

IMPLEMENTACIÓN VIRTUAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN
ENGRANAJE CÓNICO ESPIRAL EN UN CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL DE 4+1
GRADOS DE LIBERTAD

JEISSON NICOLÁS PEÑA GONZALEZ
JUAN CAMILO TAMAYO CABRERA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.
2022

IMPLEMENTACIÓN VIRTUAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN
ENGRANAJE CÓNICO ESPIRAL EN UN CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL DE 4+1
GRADOS DE LIBERTAD

JEISSON NICOLÁS PEÑA GONZALEZ
JUAN CAMILO TAMAYO CABRERA

Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de Solución de problema de Ingeniería para optar
al título de Ingeniería Mecánica

Director
JORGE ANDRÉS GARCÍA BARBOSA

Codirector
YAMID GONZALO REYES FLOREZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.
2022

NOTA DE ACEPTACIÓN:

x

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

x

FIRMA DEL JURADO

x

FIRMA DEL JURADO

Bogotá D.C. 27/11/2022

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	3
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	6
2.1 GENERAL	6
2.2 ESPECÍFICOS	6
3. MARCO TEORICO	7
3.1 METODOS PARA LOS PARAMETROS DEL CONO DE PASO	7
3.2 CONFIGURACIONES DE PROFUNDIDAD DEL DIENTE	7
3.2.1 PROFUNDIDAD ESTANDAR	7
3.2.2 ANCHO DE RANURA CONSTANTE	8
3.2.3 ANCHO DE RANURA MODIFICADO	9
3.2.4 PROFUNDIDAD UNIFORME	9
3.3 TIPO DE DATOS II Y TIPO DE DATOS I	10
3.4 ENGRANAJE CÓNICO ESPIRAL	10
4. OBTENCIÓN DE LA GEOMETRIA DEL ENGRANAJE CONICO ESPIRAL	11
4.1 DATOS INICIALES	12
4.1.1 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN	12
4.1.2 POTENCIA ESTIMADA	12
4.1.3 TAMAÑO ESTIMADO DEL PIÑÓN	13
4.1.4 NÚMERO DE DIENTES	13
4.1.5 ANCHO DE CARA	14
4.2 PARAMETROS DEL CONO DE PASO	15
4.3 DATOS ADICIONALES	17
4.3.1 ÁNGULO DE PRESIÓN NORMAL	17
4.3.2 PROFUNDIDAD DEL DIENTE	18
4.3.3 FACTOR CLEARANCE	18
4.3.4 FACTOR MEDIO ADDENDUM	19
4.3.5 FACTOR DE ESPESOR	20
4.3.6 REACCIÓN NORMAL EXTERNA	22

4.3.7	ÁNGULO ADDENDUM Y DEDENDUM DE LA RUEDA	22
4.3.8	TRANSFORMACION DE DATOS	24
4.4	DIMENSIONES DEL ENGRANAJE CONICO ESPIRAL	25
4.5	GENERACIÓN DEL PERFIL DEL DIENTE	27
4.5.1	INVOLUTA ESPIRALOIDE	27
5.	PROCESO DE MANUFACTURA	34
5.1	ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN	34
5.1.1	DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN	34
5.1.2	DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN	35
5.2	COMPONENTES SIMULACIÓN VIRTUAL	36
5.2.1	MÁQUINAS VIRTUALES Y HERRAMIENTAS DE CORTE	36
6.	PROPUESTA CAM PARA LA PREPARACIÓN DE MATERIA PRIMA Y OBTENCIÓN DE LOS DIENTES	42
6.1	TRAYECTORIAS DE PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	43
6.1.1	PLANEADO PARTE INFERIOR Y SUPERIOR DEL ENGRANAJE	43
6.1.2	CENTRO PUNTO	45
6.1.3	TALADRADO DIÁMETRO 7.8 mm	46
6.1.4	DESBASTE PARTE INTERIOR DEL ENGRANAJE	47
6.1.5	ACABADO PARTE INTERIOR DEL ENGRANAJE	49
6.1.6	DESBASTE AGUJERO DE SUJECCIÓN	50
6.1.7	CENTRO PUNTO Y TALADRADO DE DIÁMETRO 4.2 mm	51
6.1.8	ACABADO EXTERIOR PARTE INFERIOR DEL ENGRANAJE	52
6.1.9	DESBASTE EXTERIOR SUPERIOR DEL ENGRANAJE	54
6.2	DESBASTE Y ACABADO DE LOS DIENTES	55
6.2.1	ACABADO EXTERIOR SUPERIOR DEL DIENTE	55
6.2.2	DESBASTE ENTRE DIENTES	56
6.2.3	ACABADO DE LOS DIENTES	58
7	ANÁLISIS Y RESULTADOS	62
8	CONCLUSIONES	66
9	RECOMENDACIONES	67
10	REFERENCIAS	68
9.	ANEXOS	69
9.1	ANEXO 1. PLANO DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN	69

