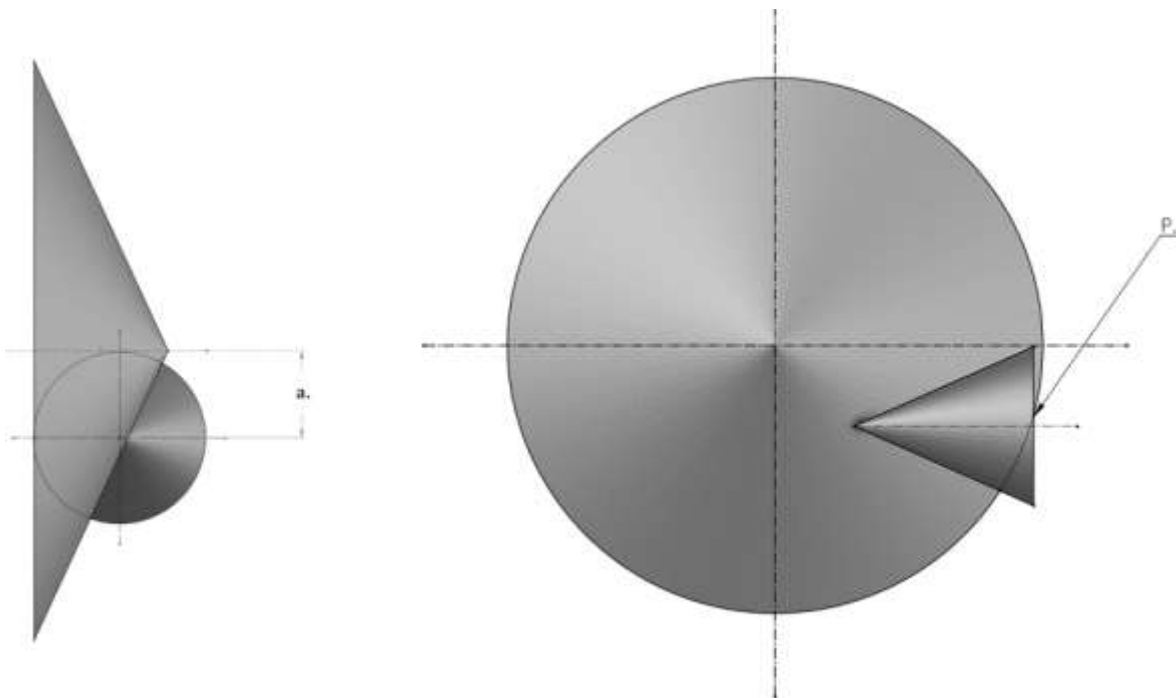


Figura 1. Cono de paso engranajes hipoide
fuente: autor, adaptada de [4]

A diferencia de los engranajes cónicos, una simple determinación de los parámetros de la superficie de paso es imposible para las transmisiones de engranajes hipoides ya que relaciona cálculos geométricos con parámetros tecnológicos de la maquinaria usada, por lo tanto, la solución debe encontrarse en un procedimiento de aproximación o iteración sucesivas. Es necesario de un conjunto de datos iniciales para comenzar el procedimiento de cálculo, Para este proceso se siguió el diagrama de flujo presente en la Figura 2. metodología de diseño engranajes hipoides.

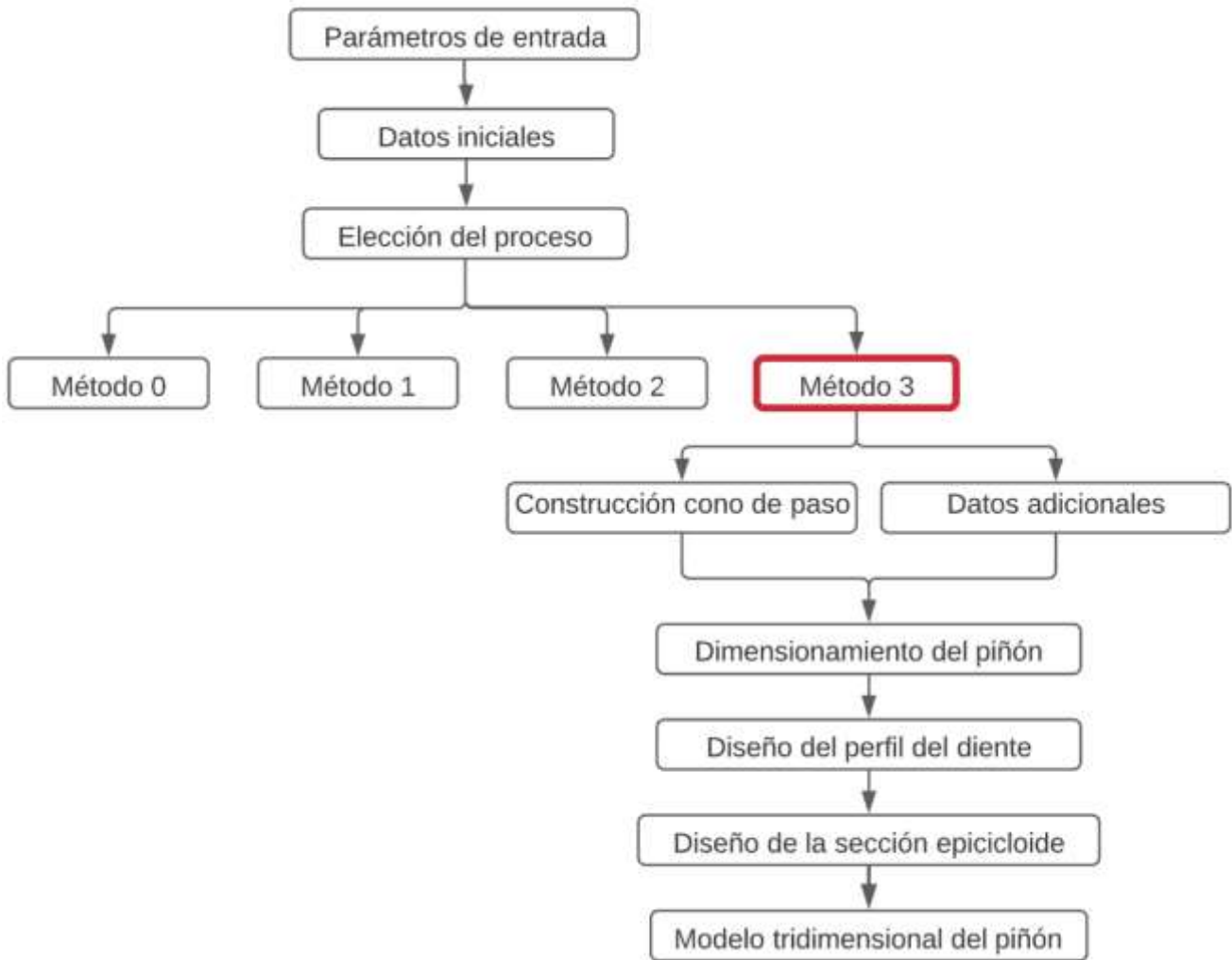


Figura 2. metodología de diseño engranajes hipoides
fuente: autor, adaptada de [4]

4.1 Parámetros de entrada.

Estos parámetros son requerimientos de ingeniería y datos de estudios cinemático que son esenciales para la estimación de diámetros y números de dientes para el diseño preliminar del par de engranajes. Los valores de entrada usados para el desarrollo del trabajo están basados en [1]

- **Valores de funcionamiento**

(Revoluciones) n :1500 (/min)

(Potencia) P :100 kW

(Relación de transmisión) u :4.

Haciendo uso de la ecuación (1) obtenemos el valor del torque.

(Torque) T_1 : 636,7 N.m

$$T_1 = \frac{9550 * P}{n} \quad (1)$$

Criterios como selección del material y sujeción del par de engranajes, asignan un factor que modifica el diámetro exterior de paso del piñón.

- **Factor del material (K_M)**

El material de fabricación y su dureza establecen un factor adimensional para el desarrollo del proyecto se seleccionó el acero cementado a 55 HRC para el piñón y la rueda K_M :1

La Tabla 1 muestra los valores para el factor K_M .

Gear set materials				
Gear material and hardness		Pinion material and hardness		Material factor, k_M
Material	Hardness	Material	Hardness	
Case-hardened steel	58 HRC min.	Case-hardened steel	60 HRC min.	0,85
Case-hardened steel	55 HRC min.	Case-hardened steel	55 HRC min.	1,00
Flame-hardened steel	50 HRC min.	Case-hardened steel	55 HRC min.	1,05
Flame-hardened steel	50 HRC min.	Flame-hardened steel	50 HRC min.	1,05
Oil-hardened steel	375 HB to 425 HB	Oil-hardened steel	375 HB to 425 HB	1,20
Heat-treated steel	250 HB to 300 HB	Case-hardened steel	55 HRC min.	1,45
Heat-treated steel	210 HB to 245 HB	Case-hardened steel	55 HRC min.	1,45
Cast iron	—	Case-hardened steel	55 HRC min.	1,95
Cast iron	—	Flame-hardened steel	50 HRC min.	2,00
Cast iron	—	Annealed steel	160 HB to 200 HB	2,10
Cast iron	—	Cast iron	—	3,10

Tabla 1. valores para factor de material
fuente: ISO 23509

- **Factor de tipo de carga (FTC).**

Los engranajes con carga estática deben diseñarse para la resistencia a la flexión en lugar de la resistencia a las picaduras. Para los engranajes cargados estáticamente que están sujetos a vibraciones, el diámetro del paso exterior del piñón se debe multiplicar por 0,70. Para los engranajes cargados estáticamente que no están sujetos a vibraciones, el diámetro del paso exterior del piñón se debe multiplicar por 0,60.[4]. El valor usado para este trabajo es correspondiente a una carga dinámica con un **FTC:1**.

4.2 Datos iniciales

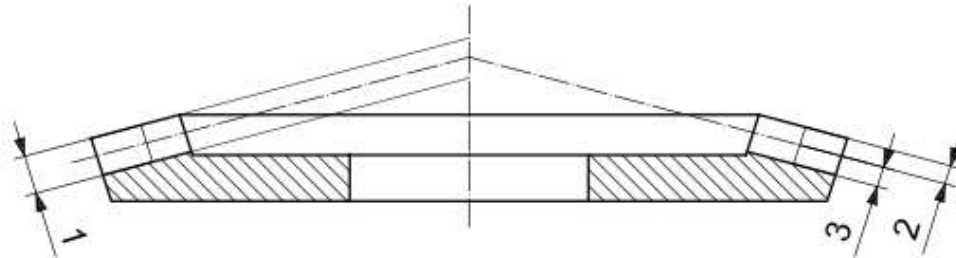
Las variables fundamentales para el diseño preliminar, dependen de la metodología de diseño escogido, se hizo uso del método 3 que es propio de la empresa KlingelInberg basado en el proceso de fabricación de (FH).

Este es un método de indexación continua que posee un par de cuchillas internas y externas alternas que cortan las superficies dentales en ambos lados de un espacio dentario al mismo tiempo[5]. Lo que permite que se formen los dientes de manera simultánea y es comúnmente usado por la disminución de tiempo de fabricación en comparación con el proceso de (*face milling*) (FM), los datos requeridos para este método se evidencian en la

Tabla 2.

Este proceso de conformado, mecaniza el diente con una profundidad uniforme (ver Figura 3), para esto el valor del radio de corte (c), debe estar en el rango obtenido en la ecuación (2)

$$(R_{m2}) * \sin(\beta_{m2}) < r_{c0} < ((R_{m2}) * \sin(\beta_{m2})) * 1.5 \quad (2)$$



c) Uniform depth

Key

- 1 mean whole depth
- 2 mean addendum
- 3 mean dedendum

Figura 3. configuración de profundidad, método 3.

Fuente: ISO 23509

Símbolo	Descripción
Σ	ángulo entre ejes
$a.$	desplazamiento hipoide
z_1, z_2	número de dientes
d_{e2}	diámetro de paso exterior de la rueda
b_2	ancho de cara de la rueda
β_{m2}	ángulo de espiral medio de la rueda
r_{c0}	radio del cortador
z_0	numero de grupo de cuchillas

Tabla 2. datos iniciales para el método 3.

Fuente: autor

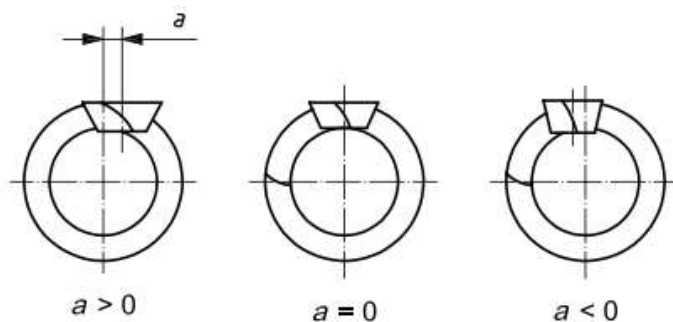
- **Angulo entre ejes (sigma.)**

El ángulo entre ejes es determinado de acuerdo a la aplicación, es sugerido utilizar un ángulo de 90 grados, debido a que la mayoría de datos de bibliografía son calculados con este ángulo entre ejes.

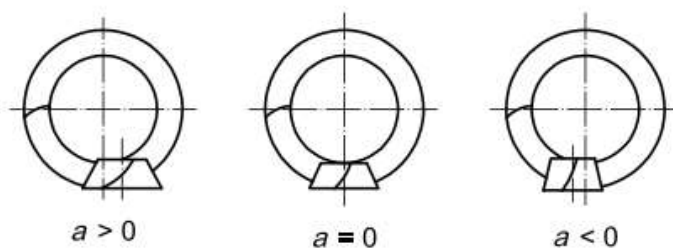
- **Desplazamiento hipoide (a.)**

En la mayoría de los casos, la aplicación determina el desplazamiento hipoide. El desplazamiento del piñón se designa como positivo o negativo. Esto se determina mirando la mano de la espiral (*hand of spiral*) de la rueda. Si el desplazamiento del piñón sigue la mano de la espiral de la rueda, se define como positivo. Si el desplazamiento del piñón es

opuesto a la mano de la espiral de la rueda, es negativo.[4] En la Figura 4 se muestra los desplazamientos positivos y negativos del piñón vistos desde el vértice de la rueda.



a) Left-hand pinion mated with right-hand wheel



b) Right-hand pinion mated with left-hand wheel

*Figura 4. Desplazamiento hipoide.
Fuente: ISO 23509*

Se utilizó un desplazamiento positivo del piñón debido a que esto aumenta el diámetro del piñón, la relación de contacto de la cara y aumento de la capacidad de carga por picadura (*pitting*) y flexión.[4]

- **Diámetro exterior de paso del piñón preliminar**

El diámetro seleccionado es obtenido en la Figura 5 y Figura 6, la cual es una primera estimación que se multiplicaran por los factores de material y factor de tipo de carga, de estos dos diámetros se escogió el valor más alto.

El valor del diámetro para las Figura 5 y Figura 6 es dado por la intersección del valor del torque a la curva de relación de trasmisión; para diferentes relaciones de trasmisión se obtuvieron las ecuaciones de las curvas con el fin de agilizar la obtención del diámetro preliminar, las ecuaciones son dadas en la Tabla 3 y Tabla 4.

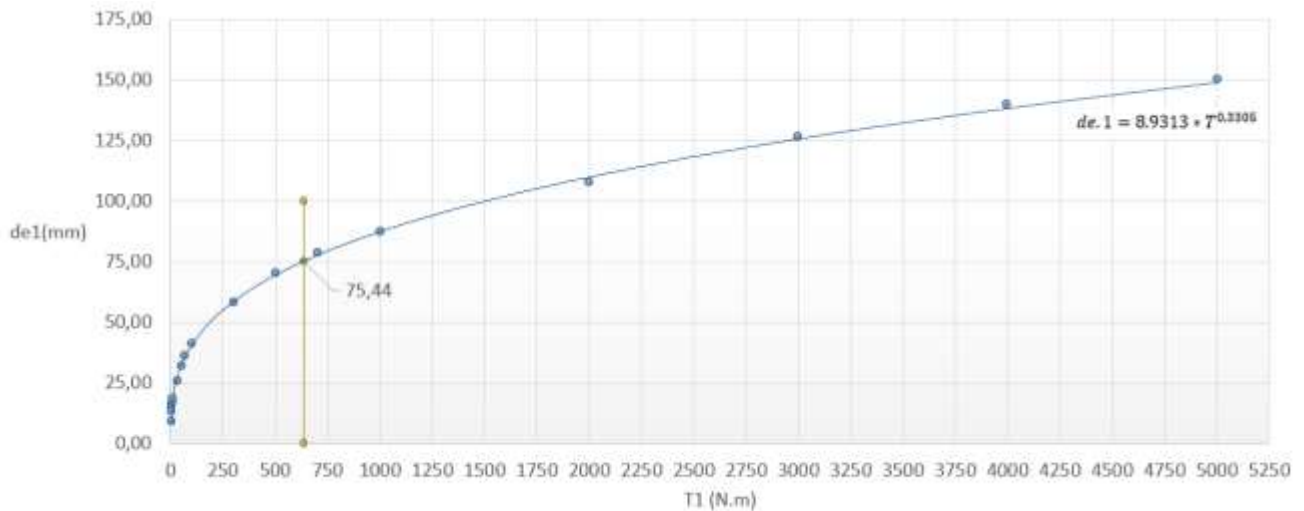


Figura 5. Diámetro exterior de paso por picadura relación de transmisión 4
Fuente: autor

U1	$d_{e.1} = 14,873 * T_1^{0.3309}$
U1.5	$d_{e.1} = 13,178 * T_1^{0.3313}$
U2	$d_{e.1} = 11,481 * T_1^{0,3317}$
U2.5	$d_{e.1} = 10,845 * T_1^{0.3315}$
U3	$d_{e.1} = 10,208 * T_1^{0.3312}$
U3.5	$d_{e.1} = 9,5699 * T_1^{0.3308}$
U4	$d_{e.1} = 8,9313 * T_1^{0.3305}$
U6	$d_{e.1} = 7,6882 * T_1^{0.3288}$
U10	$d_{e.1} = 6,4436 * T_1^{0.3264}$

Tabla 3. Ecuaciones para diámetro preliminar por picadura
Fuente: autor

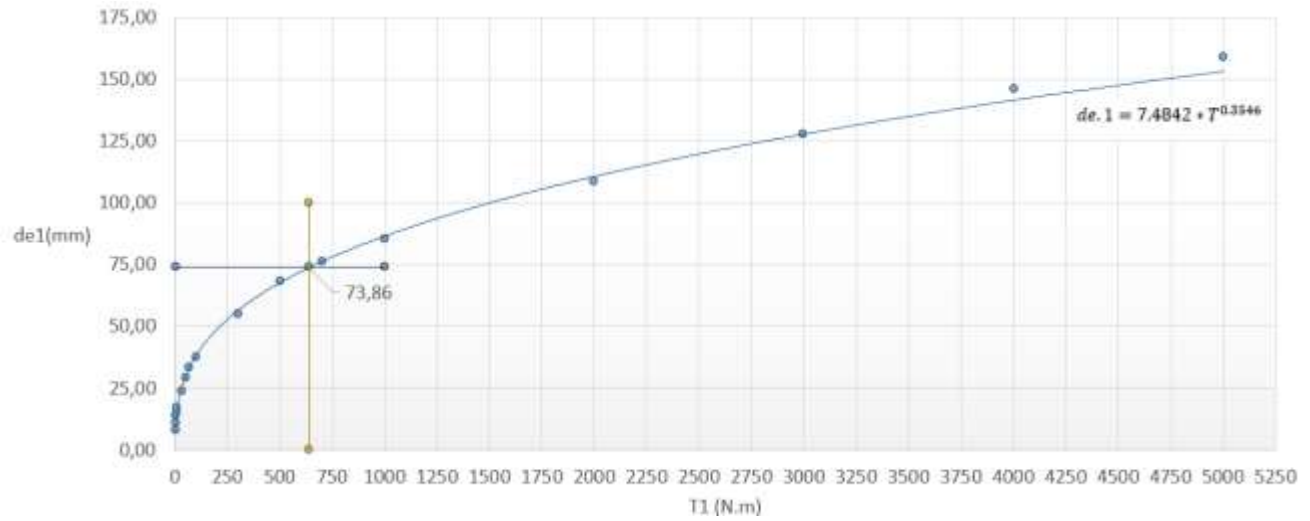


Figura 6. Diámetro exterior de paso por flexión relación de transmisión 4
Fuente: autor

U1	$d_{e.1} = 13,495 * T_1^{0.3532}$
U1.5	$d_{e.1} = 12,176 * T_1^{0.3522}$
U2	$d_{e.1} = 10,855 * T_1^{0.351}$
U2.5	$d_{e.1} = 10,012 * T_1^{0.3517}$
U3	$d_{e.1} = 9,1699 * T_1^{0.3525}$
U3.5	$d_{e.1} = 8,3272 * T_1^{0.3535}$
U4	$d_{e.1} = 7,4842 * T_1^{0.3546}$
U6	$d_{e.1} = 5,8677 * T_1^{0.3583}$
U10	$d_{e.1} = 4,2544 * T_1^{0.3642}$

Tabla 4. Ecuaciones para diámetro preliminar por flexión
Fuente: autor

Posteriormente el valor del diámetro más alto, siendo este el resultante de la Figura 5, es ajustado al desplazamiento hipoide. Este diámetro preliminar, es dado por la ecuación (3)

$$d_{e1.plm} = d_{e.1} - \frac{a}{u} \quad (3)$$

- **Diámetro exterior de paso de la rueda preliminar (d_{e2})**

Haciendo uso de las ecuaciones (4),(5),(6) y (7) obtenemos el valor del diámetro exterior de la rueda.

$$\delta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\Sigma)}{\cos(\Sigma + u)} \right) \quad (4)$$

$$\delta_2 = \Sigma - \delta_1 \quad (5)$$

$$R_{e2} = \left(\frac{d_{e1.plm}}{2 * \sin(\delta_1)} \right) \quad (6)$$

$$d_{e2} = R_{e2} * 2 * \sin(\delta_1) \quad (7)$$

- **Número de dientes (z_1, z_2)**

Aunque la selección de la cantidad de dientes se puede hacer de manera arbitraria, para el trabajo general, la cantidad de dientes seleccionados en la Figura 7 dará buenos resultados.[4] el valor seleccionado es dado por la intersección del valor del diámetro exterior de paso del piñón y la relación de trasmisión, para diferentes relaciones de trasmisión la Tabla 5 muestra ecuaciones para la obtención del número de dientes

La Tabla 6 muestra el número mínimo de dientes para el piñón de acuerdo a la relación de trasmisión.

U1	$z_1 = 0,0109 * d_{e1.plm} + 20,012$
U1.5	$z_1 = 0,0125 * d_{e1.plm} + 17,351$
U2	$z_1 = 0,0141 * d_{e1.plm} + 14,691$
U2.5	$z_1 = 0,0163 * d_{e1.plm} + 13,251$
U3	$z_1 = 0,0186 * d_{e1.plm} + 11,812$
U3.5	$z_1 = 0,0192 * d_{e1.plm} + 10,995$
U4	$z_1 = 0,0199 * d_{e1.plm} + 10,179$
U6	$z_1 = 0,0187 * d_{e1.plm} + 8,2856$
U10	$z_1 = 0,0199 * d_{e1.plm} + 5,8214$

Tabla 5. Ecuaciones para número de dientes del piñón
Fuente: autor

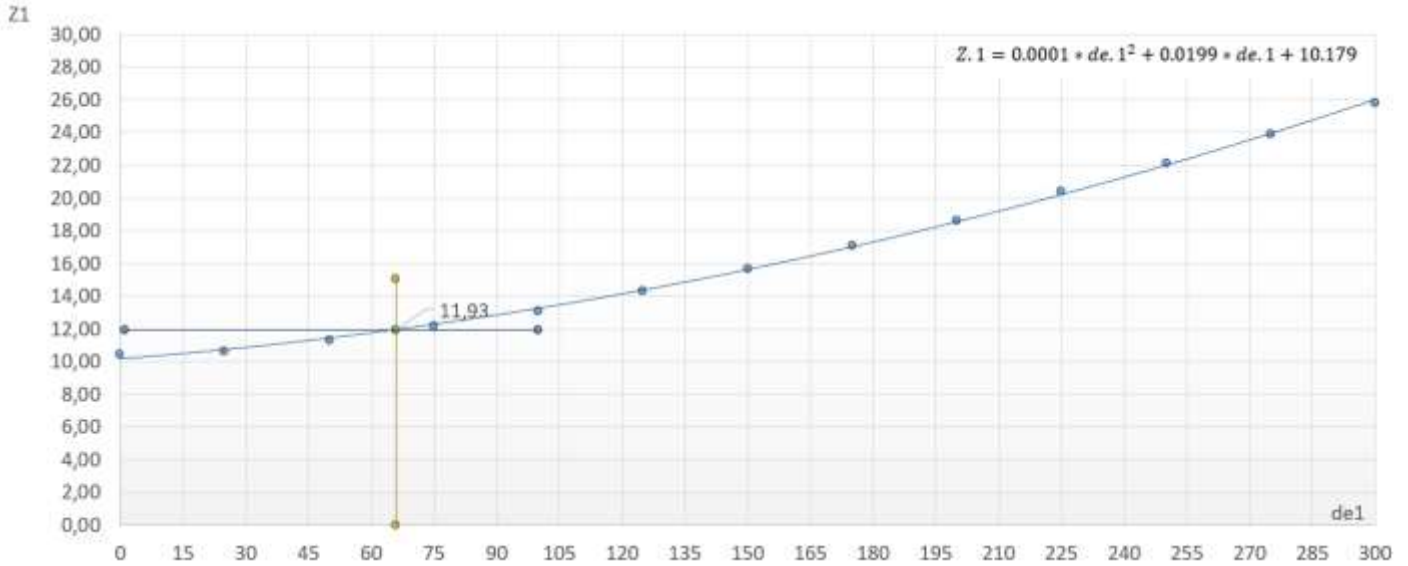


Figura 7. Aproximación número de dientes del piñón relación de transmisión 4
Fuente: autor

Approximate ratio, μ	Minimum number of pinion teeth, z_1
$1,00 < \mu < 1,50$	13
$1,50 < \mu < 1,75$	12
$1,75 < \mu < 2,00$	11
$2,00 < \mu < 2,50$	10
$2,50 < \mu < 3,00$	9
$3,00 < \mu < 3,50$	9
$3,50 < \mu < 4,00$	9
$4,00 < \mu < 4,50$	8
$4,50 < \mu < 5,00$	7
$5,00 < \mu < 6,00$	6
$6,00 < \mu < 7,50$	5
$7,50 < \mu < 10,0$	5

Tabla 6. Mínimo número de dientes del piñón
Fuente: ISO 23509n

- **Ancho de cara de la rueda.**

Generalmente, el ancho de la cara no debe exceder el 30% de la distancia del cono exterior de la rueda (R_{e2}) " $R_{e2} * 0.3 = 43,38 \text{ mm}$ "; o diez veces el valor del módulo transversal exterior (met) ecuación (8) " $met * 10 = 59,92 \text{ mm}$ ", el valor para el ancho de la rueda es el menor entre estos dos.

$$met = \frac{d_{e1.plm}}{z_1} \quad (8)$$

- **Ángulo espiral.**

La práctica común de diseño sugiere que el ángulo espiral se seleccione para dar una relación de contacto de la cara de aproximadamente 2,0; para aplicaciones de alta velocidad y máxima suavidad y tranquilidad, se sugieren relaciones de contacto facial superiores a 2,0. Pero se permiten relaciones de contacto facial inferiores a 2,0.[4]

Utilizando la ecuación (9) se encontró el valor para el ángulo de espiral de la rueda. Con esto obtenemos los valores iniciales (ver Tabla 7).

$$\beta_{m2} = 25 + 5 * \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{0,5} + 90 * \left(\frac{a.}{d_{e2}}\right) \quad (9)$$

Símbolo	Método 3	unidad
Σ	90	°
$a.$	38.1	mm
z_1, z_2	11,47	-
d_{e2}	282	mm
b_2	31,75	mm
β_{m2}	30	°
r_{c0}	76	-
z_0	17	-

Tabla 7. Valores datos iniciales.

Fuente: autor

4.3 Datos adicionales.

Conociendo los parámetros deseados del cono de paso, es necesario un conjunto de datos adicionales para el cálculo de las dimensiones del engranaje, la Tabla 8 muestra el conjunto de datos, se pueden suministrarse en cualquiera de las dos formas comúnmente utilizadas y la relación entre estos. El tipo de datos I es utilizados por AGMA, tipo de datos II son utilizados en las normas europeas [4].

Las normas europeas, describen las proporciones de los dientes del engranaje con un factor de adición, $khap$, un factor dedendum, $khfp$, un coeficiente de modificación de grosor, $xsmn$, y un coeficiente de cambio de perfil, xhm . El tipo de datos II, como se usa en los estándares AGMA, describe estas proporciones con un factor de profundidad, kd , un factor de aclaramiento, kc , un factor de espesor, kt y un factor de adición medio, $Cham$. [4]

Los factores anteriores están relacionados entre sí, de modo que la misma geometría del engranaje, derivada del tipo de datos I, también puede describirse con el tipo de datos II.

$x_{hm1} = k_d \left(\frac{1}{2} - c_{ham} \right)$	$c_{ham} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{hm1}}{k_{hap}} \right)$
$k_{hap} = \frac{k_d}{2}$	$k_d = 2 k_{hap}$
$k_{hfp} = k_d \left(k_c + \frac{1}{2} \right)$	$k_c = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{hfp}}{k_{hap}} - 1 \right)$
$x_{smn} = \frac{k_t}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{W_{m2}}{m_{mn}} + k_d \left(k_c + \frac{1}{2} \right) (\tan \alpha_{nD} + \tan \alpha_{nC}) - \frac{\pi}{2} \right]$	$k_t = 2 x_{smn}$

Tabla 8. Relación entre datos I y II
Fuente: ISO 23509

- **Factor de addendum y factor dedendum.**

En casos comunes, el factor addendum khap se establece en khap = 1 y el factor dedendum khfp se establece en khfp = 1,25.[4]

- **Factor de profundidad.**

Normalmente, se utiliza un factor de profundidad, kd, de 2,0 pero se puede variar para adaptarse al diseño y otros requisitos. La Tabla 9 proporciona factores de profundidad sugeridos basados en los números de dientes de piñón.

Type of gear	Depth factor	Number of pinion teeth
Straight bevel	2,000	12 or more
Spiral bevel	2,000	12 or more
	1,995	11
	1,975	10
	1,940	9
	1,895	8
	1,835	7
	1,765	6
Zerol bevel	2,000	13 or more
Hypoid	2,000	11 or more
	1,950	10
	1,900	9
	1,850	8
	1,800	7
	1,750	6

Tabla 9 factor de profundidad.

Fuente:ISO23509

- **Factor de tolerancia (Clearance factor).**

Si bien el espacio libre es constante a lo largo de toda la longitud del diente, el cálculo se realiza en el punto medio. Normalmente, el valor de 0,125 se usa para el factor de aclaramiento, k_c , pero se puede variar para adaptarse al diseño y otros requisitos.[4], para el trabajo se hace uso de un factor de tolerancia $k_c=0.125$, este valor solo se tendrá en cuenta en la manufactura ya que durante el proceso de diseño no es incluido.

- **Factor de addendum medio**

Este factor distribuye la profundidad de trabajo addendum entre el piñón y la rueda. El addendum del piñón suele ser más largo que el addendum de la rueda, excepto cuando el número de dientes es igual. Se utilizan addendum más largos en el piñón para evitar socavaciones. Los valores sugeridos para ángulos entre ejes de 90 ° para c_{han} se encuentran en la Tabla 10, se debe calcular la relación equivalente u_a haciendo uso de las ecuaciones (10),(11) y (12), Se obtuvo así un factor $c_{han} = 0.2253$

$$zeta.m = \sin^{-1} \left(\frac{2 * a.}{d_{m2}} + \frac{d_{m1} * \cos(\delta_2)}{\cos(\delta_1)} \right) \quad (10)$$

$$\eta = a. * \sin(\sin(zeta.m) * \cos(\delta_2)) \quad (11)$$

$$u_a = \sqrt{\frac{\cos(\delta_1) * \tan(\delta_2) * \cos(\eta)}{\cos(\delta_2)}} \quad (12)$$

Type of gear	Mean addendum factor	Number of pinion teeth
Straight bevel	$0,210 + 0,290/u_a^2$	12 or more
Spiral bevel and hypoid	$0,210 + 0,290/u_a^2$	12 or more
	$0,210 + 0,280/u_a^2$	11
	$0,175 + 0,260/u_a^2$	10
	$0,145 + 0,235/u_a^2$	9
	$0,130 + 0,195/u_a^2$	8
	$0,110 + 0,160/u_a^2$	7
	$0,100 + 0,115/u_a^2$	6

Tabla 10 Factor de addendum medio para sigma:90

Fuente:ISO23509

- **Factor de espesor.**

El grosor circular normal medio se calcula en el punto medio del piñón. Los valores de k_t se encuentran utilizando la ecuación(13) obteniendo así un factor $k_t = 0,1326$.

$$k_t = -0.088 + 0.092 * u - 0.004 * u^2 + 0.0016 * (z_1 - 30) * (u - 1) \quad (13)$$

- **Ángulos de presión normal**

El ángulo de presión de diseño nominal, alfa. d, es el valor inicial para el cálculo. Puede ser igual en el lado de trasmisión y en el lado de la costa; Para equilibrar las condiciones de la malla en la costa y el lado de trasmisión, el factor de influencia del ángulo de presión límite debe ser $f_{alim} = 1$. [4]

Los ángulos de presión de diseño nominal 18 ° o 20 ° pueden usarse para unidades de trabajo liviano; ángulos de presión más altos, como 22,5 ° y 25 ° para unidades de servicio pesado.

- **Ángulo adendum y ángulo dedendum de la rueda**

- **Suma de ángulos dedendum sigma. theta. f**

La suma de los ángulos dedendum del piñón y la rueda es un valor calculado que se establece mediante el cono (en profundidad) que se elige de acuerdo con el método de corte. Las fórmulas para calcular este valor se enumeran en la Tabla 11.

Depthwise taper	Sum of dedendum angles (degrees)
Standard	$\Sigma\theta_{fs} = \arctan\left(\frac{h_{fm1}}{R_{m2}}\right) + \arctan\left(\frac{h_{fm2}}{R_{m2}}\right)$
Uniform depth	$\Sigma\theta_{fU} = 0$
Constant slot width	$\Sigma\theta_{fC} = \left(\frac{90m_{et}}{R_{e2} \tan\alpha_n \cos\beta_m}\right) \left(1 - \frac{R_{m2} \sin\beta_{m2}}{r_{c0}}\right)$
Modified slot width	$\Sigma\theta_{fM} = \Sigma\theta_{fC}$ or $\Sigma\theta_{fM} = 1,3 \Sigma\theta_{fs}$, whichever is smaller

Tabla 11 Ecuaciones para la suma de ángulos dedendum.

Fuente:ISO23509

- **Ángulos θ_{a2} , θ_{f2}**

La suma de los ángulos dedendum se reparte entre el piñón y la rueda utilizando las fórmulas de la Tabla 9. La forma cónica seleccionada por el proceso de corte determina qué fórmulas se utilizarán para determinar los ángulos dedendum de cada miembro.

Depthwise taper	Angles (degrees)
Standard	$\theta_{a2} = \arctan\left(\frac{h_{fm1}}{R_{m2}}\right)$ (C.6)
	$\theta_{f2} = \Sigma\theta_{fS} - \theta_{a2}$ (C.7)
Uniform depth	$\theta_{a2} = \theta_{f2} = 0$
Constant slot width	$\theta_{a2} = \Sigma\theta_{fC} \frac{h_{am2}}{h_{mw}}$ (C.8)
	$\theta_{f2} = \Sigma\theta_{fC} - \theta_{a2}$ (C.9)
Modified slot width	$\theta_{a2} = \Sigma\theta_{fM} \frac{h_{am2}}{h_{mw}}$ (C.10)
	$\theta_{f2} = \Sigma\theta_{fM} - \theta_{a2}$ (C.11)

Tabla 12 Ecuaciones para ángulos dedendum.
Fuente:ISO23509

Datos adicionales			
Tipo de datos I	x_{hm1}	0,5493	~
	k_{hap}	1,0000	~
	k_{hfp}	1,2500	~
	x_{smn}	0,0663	~
Tipo de datos II	k_d	2,0000	~
	c_{han}	0,2253	~
	k_c	0,1250	~
	k_t	0,1326	~
Angulo de presión normal	α_{dt}	20	°
	α_{dc}	20	°
	f_{alim}	1	~
Configuración para la profundidad del diente	$\Sigma\theta_{fU}$	0	°
	θ_{a2}	0	°
	θ_{f2}	0	°

Tabla 13 Valores de datos adicionales
Fuente: autor

A partir de los parámetros de entrada, datos iniciales y datos adicionales mostrados en la Tabla 13, se continuó con el proceso de diseño descrito por la norma ISO 23509 para el método 3, donde se estipulan cálculos completos para encontrar los valores de dimensionamiento del cono para el piñón y la rueda.

4.4 Ángulos de paso del piñón y la rueda

Para el método 3, se hace uso de un factor adimensional hipoide, el cual modifica los ángulos de paso del piñón y la rueda, al momento de establecer los valores de los ángulos de paso del piñón y la rueda, se debe de cumplir restricciones de diseño asociados a estos, para simplificar este proceso iterativo se realiza una macro de Excel la cual orienta su diseño en el diagrama de flujo de la Figura 8.

El fin de definir estos ángulos es encontrar un punto de cruce existente entre los conos de paso del piñón y la rueda. (ver Figura 9).

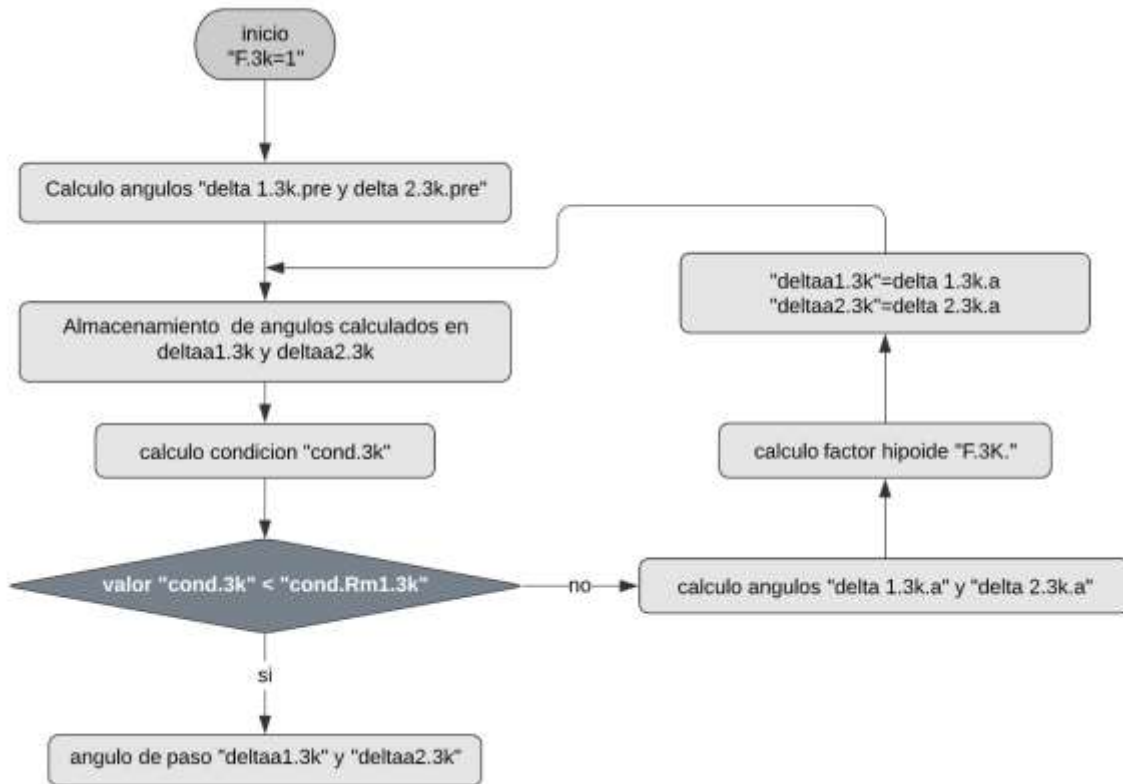
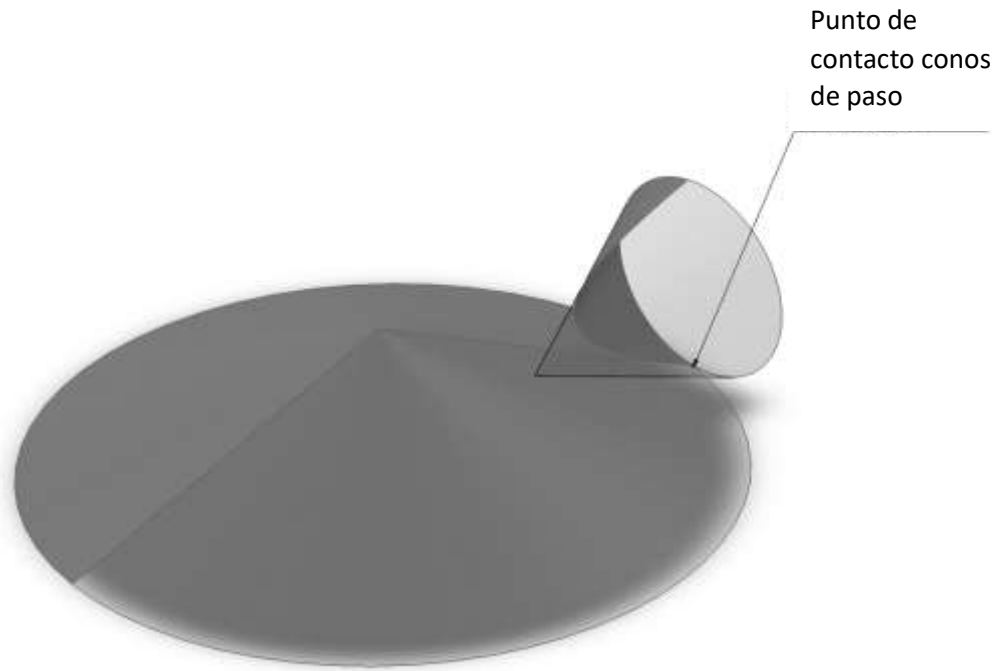


Figura 8. Diagrama de flujo iteración factor hipoide
Fuente: autor

La Tabla 14 muestra los valores de los ángulos de paso y factor adimensional hipoide finalizado el proceso iterativo.