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Profundidad estandar. Fuente [1].....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2. Ancho de ranura constante y modificado. Fuente [1].....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3. Profundidad uniforme. Fuente [1]</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4. Engranaje cónico espiral. Fuente [1]</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Estructura del cálculo. Fuente [1].....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6. Diámetro exterior del piñón en comparación con el torque. Fuente [1].....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7. Número aproximado de diente para el piñón. Fuente [1]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8. Ancho de la cara de engranajes cónicos espirales que operan a 90°. Fuente [1]</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9. Dimensiones cono de paso par cinemático. Fuente Autor.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10. Cono de paso engranaje cónico espiral vista frontal y superior. Fuente: Autor.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 11. Factor de espesor. Fuente [1]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12. Profundidad estándar. Fuente [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13. Ancho de cara, ángulos y distancias del cono de paso. Fuente Autor</i>	<i>26</i>
<i>Figura 14. Ancho de cara, ángulos y distancias del cono de paso. Fuente Autor</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15. Modelo CAD, solido en revolución. Fuente Autor</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16. Sistema de coordenadas de involuta espiraloide, Fuente [4]</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17. Ecuaciones del plano tangente. Fuente [4].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 18. Coordenadas resultantes. Fuente [4].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19. Curva conducida por una ecuación perfil de involuta espiraloide. Fuente Autor.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 20. Perfil de involuta. Fuente Autor.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 21. Croquis del perfil del diente cerrado. Fuente Autor.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22. Proceso de FaceMilling. Fuente [1].....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 23. Método FaceMilling en CAD. Fuente Autor.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 24. Engranaje cónico espiral.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 25. Par de engranajes cónicos espirales. Fuente Autor</i>	<i>33</i>
<i>Figura 26. Paso a paso proceso de manufactura. Fuente Autor.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 27. Restricción de movimientos. Fuente [6].....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 28. Sistema de sujeción. Fuente Autor.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 29. Ensamble del sistema de sujeción y corona. Fuente Autor</i>	<i>36</i>
<i>Figura 30. Especificaciones máquina FINETECH GTX - 210. Fuente GTX-210</i>	<i>36</i>
<i>Figura 31. Máquina virtual FINETECH GTX-210, pieza de trabajo y sistemas de sujeción. Fuente Autor.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 32. Fresa de planeado diámetro 50mm. Fuente [9]</i>	<i>38</i>
<i>Figura 33. Broca de centro diámetro 3.15mm. Fuente [12].....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 34. Broca helicoidal diámetro 7.8mm. Fuente [12]</i>	<i>38</i>
<i>Figura 35. Broca helicoidal diámetro 7.8mm. Fuente [12]</i>	<i>39</i>
<i>Figura 36. Fresa punta plana diámetro 6mm. Fuente [11].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 37. Fresa de alto avance diámetro 32mm. Fuente [10].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 38. Fresa de bola diámetro 16mm. Fuente [13]</i>	<i>40</i>
<i>Figura 39. Análisis de curvatura CAD. Fuente Autor.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 40. Fresa plana de diámetro 2 mm. Fuente [9]</i>	<i>41</i>
<i>Figura 41. Fresa de bola diámetro 2 mm. Fuente [9].....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 42. Árbol de estrategias. Fuente Autor.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 43. Límite de la pieza seleccionada mediante curvas parte inferior. Fuente Autor</i>	<i>43</i>
<i>Figura 44. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor</i>	<i>44</i>
<i>Figura 45. Límite de la pieza seleccionada mediante curvas parte superior. Fuente Autor</i>	<i>44</i>