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Factor dimensional hipoide	F.3k	1,26607263	~
Ángulo de paso del piñón	deltaa1.3k	23,8287137	mm
Ángulo de paso de la rueda	deltaa2.3k	65,2295466	mm

Tabla 14. Valores ángulos de paso y factor hipoide
Fuente: autor



*Figura 9. Punto de contacto entre los ángulos de paso
Fuente: autor*

El **Anexo 1** proporciona una descripción general sobre las variables usadas por la macro

Obtenido estos ángulos y las variables calculados por la norma ISO 23509 [4] se establecen los valores requeridos para el modelo CAD de revolución (ver figura 12), la Figura 10 y la Figura 11 muestran el posicionamiento de cada uno de estos.

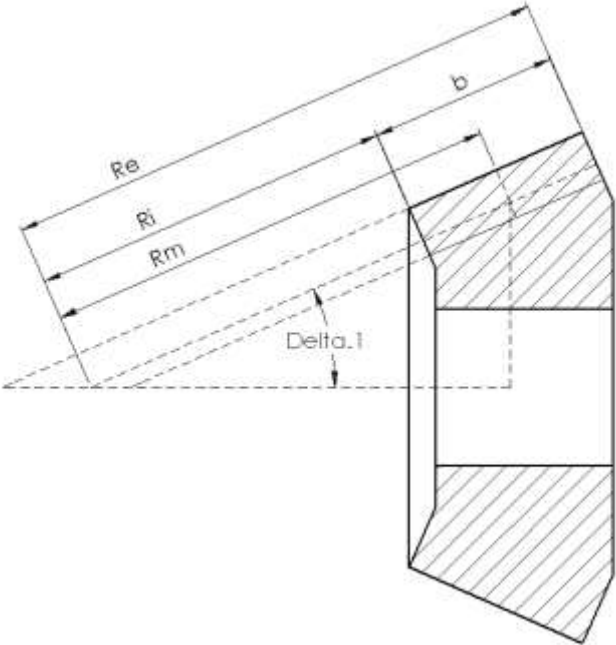


Figura 10. Ancho de cara y distancias del cono
Fuente: autor

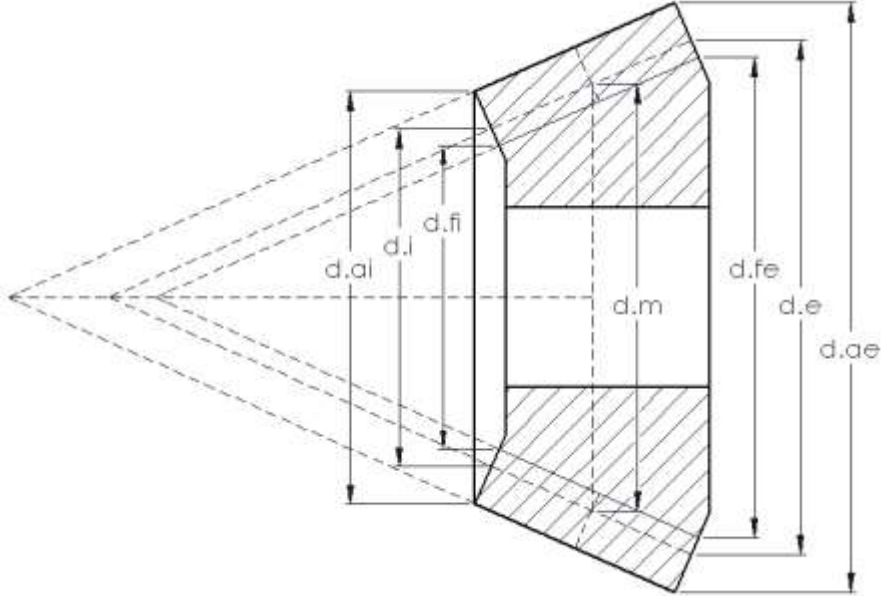


Figura 11. Diámetros de cono internos y externos del piñón.
Fuente: autor

La Valores para modelo por revolución. Tabla 15 presenta un resumen de los valores resultantes del proceso de diseño para las variables requeridas por el sólido de revolución.

variable	description	valor	unidad
b	ancho de cara del piñón	38,43	mm
Re	distancia de cono de paso exterior	111,97	mm
Ri	distancia del cono de paso interior	73,54	mm
Rm	distancia del cono medio	92,84	mm
delta.1	ángulo de paso del piñón	23,82	°
d.ai	diámetro exterior interno	72,64	mm
d.i	diámetro de paso cono interior	59,42	mm
d.fi	diámetro addendum interno	53,44	mm
d.m	diámetro de paso medio	75,01	mm
d.fe	diámetro addendum externo	84,49	mm
d.e	diámetro de paso cono externo	90,47	mm
d.ae	diámetro exterior externo	103,69	mm

Tabla 15. Valores para modelo por revolución.

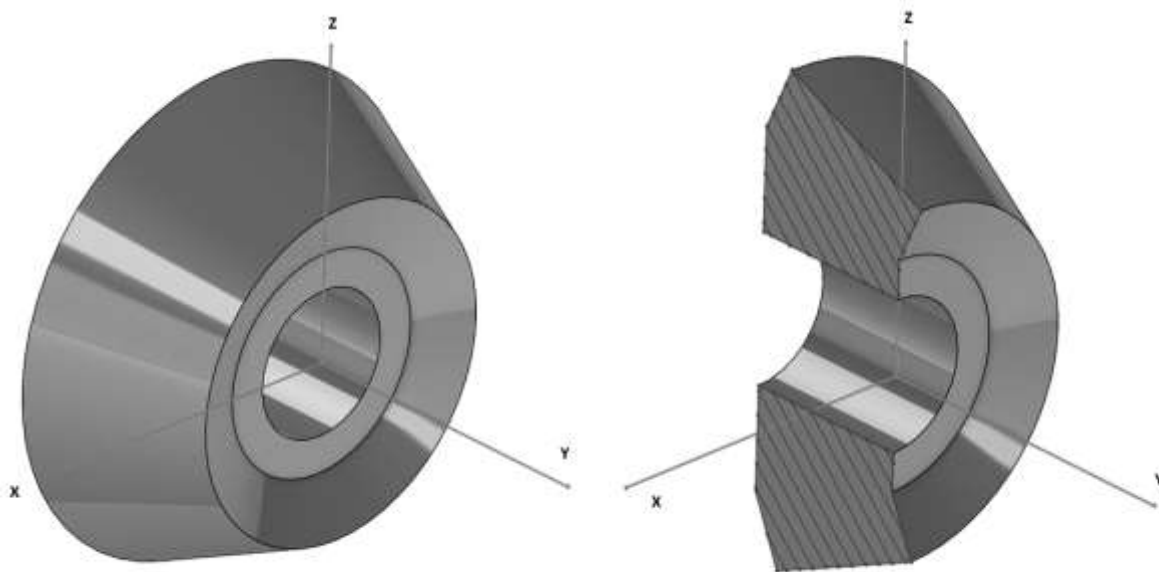


figura 12. Modelo CAD de revolución
Fuente: autor

4.5 Diseño del perfil del diente

La geometría del perfil del diente basada en las máquinas generadoras, no está relacionada directamente con los parámetros del piñón si no con las especificaciones y ajustes de la máquina, así el modelo matemático del perfil del diente se deriva sobre la base del proceso de fabricación FH [1].

Sin embargo, existen otras maneras de obtener la superficie dental utilizando aproximaciones e iteraciones para lograr un movimiento conjugado del par de engranajes, estas geometrías son posibles producirse por medio de máquinas CNC de 5 ejes mediante el fresado de contornos.[6]

La aproximación de *tredgold* emula un engranaje cilíndrico de dientes rectos equivalente al piñón cónico hipoide, con el cual se puede determinar el perfil del diente con las ecuaciones de diseño de engranajes cilíndricos rectos, en lugares específicos del perfil del diente como la curva involuta se aplicaron condiciones especiales debido a los ángulos de presión desiguales, la Figura 13 muestra un esquema de la proyección de los dientes con la aproximación de *tredgold*.

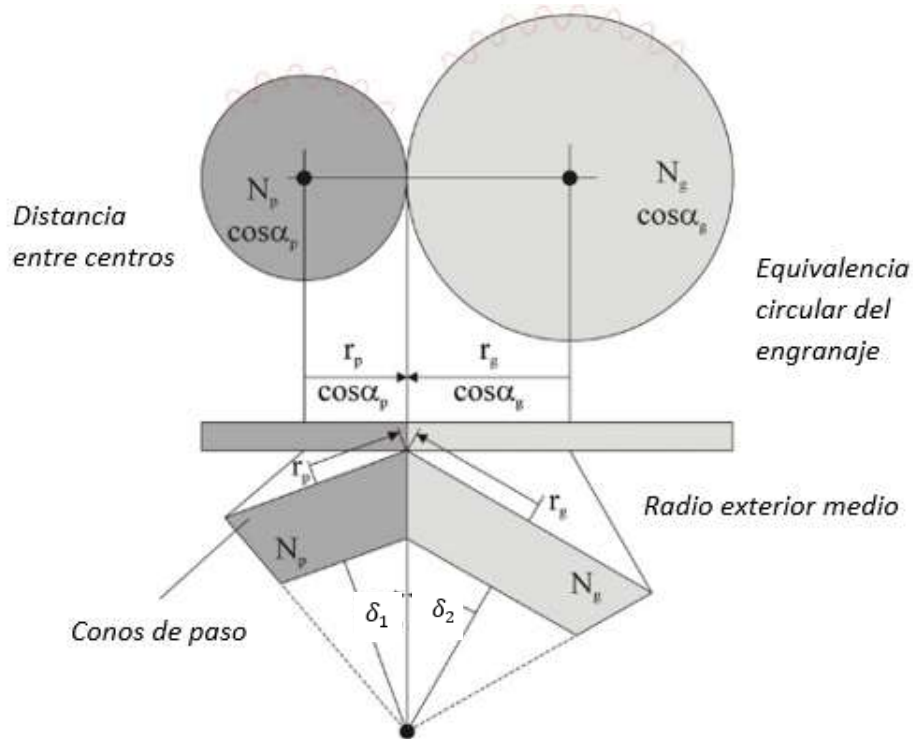


Figura 13. Representación aproximación de *tredgold*

Fuente: [6]

Con esta aproximación y los datos obtenidos por las ecuaciones (14),(15)y(16) se determinan los espesores en el punto medio del diente; la ubicación de cada uno de estos valores obtenidos en las ecuaciones previamente mencionadas se aprecian en la Figura 15 este perfil se realiza en tres secciones del cono del piñón, estas secciones se evidencian en la Figura 14.

$$s.mt1 = \frac{s.mn1}{\cos(\beta_{m1})} \quad (14)$$

$$d.mn1 = \frac{dm1}{((1 - \sin(\beta_{m1})^2 * \cos(\alpha_n)^2) * \cos(\beta_{m1}) * \cos(\delta_1))} \quad (15)$$

$$h.amc1 = h.am1 + 0,5 * d.mn1 * \cos(\delta_1) * (1 - \cos(\frac{s.mc1}{d.mn1})) \quad (16)$$

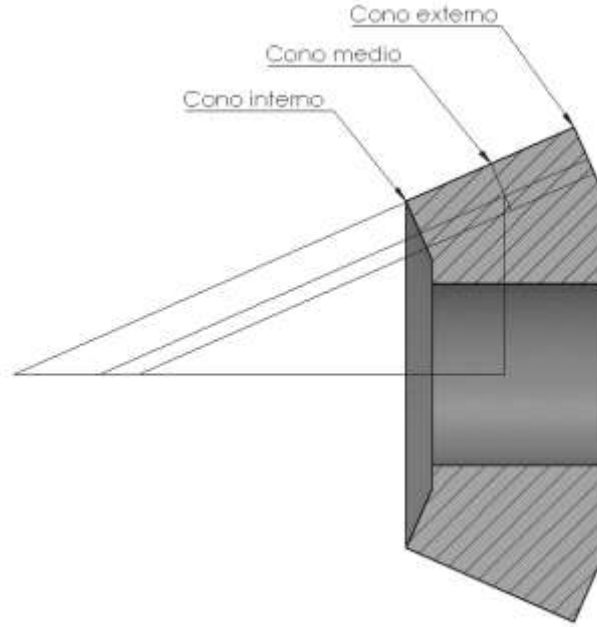


Figura 14. Secciones del cono del piñón
Fuente: autor

La curva involuta al ser asimétrica, debido a los ángulos de presión desiguales requiere de una orientación especial ver Figura 15, para esto se utilizaron los valores encontrados con las ecuaciones.(17),(18)y(19) Obteniendo así los valores descritos en la Tabla 16.

$$\alpha_{lim} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\delta_1) * \tan(\delta_2)}{\cos(zeta.mp)} * \left(\frac{R_{m1} * \sin(\beta_{m1}) - R_{m2} * \sin(\beta_{m2})}{R_{m1} * \tan(\delta_1) + R_{m2} * \tan(\delta_2)} \right) \right) \quad (17)$$

$$\alpha_{n1} = \alpha_{dt} + (f_{alim} * \alpha_{lim}) \quad (18)$$

$$\alpha_{n2} = \alpha_{dc} - (f_{alim} * \alpha_{lim}) \quad (19)$$

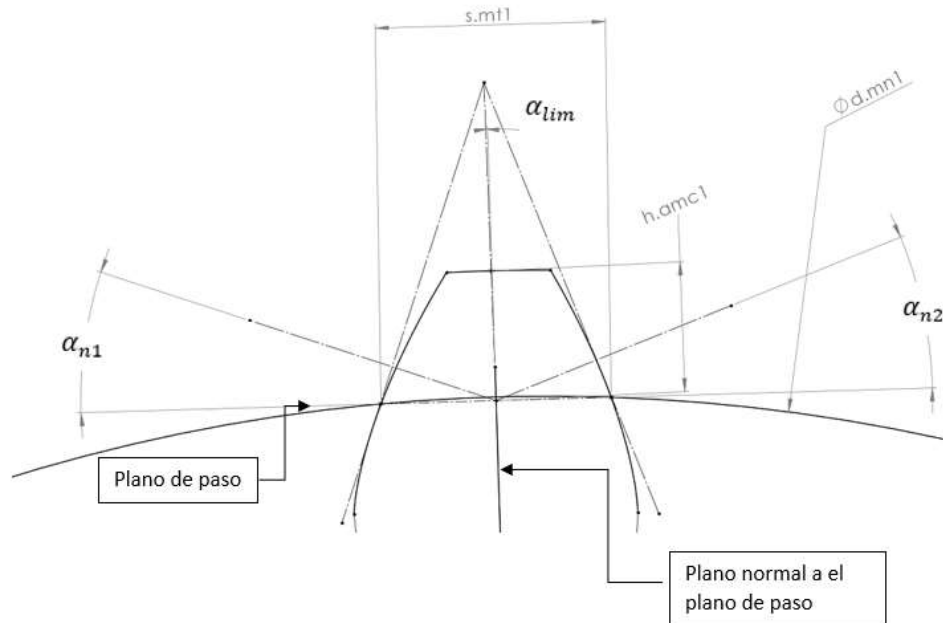


Figura 15. Espesor del diente y curvas involutas del lado conductor y no conductor del piñón

Fuente: Autor

Límite de ángulo de presión	α_{lim}	0,33077449
Angulo de presión normal generado flanco conductor	α_{n1}	20,3307745
Angulo de presión normal generado flanco conducido	α_{n2}	19,6692255

Tabla 16. valores ángulos de presión normal

Fuente: autor

La ecuación para la curva involuta del lado conductor y no conductor esta descrita por la ecuación mostradas en la tabla 12.

Curva involuta lado conductor	$\text{Circulo base} = d.mn1 * \cos(\alpha_{n1})$
	$x = (\text{"circulo base"}/2) * (\cos(t) + (t * \sin(t)))$
	$y = (\text{"circulo base"}/2) * (\sin(t) - (t * \cos(t)))$
Curva involuta lado no conductor	$\text{circulo base} = d.mn1 * \cos(\text{alfa. n. 2})$
	$x = (\text{"circulo base"}/2) * (\cos(t) + (t * \sin(t)))$
	$y = -(\text{"circulo base"}/2) * (\sin(t) - (t * \cos(t)))$

Tabla 17 Ecuaciones curvatura involuta lado conductor y no conductor

Fuente:[7]

El parámetro “t” tiene valores de 0 a 1. Este determina la longitud en la que se extiende las curvas involutas.

Croquis de los perfiles del diente en las tres secciones del cono del piñón, ver (Figura 16, Figura 17 y Figura 18).

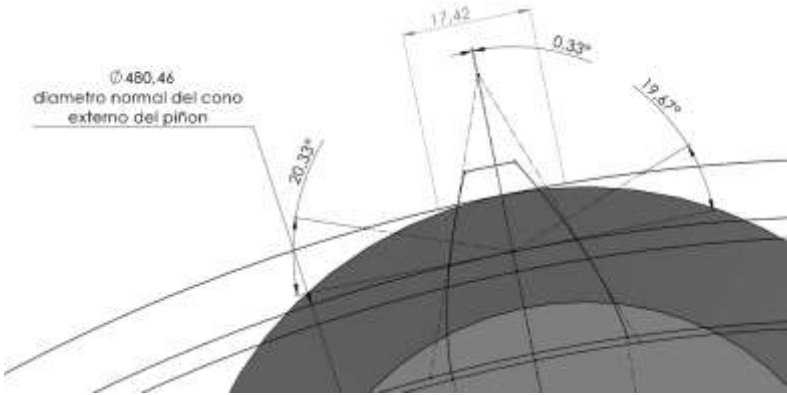


Figura 16. Perfil del diente cono externo
Fuente: autor

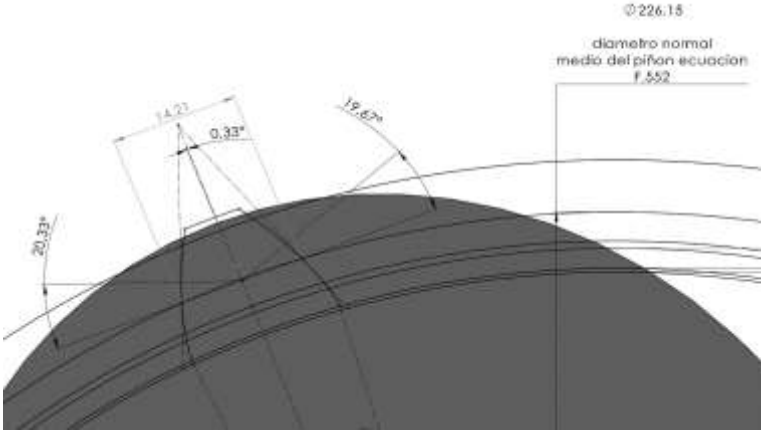


Figura 17. Perfil del diente cono medio
Fuente: autor

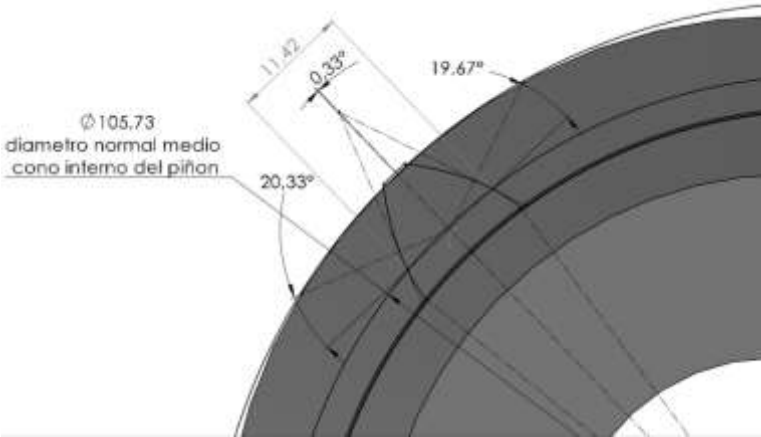


Figura 18. Perfil del diente cono interno
Fuente: autor

4.5.1 Parámetros de diseño para la epicicloide.

Para el camino a recorrer por los perfiles del diente sobre la superficie cónica del piñón se evaluó a partir del proceso de fabricación de FH, el cual tiene un movimiento en forma epicicloidal sobre el plano de paso del par de engranajes, el cual se proyectó sobre la superficie del piñón.

Al momento de especificar el conjunto de parámetros para generar la epicicloide, se tiene que definir algunas variables del proceso de corte de FH la Figura 19 establece el lugar de cada una de estas variables.

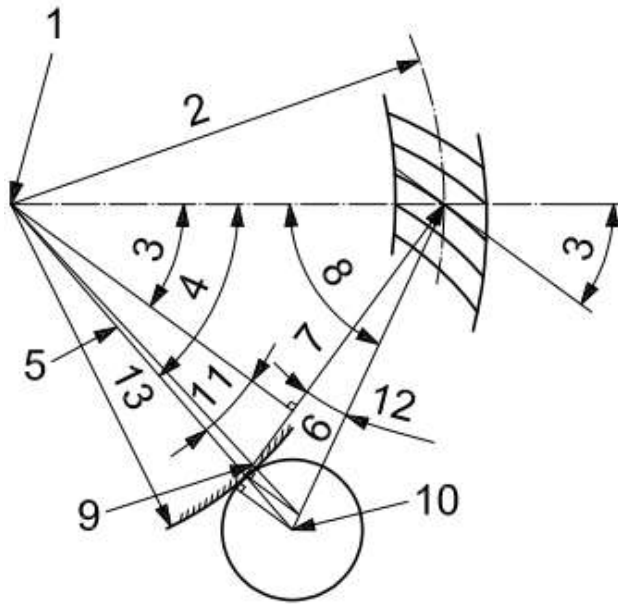


Figura 19. Esquema del plano de paso para proceso de corte por FH.

Fuente: [1]

1. Centro de engranaje de corona.
2. Distancia media del cono de la rueda (R_{m2})
3. Ángulo espiral (β_{m2}).
4. Ángulo intermedio (fi.2). "ecuación 12.204" [8]
5. Corona dentada al centro del cortador (Ro. p0).
6. Radio de corte (r_{c0}).
7. Radio medio de curvatura del diente longitudinal (Ro. mb).
8. Primer ángulo auxiliar (λ).
9. Centro de curvatura.
10. Centro de corte.
11. Segundo ángulo auxiliar ($\eta_{a.1}$).
12. Ángulo de avance del cortador. (η_i)
13. Radio del círculo base epicicloide (Ro. b)

Cada uno de estos valores son calculados según la norma ISO 23509 [4]. En el diseño particular de este trabajo la epicicloide en el plano de paso se aprecia en la Figura 20.

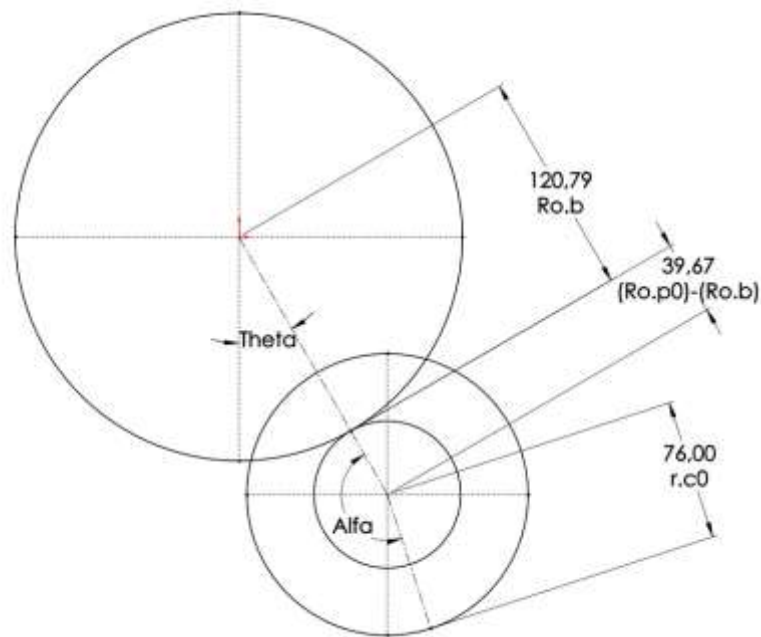


Figura 20. Esquema de circunferencias de la epicicloide

Fuente: autor

La epicicloide es desarrollada a partir de las ecuaciones ((20)(21)(22)) las cuales describen la posición rotacional del radio (r_{c0}), en un plano existente entre los conos de paso del piñón y la rueda. La Figura 21 muestra el desarrollo de la epicicloide en el plano de paso del par de engranajes.

	$Alfa = \frac{Ro.b}{Ro.p0 - Ro.b} * theta$	(20)
	$x = (Ro.b + (Ro.p0 - Ro.b) * sin(theta) + (r_{c0} * sin(theta + alfa)))$	(21)
	$y = (Ro.b + (Ro.p0 - Ro.b) * cos(theta) + (r_{c0} * cos(theta + alfa)))$	(22)

La sección de epicicloide que atraviesa la distancia media del cono de la rueda (R_{m2}) en el plano de paso se proyectó sobre la superficie del cono externo del piñón, La Figura 22 se aprecia la sección de epicicloide que cumple esta condición.

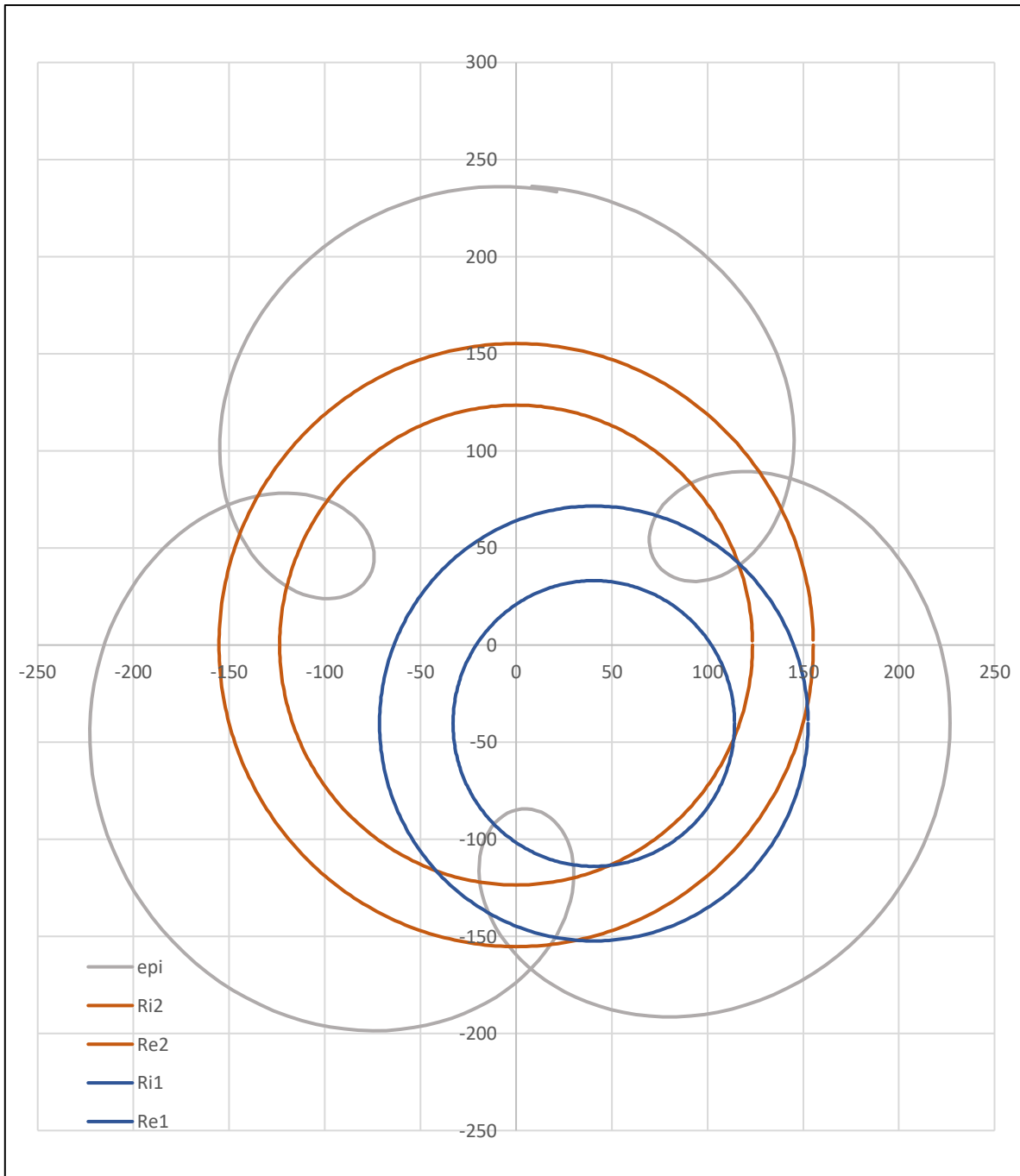


Figura 21. Desarrollo de la epicicloide plano de paso
Fuente: autor

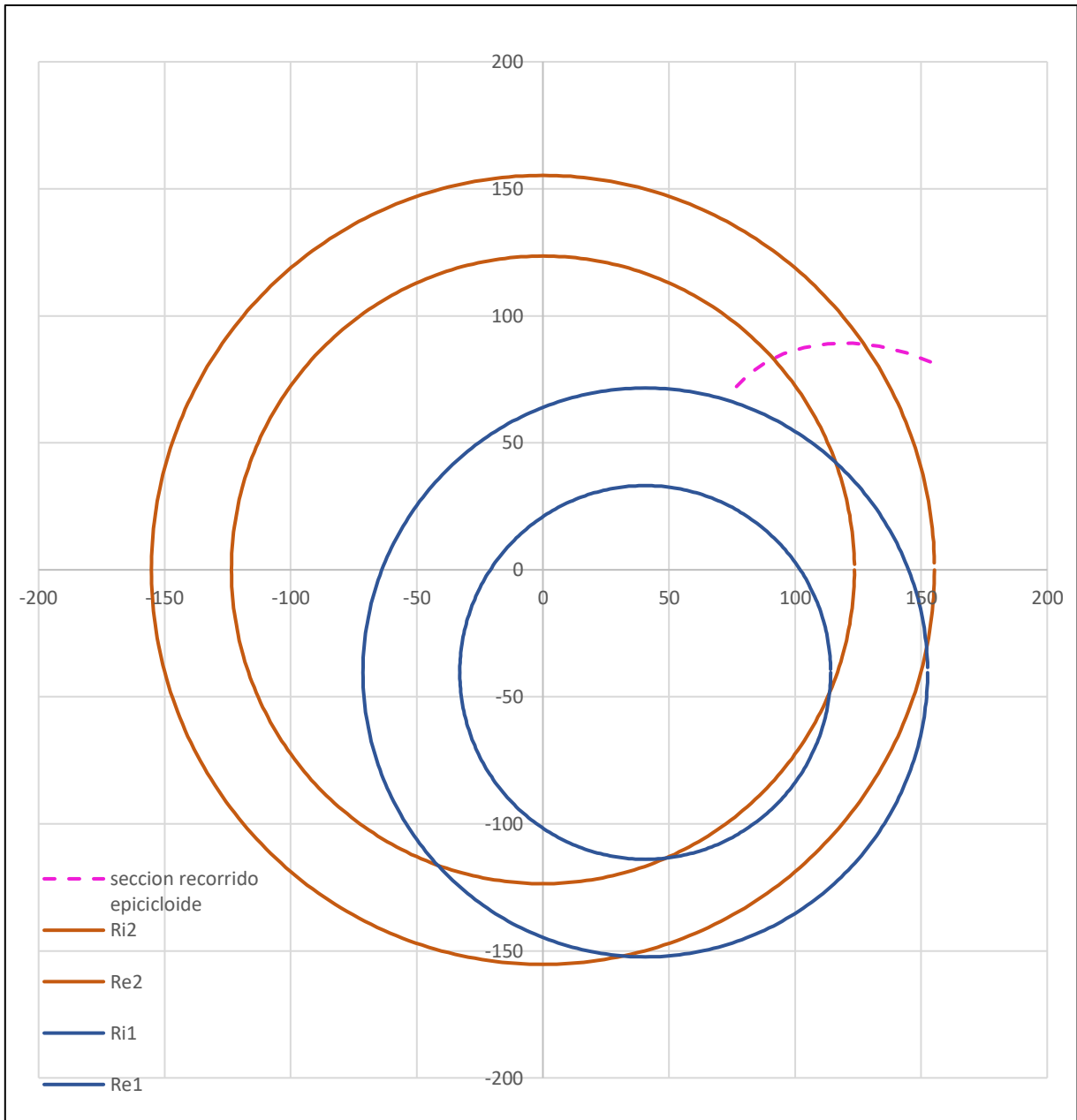
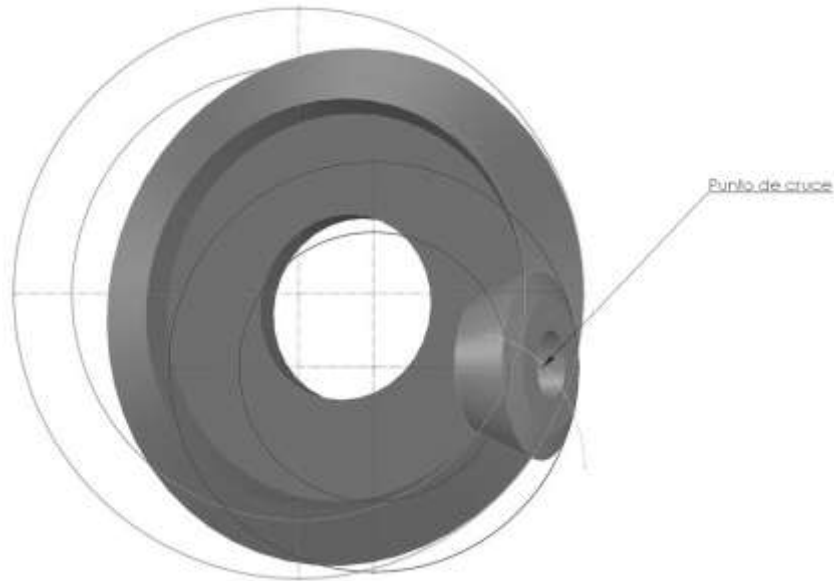


Figura 22. sección epicloide que atraviesa el radio medio de la rueda ($Rm2$)

Fuente: autor

A partir de esto en el modelo CAD se ubica la sección epicloide para que coincida con el punto de cruce común del piñón y la rueda (ver Figura 9).

La Figura 23 muestra la orientación de la sección de epicloide con el punto común del par de engranajes.



*Figura 23. Sección epicloide en el plano de paso modelo CAD
Fuente: autor*

4.5.2 Modelo tridimensional del piñón

Para el modelo tridimensional, se han creado muchos programas informáticos que respaldan el proceso de diseño de engranajes hipoidales y cónicos en espiral los programas más avanzados como KISSOFT define un modelo de geometría 3D basado en ISO 23509 que permiten determinar el tamaño, la posición y la forma del par de engranajes.[9]

El modelo tridimensional descrito en este trabajo utiliza una macro de Excel en base a la norma ISO 23509 que genera las variables de diseño que se pueden representar en cualquier sistema CAD, el modelado del perfil del diente del par de engranajes requiere acciones manuales en el sistema CAD, la Figura 24 muestra diferentes vistas del resultado de diseño del par de engranajes.

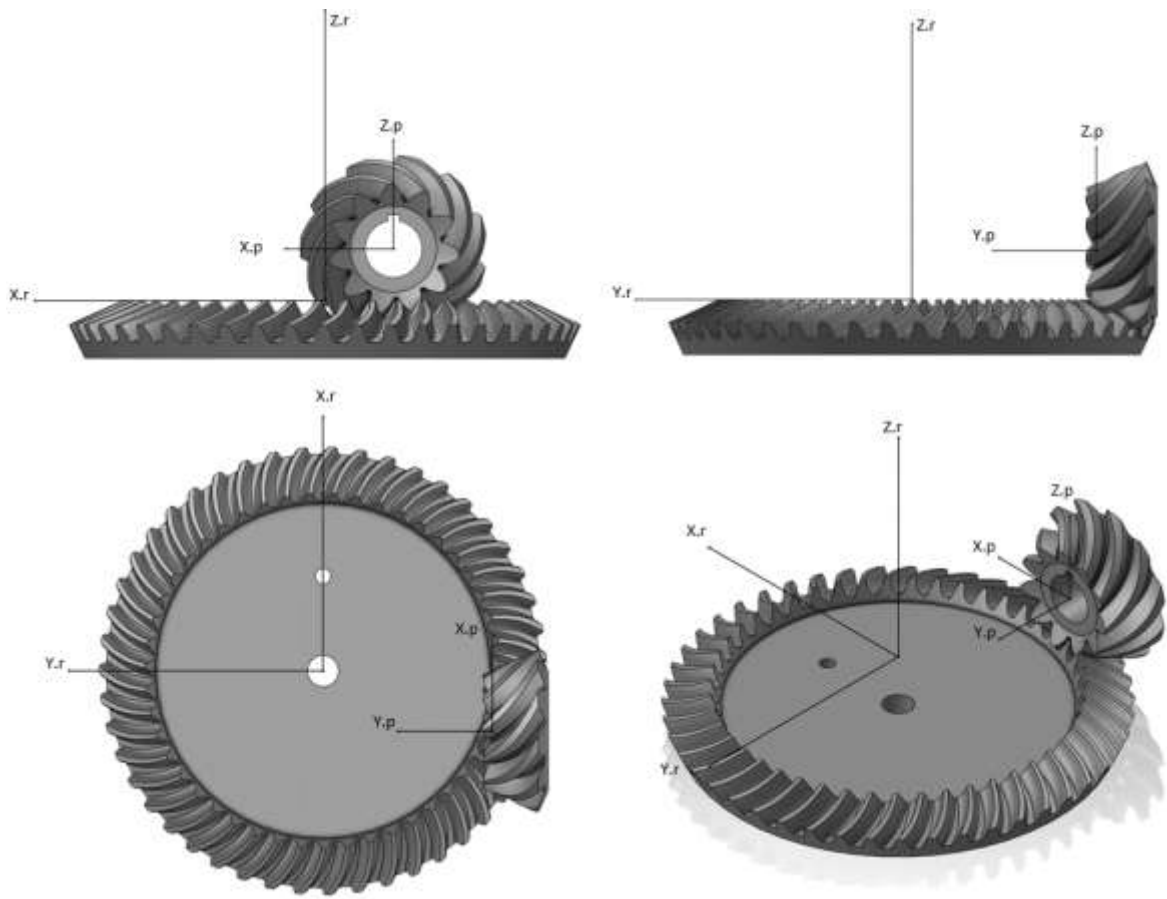


Figura 24. Vista par de engranajes
Fuente: autor

4.5.3 Manufactura aditiva del par de engranajes

Antes del proceso de manufactura por arranque de viruta para el piñón, se verifico el par cinemático, con el fin de garantizar un movimiento rotacional del piñón sobre la rueda sin atrapamientos entre los dientes. Figura 25 muestran el resultado de la manufactura aditiva del par de engranajes.



*Figura 25. Par de engranajes FDM
Fuente: autor*

5 PROCESO DE MANUFACTURA

Para el proceso de manufactura se plantearon 5 pasos los cuales describen la elección del dispositivo de sujeción hasta el montaje del sólido de revolución del piñón en el centro de mecanizado y el conformado de los dientes de este, La Figura 26 muestra el flujo de trabajo para la obtención del piñón.



Figura 26. Proceso de manufactura para piñón hipocíclico
Fuente: autor

5.1 Elección del dispositivo de sujeción

Los dispositivos de sujeción son usados en la industria manufacturera para ubicar de manera segura (colocar en una ubicación u orientación específica) piezas a trabajar, asegurando así que todas las piezas producidas mantendrán la conformidad y la intercambiabilidad [10].

Aproximadamente el 40% de las piezas rechazadas se deben a errores de dimensionamiento que se atribuyen a un diseño deficiente de los dispositivos de sujeción, las restricciones de movimiento adecuadas de una pieza de trabajo aseguran que las dimensiones y la forma de las superficies mecanizadas estén dentro de las tolerancias requeridas [11], La utilización de un dispositivo de sujeción otorga un funcionamiento suave y una transición rápida de una pieza a otra, reduciendo la necesidad de mano de obra calificada al simplificar la forma en que se montan las piezas de trabajo.

La base del diseño para los dispositivos de sujeción se basa en la estandarización de sus componentes, elementos estándar prefabricados con tolerancias relativamente estrechas. Esos elementos se pueden ensamblar en una variedad de dispositivos diferentes para ubicar y sujetar una variedad de piezas diferentes [12].

El número y puntos de fijación deben ser tales que los doce grados de libertad de una pieza de trabajo estén adecuadamente restringidos durante el mecanizado, esto se realizó con el principio de posicionamiento 3-2-1.

5.1.1 Dispositivo de sujeción

El principio de posicionamiento 3-2-1 restringe el movimiento de la pieza a lo largo de los ejes X-Y-Z, esto se logra eliminando los doce grados de libertad por medio de restricción de 6 puntos de localización y la adición de fuerzas externas.

Los 6 puntos de localización restringen rotación y traslación en los planos X-Y-Z, estos se conforman de 3 puntos en la base formando un plano, 2 puntos en el eje vertical forman una línea y 1 punto que ese encuentre perpendicular a los dos primeros, se examinan los puntos de posicionamiento y desplazamiento de la pieza de trabajo en sus diferentes vistas (ver Figura 27).

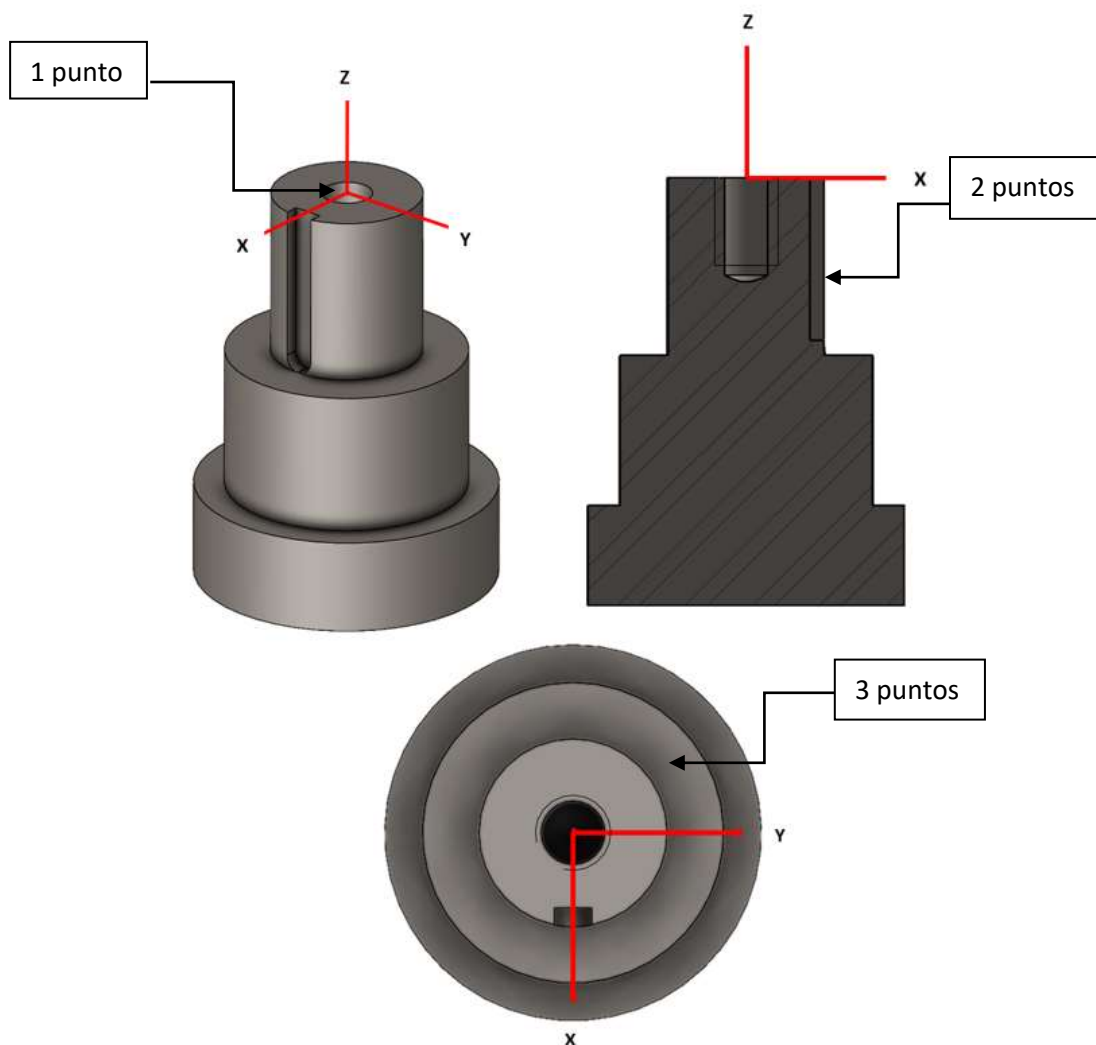


Figura 27. Dispositivo de sujeción
Fuente: autor

5.1.2 Restricción de los grados de libertad

El eje del dispositivo de sujeción visto en el plano superior(X-Y) elimina el movimiento de traslación y rotación de los ejes X-Y, En el plano lateral (X-Z) el cambio de sección de diámetros genera un apoyo que evita el desplazamiento del piñón en sentido negativo del eje Z. restringiendo así 9 de los 12 grados.

Para eliminar los grados de libertad faltantes se realizaron operaciones en el dispositivo de sujeción que aplicaran restricciones en la pieza de trabajo, tales como agujeros roscados para hacer uso de un tornillo de anclaje que evita el movimiento lineal en sentido positivo del eje Z y cuñas que evitan el movimiento rotacional sobre el eje Z.

5.1.3 Dimensionamiento del dispositivo de sujeción

El diámetro del material usado es de $(2\frac{1}{2}$ in), posee dos cambios de sección, el primero de estos es de 2 in por una longitud de 30 mm espacio en el cual se ubicó el comparador de caratulas para centrar el sujetador, el segundo cambio de sección es el diámetro del agujero del piñón, el cual es de $(1\frac{1}{4}$ in), esta última reducción dispone del alojamiento para la cuña mackey de $(\frac{1}{4}$ in) y agujero roscado de $(\frac{1}{2}$ x13). para tornillo de anclaje. La Figura 28 muestra las características del sujetador.

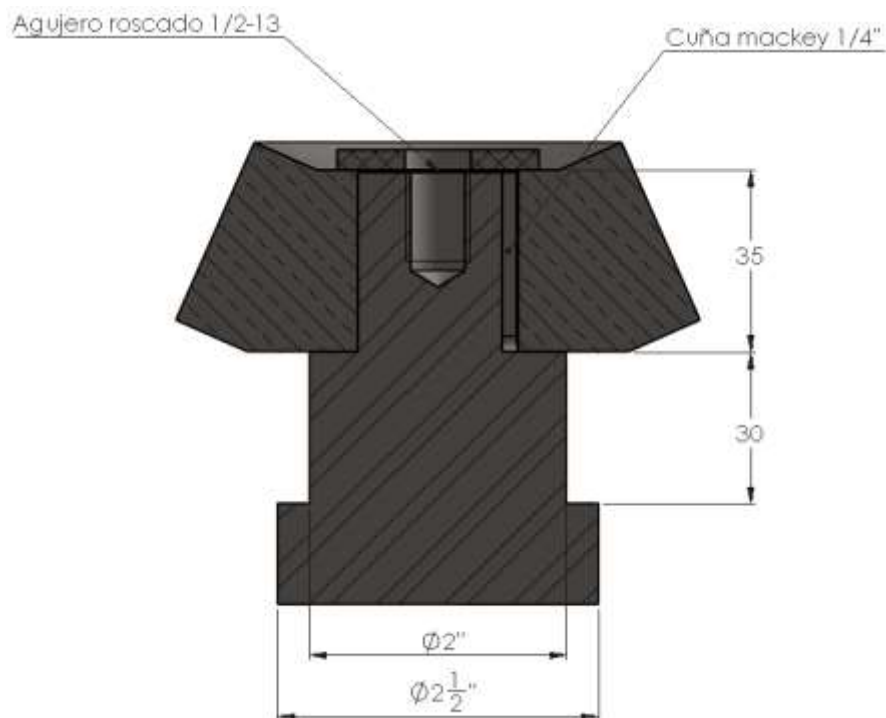


Figura 28. Ensamble sujetador y piñón
Fuente: autor

5.2 Mecanizado del perfil de revolución

Para el desarrollo de este proceso se tuvo en cuenta la medida del material comercial que circunscriba la geometría del piñón y dimensiones de herramientas a usar, de estas características depende el tiempo de mecanizado del perfil de revolución, La Figura 29 presenta la secuencia de trabajo realizada para la obtención del piñón de revolución.

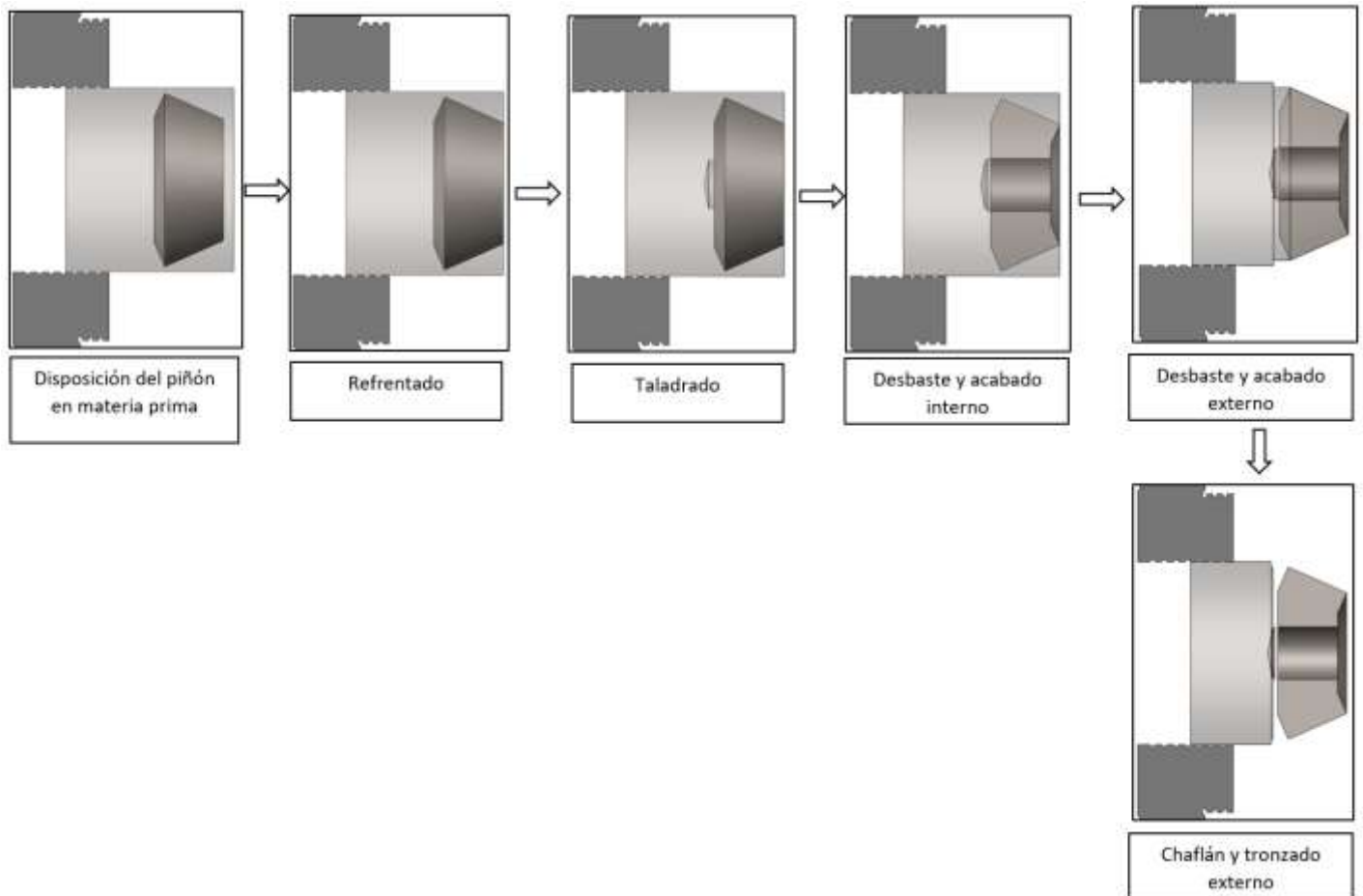


Figura 29 secuencia de trabajo piñón de revolución
Fuente: autor

5.3 Componentes montaje virtual

Para reducir errores en la manufactura, las estrategias de mecanizado realizadas en los softwares CAM son verificadas teniendo en cuenta desplazamientos y posiciones de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo, este proceso es comúnmente realizado sin la simulación y verificación integrada del proceso de manufactura. sin embargo, La geometría compleja del piñón hipoide exige que la simulación sea más rigurosa y tenga en cuenta la máquina a usar y sus características técnicas como la velocidad máxima del husillo para las herramientas de corte seleccionadas y la cinemática de la máquina, la Tabla 18 presenta los valores de las características técnicas de la maquina usada.

		GTX-210
Desplazamientos	Recorrido XYZ	320x450x380 mm
	Rango de inclinación del eje B	-40°~110°
	Ángulo de rotación del eje C	360°
	Tamaño máximo de la pieza trabajada	ø200*160L
	Nariz del husillo a la mesa de trabajo	0-380 milímetros
Velocidad de Desplazamiento	Eje XYZ	36 m/min
Diámetro de la mesa de trabajo del eje C.		ø210
Diámetro del agujero de centrado.		ø40H7
Ranura T	estándar	12H7 mm*1
	opcional	
Mesa de trabajo Máx.	Eje B	25 rpm
	Eje C	25 rpm
Peso máximo de la pieza de trabajo		50 ~ 75 kgs

Tabla 18. Características técnicas FINITECH GTX-210
Fuente: [FINITECH MÁQUINA HERRAMIENTA CO., LTD.](#)

5.3.1 Máquinas virtuales

Para la simulación del proceso de mecanizado, se realizó el desbaste y acabado del perfil del diente en un centro de mecanizado vertical marca FINITECH modelo GTX-210 (ver Figura 30).

El proceso de mecanizado virtual es realizado en un modelo tridimensional de la maquina FINITECH modelo GTX-210, elaborado por la universidad santo Tomas donde se han realizado trabajos relacionados con modelado de engranajes.

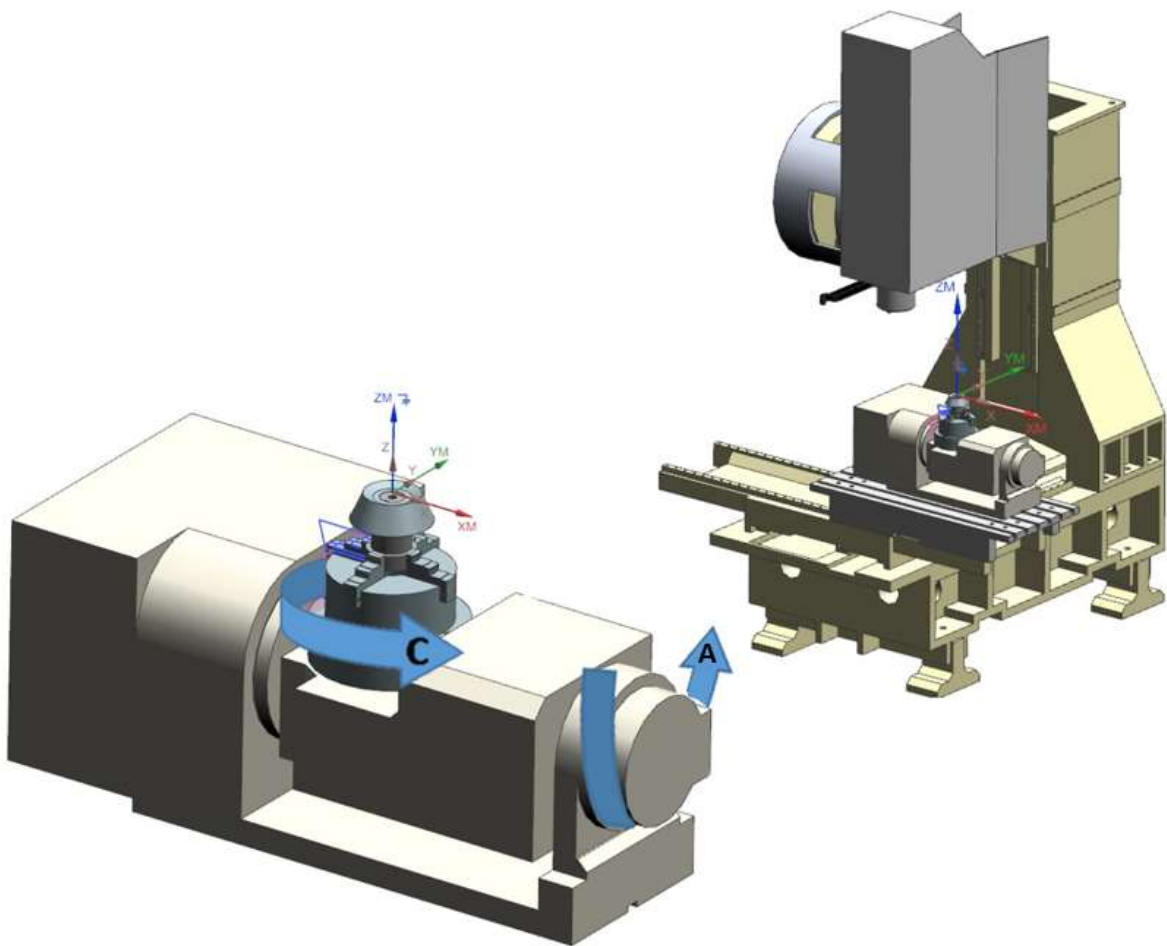


Figura 30. Máquina FINITECH GTX-210

5.3.2 Herramientas de corte

Al seleccionar la herramienta se verificó la menor distancia entre los vértices de la raíz del diente Figura 31, para el proceso de desbaste se usó una fresa plana de diámetro de 3 mm (ver Figura 32) para dejar el menor volumen posible para la herramienta de acabado. Dejando un sobre material de 4 décimas de milímetro, para el proceso de acabado se usó una fresa de punta esférica de diámetro 2 mm (ver Figura 33).

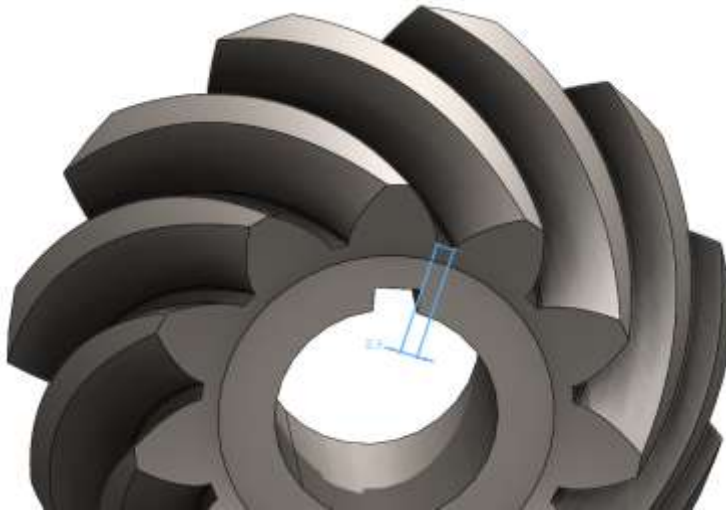


Figura 31. distancia mínima entre dientes
Fuente: autor

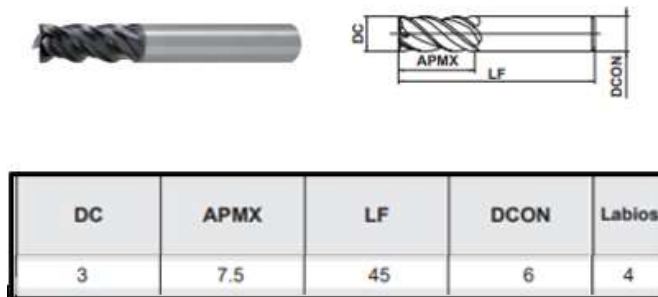


Figura 32. Fresa plana herramienta de desbaste
fuente: <http://www.mitsubishicarbide.com>.

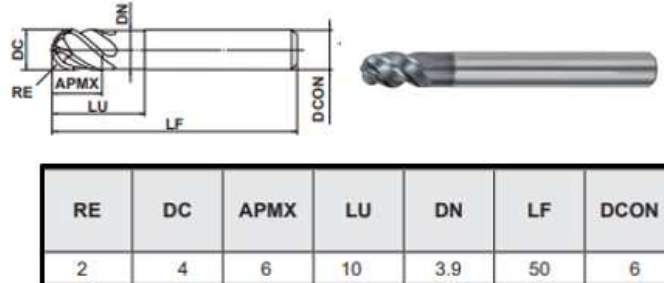


Figura 33. Fresa redonda herramienta de acabado
fuente: <http://www.mitsubishicarbide.com>

6 PROPUESTA CAM PARA LA OBTENCION DE LOS DIENTES DEL PIÑÓN

6.1 Trayectoria de desbaste y acabado estrategias “turbomachinery milling”

Para generar las trayectorias del desbaste y acabado de los dientes del piñón se emulo su geometría a la geometría de un alabe en un impeler, con el fin de hacer uso de las operaciones de mecanizado.

El software NX *Turbomachinery Milling* simplifica el proceso de programación NC para mecanizar en 5 ejes piezas rotacionales con múltiples alabes, tales como *blisks* e *impellers* para motores de avión, maquinaria y equipamiento para la generación de energía y como resultado se obtiene menores tiempo de mecanizado, mejores acabados superficiales y una vida más larga de la herramienta.[13]

De esta manera para la selección de los alabes en un *impeller*, en el piñón hipoide se seleccionaron las superficies del diente, La Figura 34 muestra las partes de la geometría que se deben seleccionar para identificar las áreas de corte.

Los parámetros de corte usados para las operaciones de desbaste y acabado del diente del piñón son especificados de mejor manera en el **Anexo 2**.

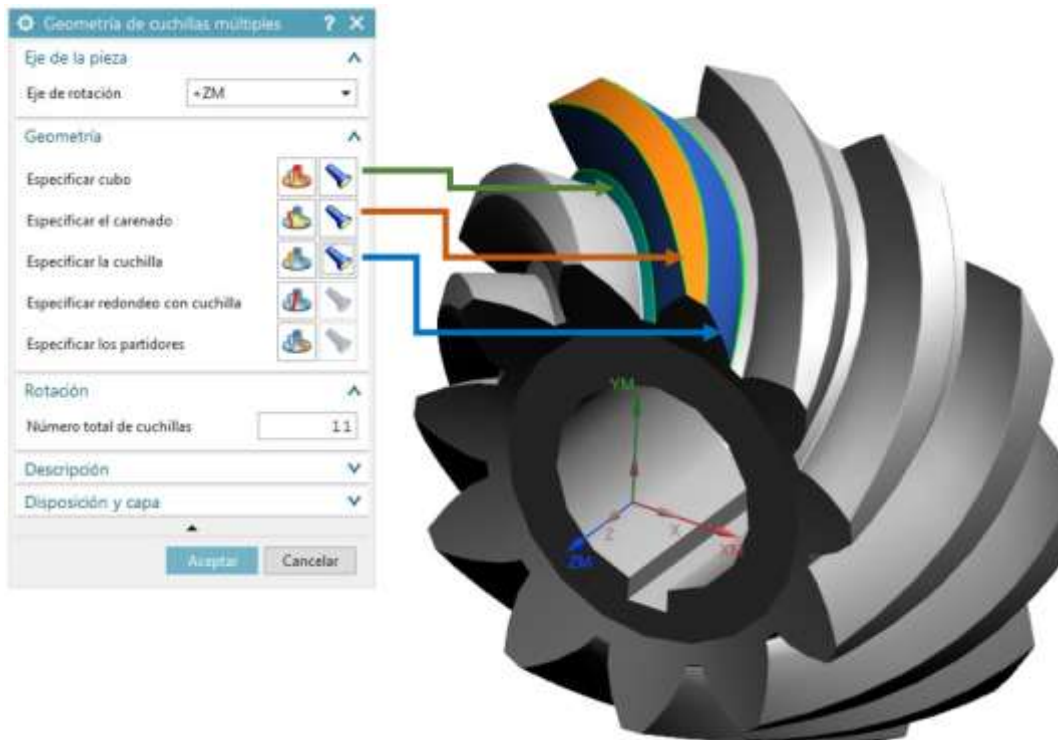


Figura 34 geometría del impelle emulado al piñón hipoider reconocidas por NX
Fuente: autor

6.1.1 Desbaste del diente con *Turbomachinery Milling*

Para el desbaste del área comprendida entre los dientes del piñón se hizo uso de la operación "*Impeller Rough*", la cual genera cortes constantes entre el cono interno y cono externo del piñón, se estableció un sobre material de 0.2mm para cada flanco para el proceso de acabado.

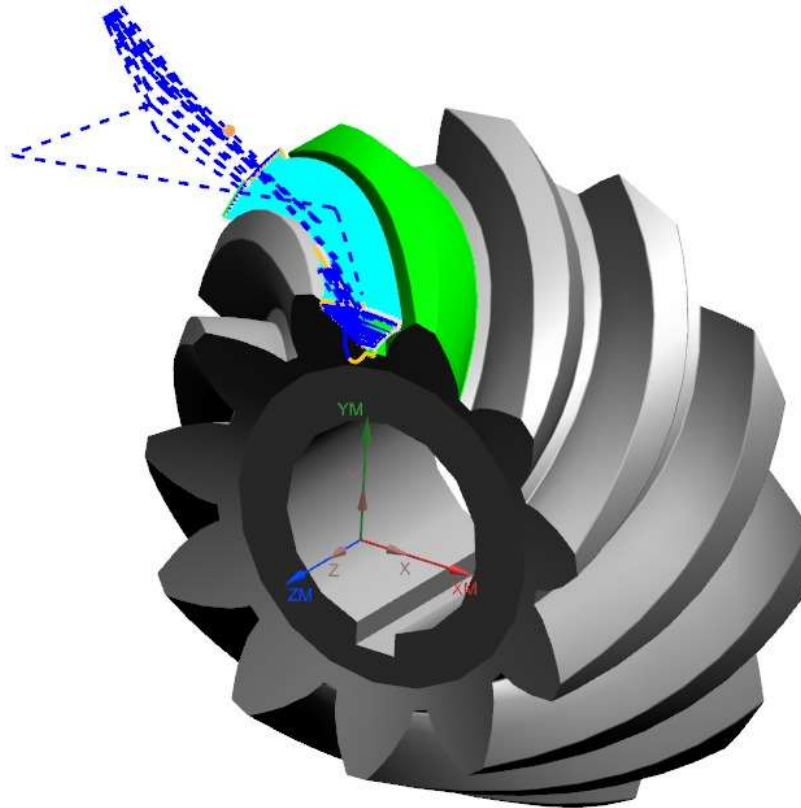


Figura 35 Resultado de la estrategia de la operación "*Impeller Rough*"
Fuente: autor

Para poder programar la operación "*Impeller Rough*" la cual hace uso de 5 ejes, requiere seleccionar algunos parámetros que disponen el cuadro de dialogo en el modo de manufactura de NX (ver figura), estos parámetros dependen mayormente de la geometría de la herramienta a usar.

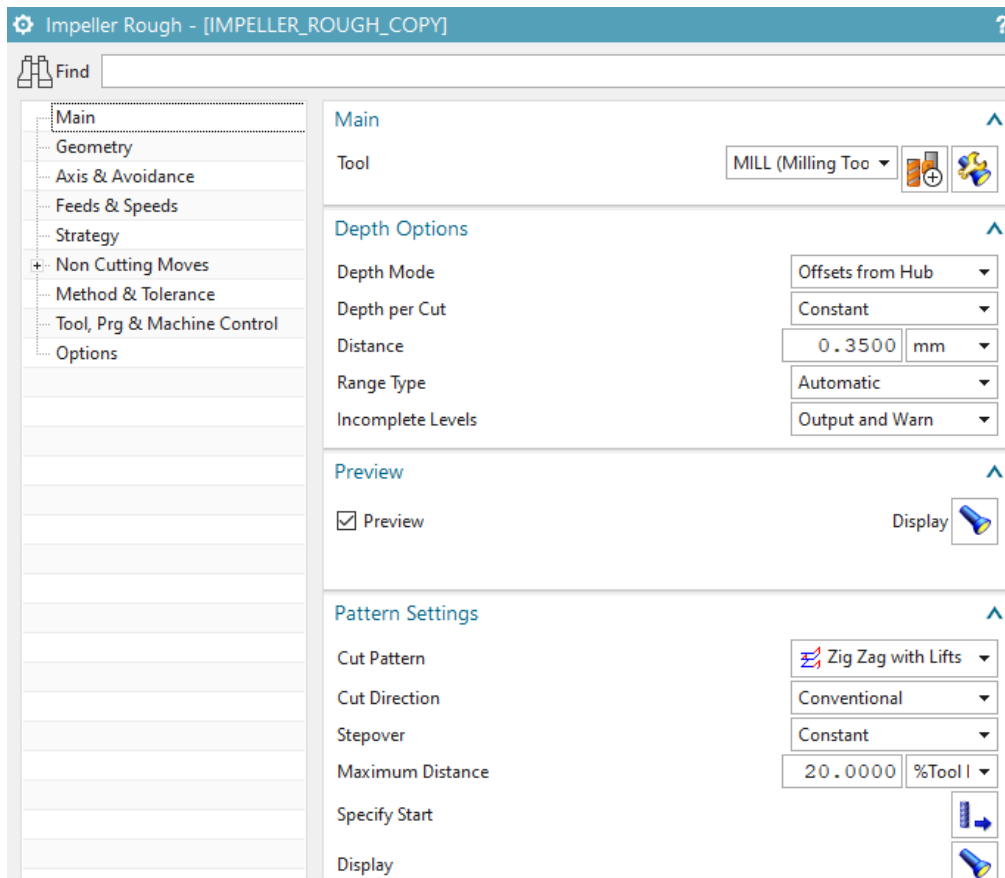


Figura 36 Cuadro de dialogo dirección y profundidad de corte desbaste

En el cuadro de diálogo de la figura (Figura 36) se seleccionó el modo de profundidad “*offset from hub*” con esto y en conjunto con profundidad de corte genera el número de pasadas, en la opción de ajustes de patrón de corte seleccionamos zigzag con el fin de evitar el enterramiento de la herramienta dentro del área de corte al inicio y fin de la pasada.

La anterior estrategia presenta buenos resultados debido a que minimiza el enterramiento de la herramienta en los niveles de corte, evitando marcas en la geometría del perfil del diente, el resultado de la simulación (Figura 37) fueron los siguientes:

- La herramienta en su trayectoria entra fuera de la superficie selecciona lo que garantiza un corte completo en el área entre los dientes del piñón.
- El sobre material que deja la operación (0.49 mm) es apto para realizar una operación de acabado eficiente.
- La simulación por medio de la máquina virtual no presenta colisiones.
- Tiempo aproximado de mecanizado (24 min) por diente

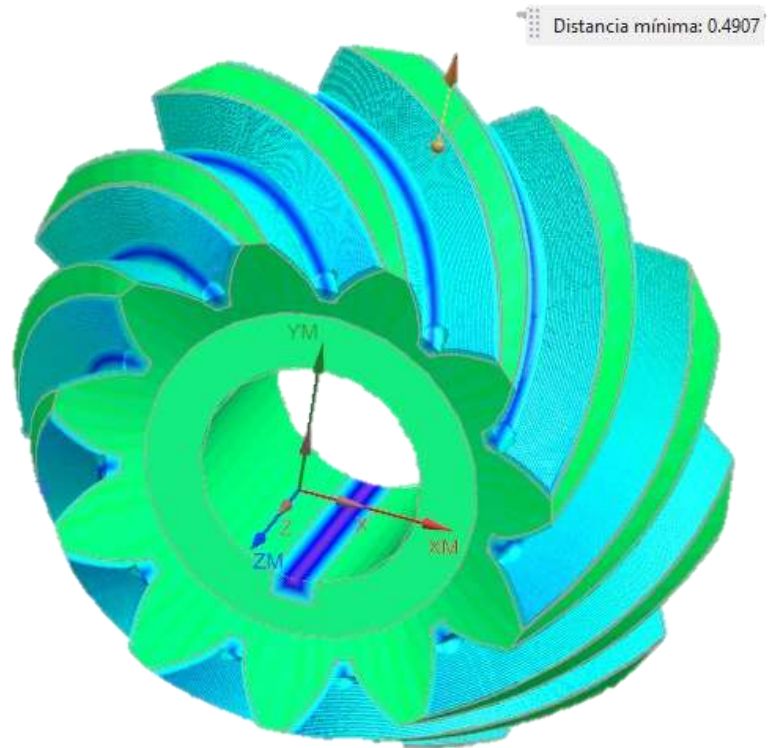


Figura 37. Resultado operación de desbaste. "Impeller Rough"
Fuente: autor

6.1.2 Acabado del diente con *Turbomachinery Milling*

Para realizar el acabado del diente del piñón se hizo uso de la operación de acabado “impeller Blade finish”, la estrategia seleccionada realiza el contorno de la superficie del diente cortando en profundidades constantes sobre material dejado previamente en el desbaste.

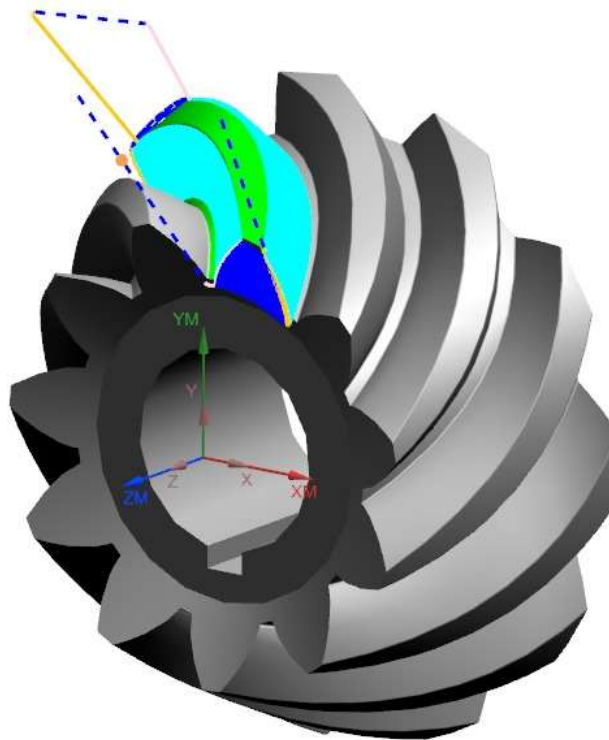


Figura 38 Resultado estrategia, operación “Impeller blade finish”

Fuente: autor

Para poder programar la operación “impeller blade finish” la cual de igual manera que la operación de “Impeller Rough” hace uso de 5 ejes, requiere seleccionar algunos parámetros que disponen en los cuadros de dialogo de las Figura 39 y Figura 42, estos parámetros dependen de la geometría de la herramienta y los ángulos de inclinación “lead y tilt”, el efecto del valor de estos ángulos dará resultado a la rugosidad superficial del perfil del diente.

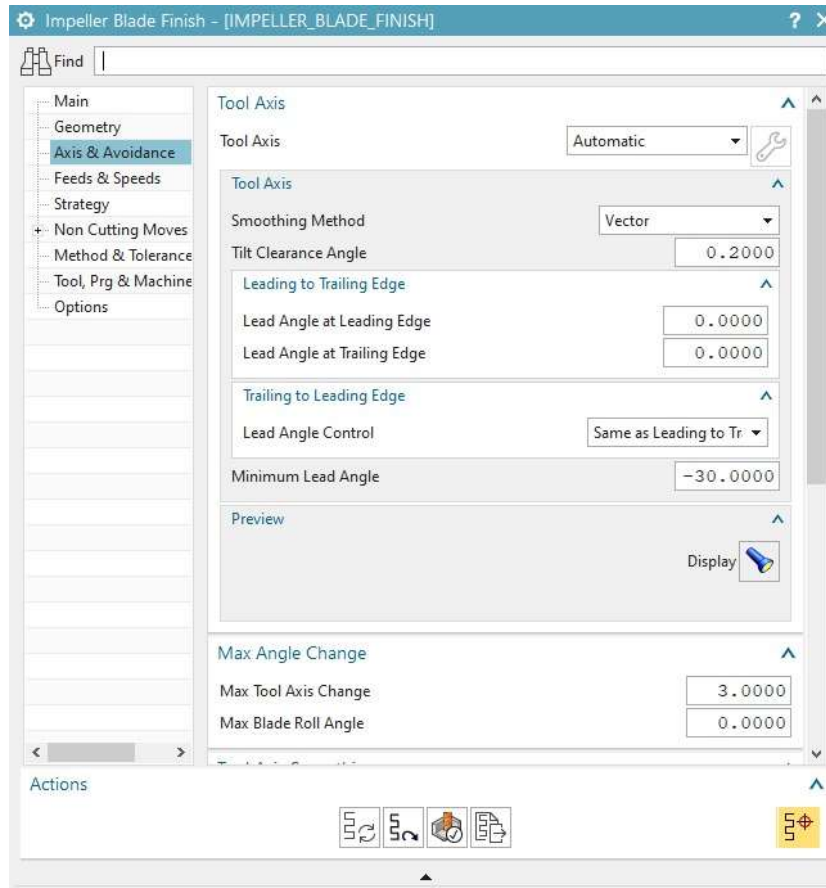


Figura 39. Cuadro de dialogo ángulos "tilt" y "lead"

el cuadro de dialogo del eje de la herramienta (ver Figura 39) especificamos que el ángulo de la herramienta sea automático de acuerdo al vector normal de la superficie a mecanizar, los ángulos "tilt clearance angle" y "lead angle control", son valores generados por el software de acuerdo a la superficie a mecanizar, El valor resultante para los ángulos "lead y tilt" son observados en las imágenes Figura 40y Figura 41.

El ángulo lead (ver Figura 40) se encuentra en un rango de inclinación aproximado de (0 a 5 grados).

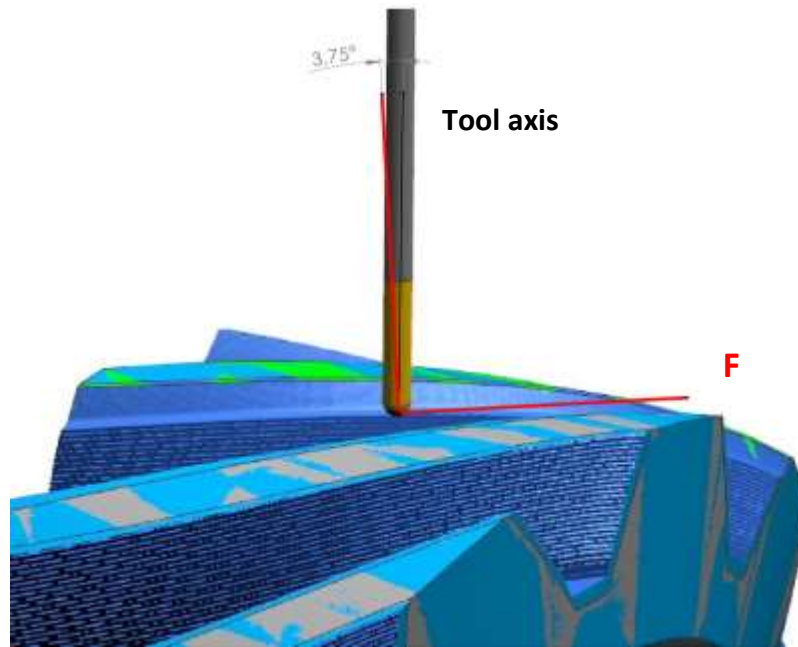


Figura 40 Ángulo de inclinación "lead" operación de acabado

El ángulo tilt (ver Figura 41) se encuentra en un rango de inclinación aproximado de 45 a 60 grados con respecto al vector normal a la superficie, debido a que la operación restringe la colinealidad del eje de la herramienta con el vector normal de la superficie para evitar colisiones con los demás dientes del piñón.

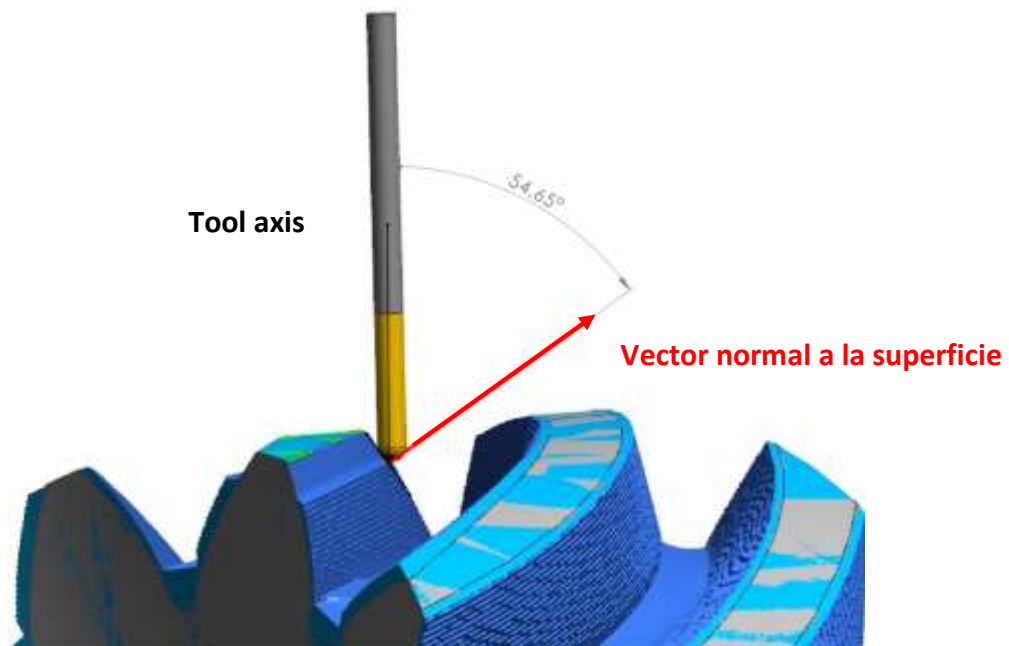


Figura 41 Ángulo de inclinación "tilt" operación de acabado

Para la operación del cuadro de dialogo (ver Figura 42) especificamos la dirección de corte “*side of cut*”, esta opción indica el flanco del diente a mecanizar, se estableció en izquierdo y derecho con la finalidad de realizar ambos flacos del diente y no depender de otra operación de acabado, en las opciones modo del corte “Depth mode” y “depht per cut”, darán el número de pasada, el valor establecido para la profundidad por corte es de 0.2mm.

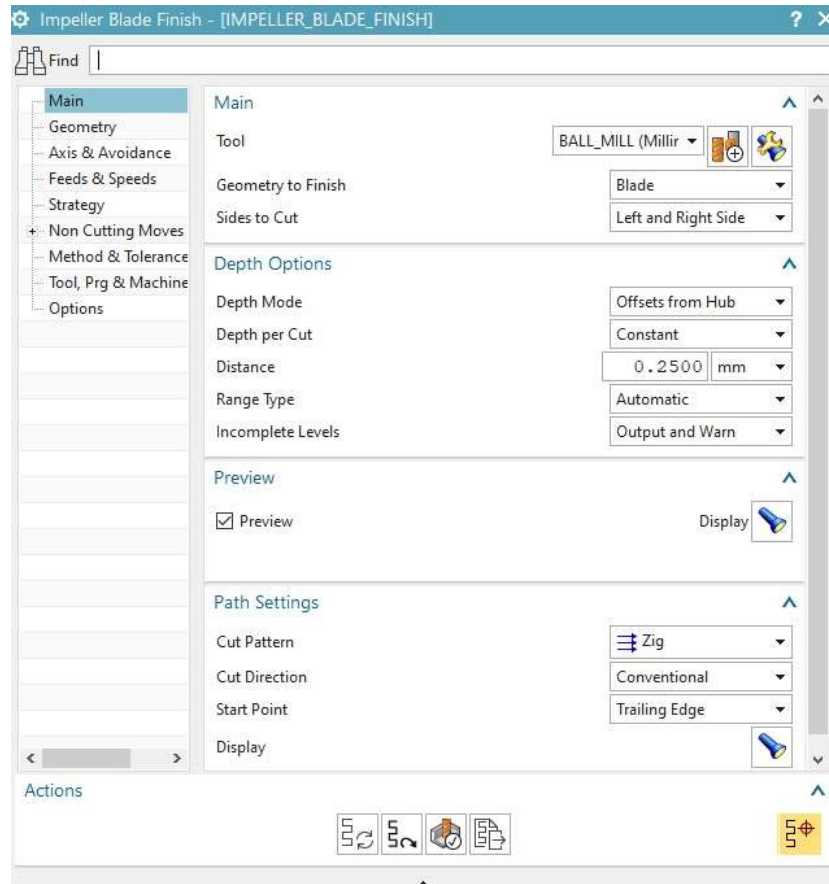


Figura 42. Cuadro de dialogo dirección y profundidad de corte acabado.

La estrategia de acabado resulta adecuada para la eliminación del material restante, evitando separaciones de la herramienta con la superficie del diente durante el mecanizado, El resultado de la simulación (Figura 43) fueron los siguientes:

- La herramienta en su trayectoria garantizó un proceso de corte homogéneo, lo que elimina marcas de enterramiento.
- El sobre material que deja la operación es menor a una centésima de milímetro garantizando las medidas del modelo CAD.
- La simulación por medio de la máquina virtual no presento colisiones.
- Tiempo aproximado de mecanizado (50 min) por diente

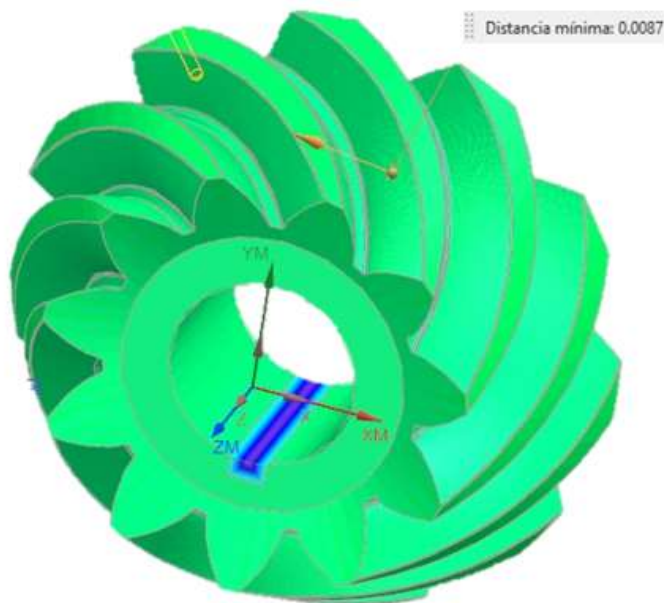


Figura 43. Resultado operación de acabado. "Impeller Blade finish"
Fuente: autor

6.2 Trayectorias de desbaste y acabado 4+1 ejes

Se identificó las limitaciones del centro de mecanizado de la universidad santo tomas para realizar la lectura de las operaciones previas 6.1, debido a que el código generado posee desplazamientos con 5 ejes simultaneo; para contrarrestar esta limitación se plantearon algunas estrategias las cuales generan códigos con 4+1 ejes ,estas operaciones son, "rotary roughing" la cual permite alinear el cono del piñón para que este se posicione perpendicular al eje z y generar cortes a niveles constantes , La operación "variable_contour", facilita la limitación del número de ejes usados, permite configurar la programación entre 3,4 y 5 ejes Los pasos descritos para cada uno de estas estrategias son descritos en las operaciones de mecanizado.

6.2.1 –Marcación de los dientes del piñón “variable_contour”

Esta operación delimita y permite verificar el área a mecanizar. esta operación permitirá realizar una inspección dimensional de los espesores de los dientes en los conos externo e interno del piñón.

Para poder programar la operación “variable_contour”, se seleccionó el método de curvas y puntos que requiere de la selección de líneas guías las cuáles serán la traza de la herramienta y el valor para el ángulo tilt será el encargado de posicionar de manera perpendicular el cono del piñón con respecto a el eje de la herramienta La Figura 44 muestra el valor del angulo tilt y las lineas guías.

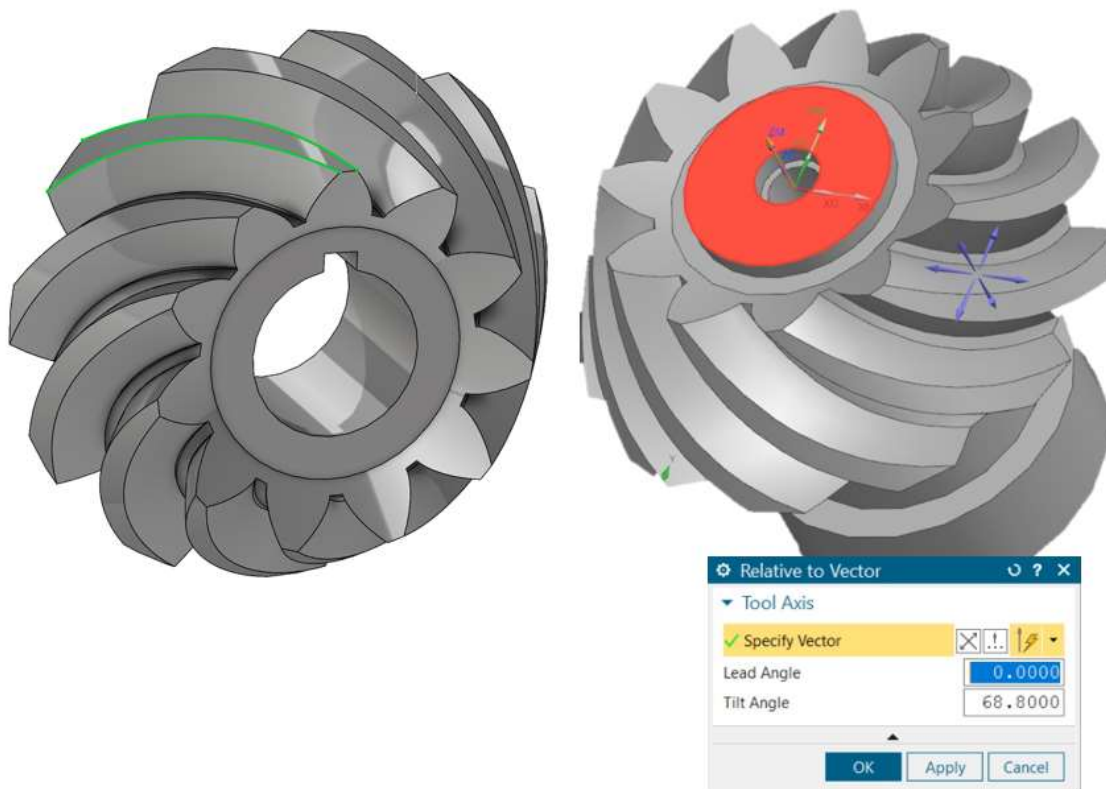


Figura 44. Líneas guías y ángulo tilt
Fuente: autor

El vector de rotación Z es sobre el cual el piñón rotara para continuar con la marcación de los dientes posteriores, la Figura 46 muestra el resultado de la operación de marcado en esta se usó la opción de movimiento sin corte de cilindro el cual crea la estructura alámbrica de un cilindro con un diámetro mayor al diámetro exterior externo d_{ae} (ver Tabla 15) sobre el cual la herramienta se desplaza en movimientos en vacío. (ver Figura 45).

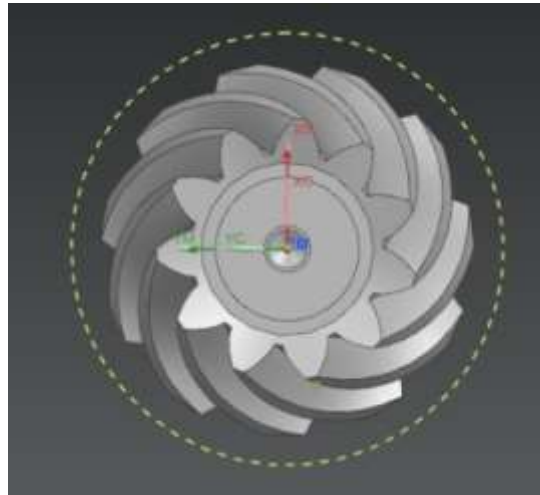


Figura 45 vista frontal estructura alámbrica del cilindro envolvente

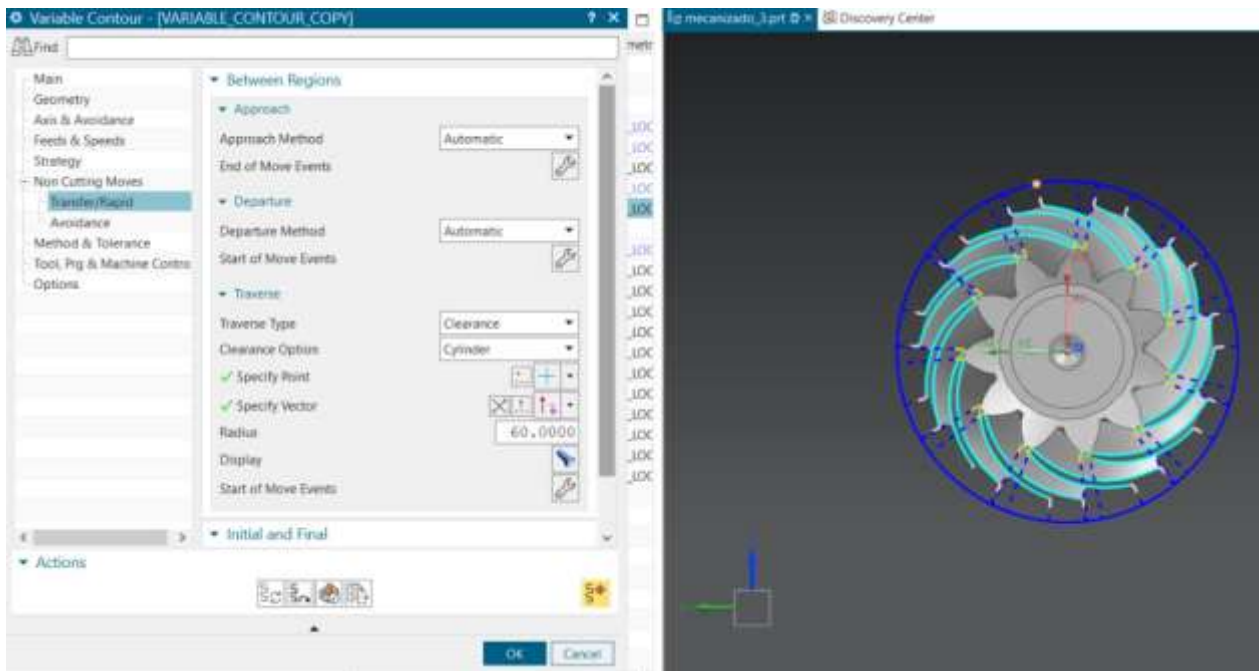


Figura 46. Resultado de la estrategia "variable_contour" marcación

6.2.2 desbaste del diente de piñón “Rotary-roughing”

Para el desbaste del área comprendida entre los dientes del piñón se hizo uso de la operación “Rotary-roughing” la cual genera cortes constantes entre el cono interno y cono externo del piñón, se estableció un sobre material de 0.25 mm para cada flanco para el proceso de acabado.

Para que la operación “Rotary-roughing”, se limite en 4+1 ejes de movimiento se deben de establecer parámetros de posición y traslación los cuales se describen en los cuadros de diálogos de la Figura 47.

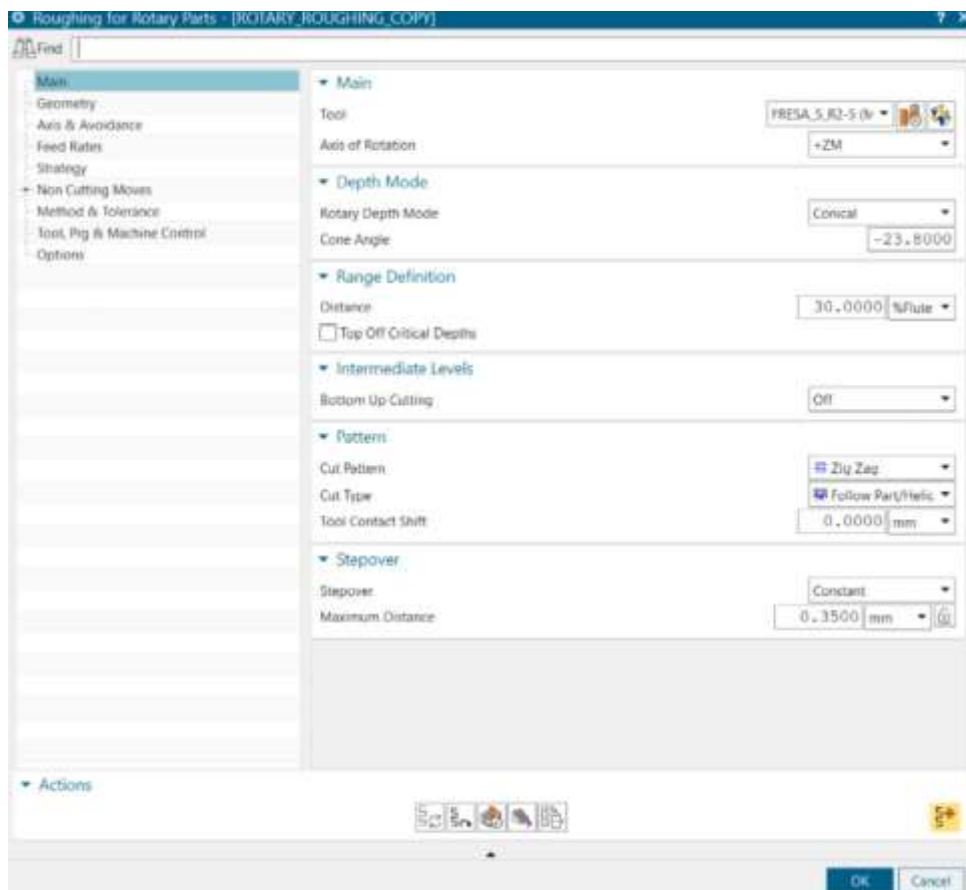


Figura 47 Cuadro de dialogo posicionamiento desbaste “Rotary-roughing”

Para el modo de profundidad “depth mode” se hizo uso de la opción cónico, esta opción acompañado del valor del ángulo de paso del piñón delta.1 (ver Tabla 15) posiciona de manera perpendicular el cono del piñón con respecto a el eje de la herramienta para realizar cortes paralelos al cono.

El volumen a mecanizar es calculada por la estrategia, usando la geometría del material de trabajo IPW por sus siglas en inglés y la geometría del piñón la Figura 48 muestra el resultado de la estrategia de la operación de desbaste.

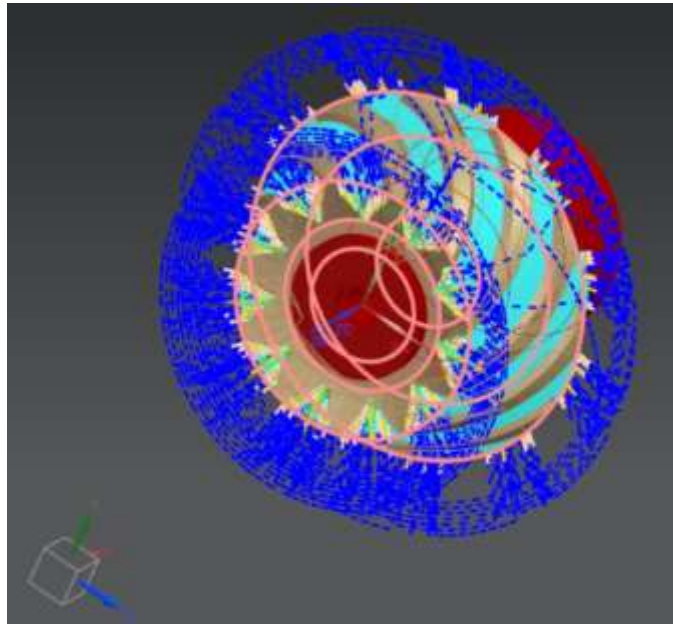


Figura 48 Resultado de la estrategia "Rotary-roughing" desbaste

6.2.3 Acabado del diente de piñón "variable_contour"

Esta operación elimina el sobre material de 0.25 mm dejado con anterioridad en el proceso de desbaste, la operación "variable_contour", se seleccionó con el método de "streamline" que requiere de la selección de líneas de flujo, líneas transversales y área de mecanizado la Figura 49 especifica la ubicación de cada uno de ellos.

La estrategia genera trayectos con la misma dirección de las líneas de flujo y se extienden a través de las líneas transversales y son proyectadas sobre el área seleccionada, para este proceso el sentido de corte se seleccionó en concordancia debido a que proporciona un mejor acabado sobre la superficie.

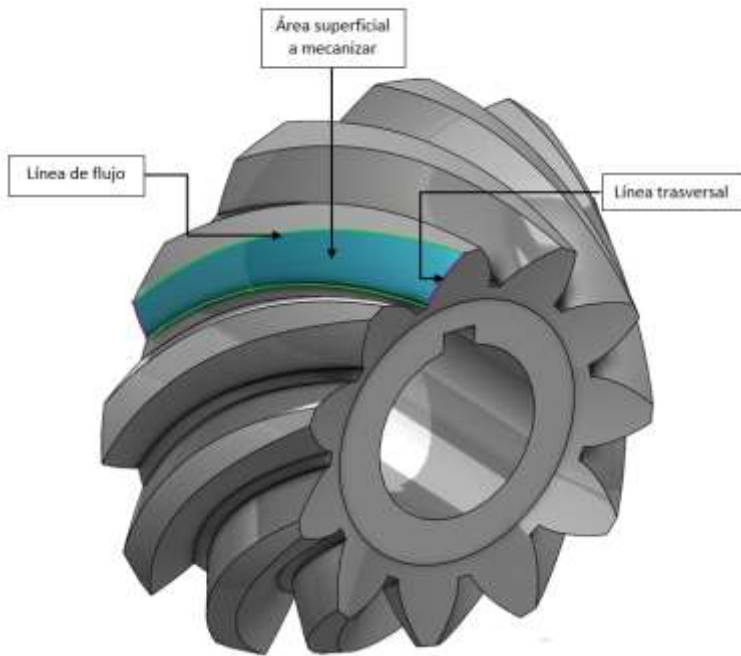


Figura 49. Parámetros para “variable_contour” con “stremline”

los ángulos de inclinación lead y tilt se acomodaron realizando iteraciones con el fin de evitar colisiones durante el mecanizado; para el control de la profundidad de corte se utilizó niveles de corte el cual genera un número determinado pasadas, la Figura 50 muestra el resultado de la estrategia.

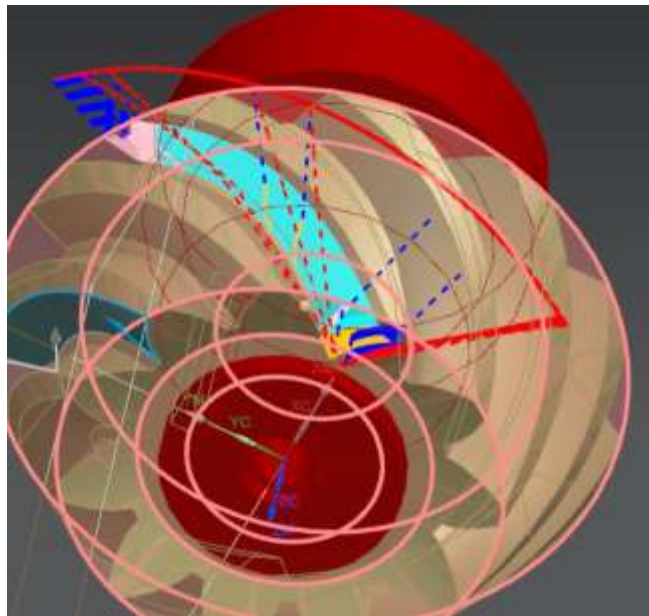


Figura 50 Resultado de la estrategia “variable_contour” con “stremline” acabado

7 RESULTADOS

Una vez verificadas las trayectorias de mecanizado y sus movimientos en vacíos (ver capítulo 6.2) se proceden con la fabricación.

7.1 Marcación

Para el proceso de marcación se verificó que el espesor del diente en los conos internos y externos se encontraran cercanos a la medida, la Figura 51 muestra la medición de cada uno de estos conos.



Figura 51 verificación del ancho del diente en la cara superior como externo e interno

7.2 Desbaste

Durante el proceso de desbaste de las primeras pasadas se verifico que el volumen de mecanizado se encontrara dentro de la marcación previamente realizada, la Figura 52 muestra el resultado de la operación de desbaste la cual tuvo un tiempo de ejecución de 2 horas con 5 minutos.

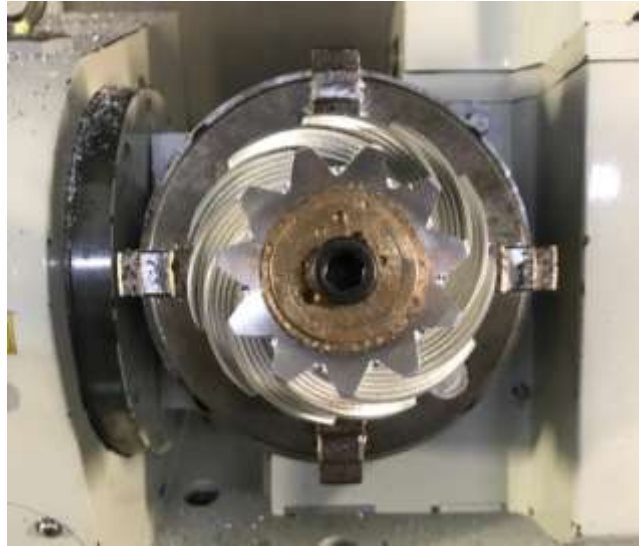


Figura 52 resultado del proceso de desbaste.

7.3 Acabado

Para este proceso se seleccionó el sentido de corte a favor o en concordancia que presenta mejores resultados en términos de la rugosidad superficial Ra. la Figura 53 y la Figura 54 muestran diferentes vistas de la herramienta con respecto al piñón y su estrategia de mecanizado. El proceso de acabado tuvo un tiempo de ejecución de 3 horas con 36 min la Figura 55 muestra el resultado a un 85% de finalización del proceso de acabado.

Se seleccionó el sentido de corte a favor debido a que para los acabados presenta mejores resultados en términos de la rugosidad superficial Ra.

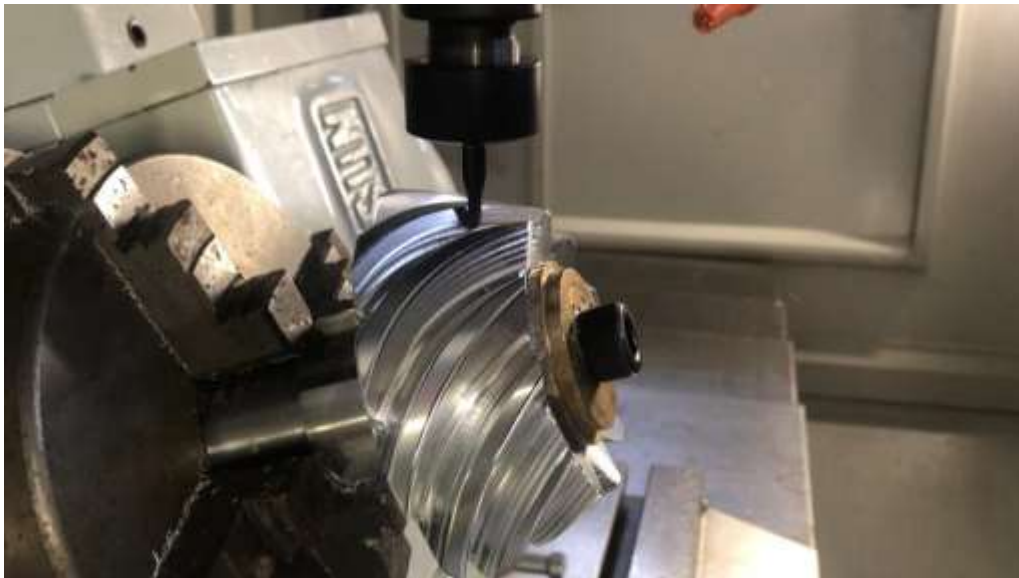


Figura 53. Vista lateral de la herramienta en dirección del avance de la trayectoria "ángulo de inclinación lead"



Figura 54. Vista frontal de la herramienta con respecto a la superficie del diente "ángulo de inclinación tilt"



Figura 55 resultado del proceso de acabado.

8 CONCLUSIONES

- Las gráficas presentadas por la norma inducen a errores de lectura por tanto se obtuvieron ecuaciones polinomiales que describen la relación entre el torque y la relación de trasmisión para determinar los diámetros preliminares de paso del piñón por flexión y picadura.
- La aproximación usada para la representación del diente del piñón limita el aprovechamiento del modelo tridimensional, para usos donde se desee estudiar el contacto de trasmisión de un piñón fabricado por máquina de tallado.
- Con el fin de obtener las ecuaciones de movimiento del cortador que es visto desde el plano de paso entre el par de engranajes, fue necesario realizar un modelo en detalle del esquema de circunferencias para la epicicloide.
- Para el proceso de simulación de trayectorias de una geometría compleja como la de un engranaje cónico hipoide, fue indispensable el uso de la máquina virtual, ya que permitió verificar desplazamientos durante el proceso de mecanizado, revisando la existencia de colisiones y así evitar problemas en la manufactura de la pieza.
- Los tiempos de fabricación por cada una de las estrategias de mecanizado, son superiores al tiempo que requiere una máquina de tallado especializada para la obtención de este, lo cual hace muy deficiente la producción de altos lotes de este tipo de engranajes.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis cinemático del contacto dental del par de engranajes con los valores usadas en el diseño
- Para futuros trabajos que se relacionen con modelado de engranes hipoides se recomienda realizar un enfoque al perfil generado por una máquina de tallado.
- Se recomienda abordar otras estrategias de mecanizado para el proceso de acabado con el fin de reducir el número de ejes requeridos debido a las limitaciones existentes en el centro de mecanizado de la universidad santo tomas

10 REFERENCIAS

- [1] X. Yang, C. Song, C. Zhu, C. Liang, and R. Sun, "Impacts of Misalignments on Mesh Behaviors of Face-Hobbed Hypoid Gear Considering System Deformation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 79244–79253, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923532.
- [2] F. L. Litvin, W. S. Chaing, C. Kuan, M. Lundy, and W. J. Tsung, "Generation and geometry of hypoid gear-member with face-hobbed teeth of uniform depth," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 31, no. 2, pp. 167–181, 1991, doi: 10.1016/0890-6955(91)90002-K.
- [3] X. Wu, J. Han, and J. Wang, "A mathematical model for the generated gear tooth surfaces of spiral bevel and hypoid gears," *Adv. Mater. Res.*, vol. 314–316, pp. 384–388, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.384.
- [4] International Organization for Standardization, "ISO 23509: Bevel and hypoid gear geometry.," vol. 2006, p. 146, 2006.
- [5] H. Muller and J. Thomas, "Face-off: Face Milling vs. Face Hobbing," *Gear Solutions*, no. September, 2007.
- [6] D. B. Dooner, M. Vivet, and D. Mundo, "Deproximating Tredgold's Approximation," *Mech. Mach. Theory*, vol. 102, pp. 36–54, 2016, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.004.
- [7] J. B. Alonso, "State of the Art on Emotion," *Emotion*, vol. 12, no. 2, p. 51, 2006.
- [8] V. Vullo, *Gears Volume 1: Geometric and Kinematic Design*, vol. 1. 2020.
- [9] Piotr Skawinski, Pawel Trzewik, "Bevel gears tooth contact pattern verification. Aircraft Engineering and Aerospace Technology," 2016, doi: 10.1108/AEAT-10-2016-0176.
- [10] O. Mihaylov, "Determining the positions of the elements for the 3-2-1 principle of location in a solidworks add-in," *Vide. Tehnol. Resur. - Environ. Technol. Resour.*, vol. 3, pp. 160–165, 2019, doi: 10.17770/etr2019vol3.4138.
- [11] K. R. Wardak, U. Tasch, and P. G. Charalambides, "Optimal fixture design for drilling through deformable plate workpieces part I: Model formulation," *J. Manuf. Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 23–32, 2001, doi: 10.1016/s0278-6125(01)80017-0.
- [12] Y. Rong, T. Chu, and S. Palaniappan, "Fixturing Feature Recognition for Computer-aided Fixture Design," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 25, no. 28, pp. 97–100, 1992, doi: 10.1016/s1474-6670(17)49472-9.
- [13] S. P. L. M. Software, "NX Turbomachinery Milling," 2008.

11 Anexos

11.1 Anexo 1

Código de programación en Excel

```
Sub ITERACION1()  
'REALIZA ITERACIONES DEL VALOR ADIMENCIONAL HIPOIDE.  
  
Dim h As Integer  
Range("F.3K") = 1  
Range("deltaa1.3k") = Range("delta1.3k.pre")  
Range("deltaa2.3k") = Range("delta2.3k.pre")  
For h = 1 To 5  
    Range("F.3K") = Range("F.3K.")  
    Range("deltaa1.3k") = Range("delta1.3k.a")  
    Range("deltaa2.3k") = Range("delta2.3k.a")  
    If (Range("cond.3k") < Range("cond.Rml.3k")) Then Exit For  
Next h  
End Sub
```

Descripción

Delta1.3k.pre y **delta2.3k.pre** estos valores estarán calculados con las ecuaciones de la norma ISO23509 f.421 y f.420 el cual tiene el valor f.3k (valor adimensional hipoide) igual a uno como primera iteración.

Deltaa1.3k y **deltaa2.3k** estas variables no contienen una ecuación fija, almacenan el valor de las iteraciones para calcular la restricción.

Delta1.3k. a y **delta2.3k. a** estas variables son resultados de cálculos realizados con las variables (Deltaa1.3k y deltaa2.3k).

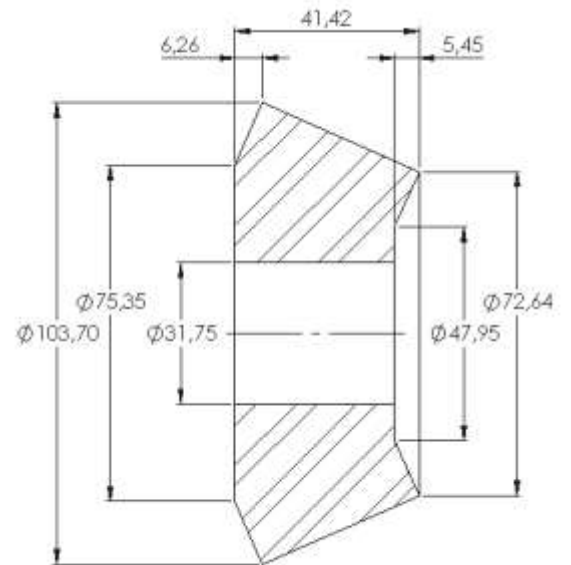
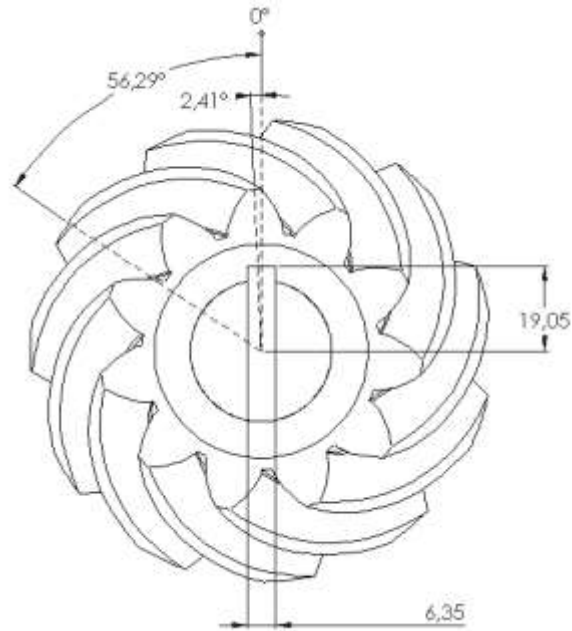
11.2 Anexo 2

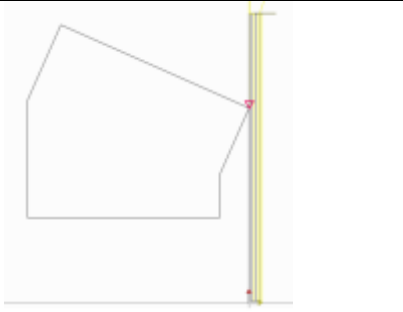
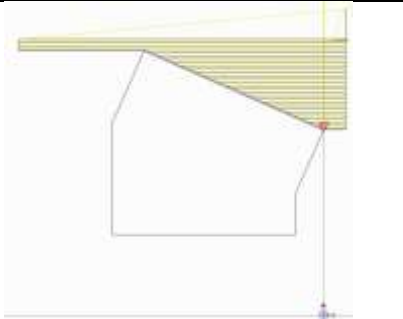
Condiciones de corte.

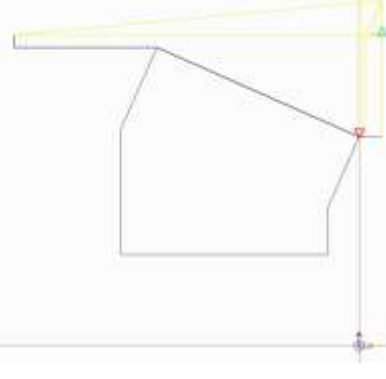
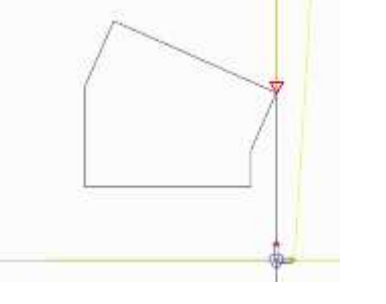
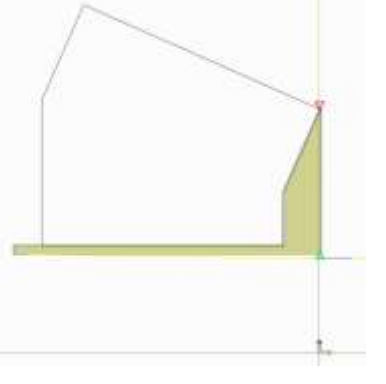
para el perfil de revolución se realizó el proceso de desbaste y acabado en un torno CNC marca Haas modelo ST30 Y.

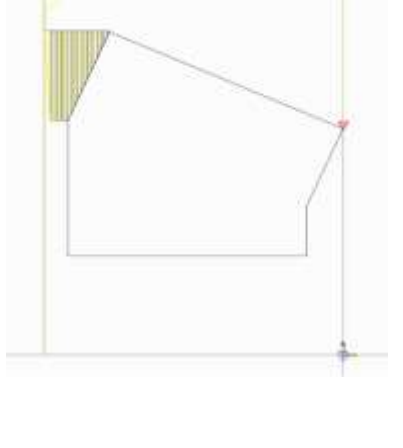
El corte del alojamiento para la cuña mackey de $\frac{1}{4}$ se realizó en una máquina de electro erosión de corte por hilo marca DM-CUT modelo DMWG320T6.

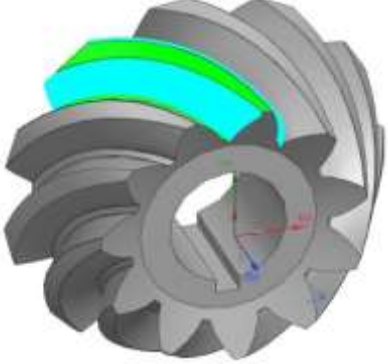
TRABAJO DE GRADO	ENGRANAJE CÓNICO HIPOIDE			Fecha:	
				Número de piezas: 1	
ESCALA 1:1	Material	Dimensiones	Reviso 1:		
	7076-T6, Duraluminio	MEB: $\varnothing 107.95 \times 120$ (mm)	Reviso 2:		
			Realizo:	Cristhian Libardo Cardenas Paez	



# Óp.	Descripción	Esquema	Herramienta	Vc [mm/min]	RPM	Fz [mm/t]	ap [mm]	ae [mm]	F[mm/r]
1	Refrentado		WNMG-06T3	130	-	0.22	0.8	-	0.22
2	Desbaste		WNMG-06T3	130	-	0.22	0.65	-	0.23

3	Acabado		DNMG-1504	130	-	0.15	0.15		0.15
4	Taladrado		U-drill Ø29	750	-	0.03	1.5		0.03
5	Desbaste y acabado interno		WCMT-L302	120	-	0.18	0.3		0.18

6	Tronzado y chaflán		GY2M-0300	500	-	0.08	3		0.08
# Óp.	Descripción	Esquema	\varnothing [mm]	V_c [mm/min]	RPM	F_z [mm/t]	a_p [mm]	a_e [mm]	F [mm/min]
1	Desbaste		3	201	3500	0,054	0.35	2.35	1650

2	Acabado		2	75,4	6500	0,125	0.2	0.15	3250
---	---------	---	---	------	------	-------	-----	------	------