Figura 46. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	45
Figura 47. Selección del agujero central para el centro punto. Fuente Autor	46
Figura 48. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	46
Figura 49. Selección de la geometría para el taladrado. Fuente Autor	47
Figura 50. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	47
Figura 51. Selección de los contornos y piso. Fuente Autor	48
Figura 52. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	48
Figura 53. Selección de piso y paredes de la geometría. Fuente Autor	49
Figura 54. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	49
Figura 55. Selección de los contornos y piso. Fuente Autor	50
Figura 56. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	50
Figura 57. Selección de geometría para agujero de centro y taladrado diámetro 4.2mm. Fuente Autor	51
Figura 58. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	51
Figura 59. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente autor	52
Figura 60. Selección de piso y paredes de la geometría. Fuente Autor	53
Figura 61. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	53
Figura 62. Especificación de áreas de corte. Fuente Autor	54
Figura 63. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	54
Figura 64. Método guía y vector relativo del eje de la herramienta. Fuente Autor	55
Figura 65. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	56
Figura 66. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor	56
Figura 67. Selección del área de corte y especificación del vector de la herramienta. Fuente Autor	57
Figura 68. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	57
Figura 69. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor	58
Figura 70. Método guía y vector relativo del eje de la herramienta. Fuente Autor	58
Figura 71. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor	59
Figura 72. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor	59
Figura 73. Método guía y vector relativo del eje de la herramienta. Fuente Autor	60
Figura 74. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso finalizado. Fuente Autor	60
Figura 75. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor	61
Figura 76. Análisis de metrología hasta el desbaste de dientes. Fuente Autor	62
Figura 77. Rango de valores y colores del análisis. Fuente Autor	63
Figura 78. Análisis de metrología desbaste de dientes. Fuente Autor	64
Figura 79. Plano sistemas de sujeción. Fuente Autor	69

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Datos iniciales para el cálculo de los parámetros del cono de paso. Fuente: Autor.</i>	12
<i>Tabla 2. Calculo de parámetros del cono de paso. Fuente: Autor.</i>	15
<i>Tabla 3. Datos adicionales para el cálculo de las dimensiones del engranaje. Fuente Autor.</i>	17
<i>Tabla 4. Factor de profundidad. Fuente [1]</i>	18
<i>Tabla 5. Factor medio addendum. Fuente [1]</i>	20
<i>Tabla 6. Reacción mínima normal exterior. Fuente [1]</i>	22
<i>Tabla 7. Reacción mínima normal exterior. Fuente [1]</i>	23
<i>Tabla 8. Ángulos tetha de la rueda. Fuente [1]</i>	23
<i>Tabla 9. Tipo de datos II y tipo de datos I. Fuente [1]</i>	24
<i>Tabla 10. Valores para solido en revolución. Fuente Autor</i>	25
<i>Tabla 11. Valores de las ecuaciones. Fuente Autor</i>	30
<i>Tabla 13. Variables representativas del proceso FaceMilling. Fuente Autor.</i>	31
<i>Tabla 15. Valores análisis de curvatura. Fuente Autor</i>	41
<i>Tabla 16. Datos de la medición. Fuente Autor</i>	63
<i>Tabla 17. Rangos de valores y colores del análisis. Fuente Autor</i>	64
<i>Tabla 18. Datos de la medición. Fuente Autor</i>	65
<i>Tabla 19. Hoja de procesos, planeado inferior del engranaje. Fuente Autor</i>	71
<i>Tabla 20. Hoja de procesos, montaje sin ensamble del sistema de sujeción. Fuente Autor</i>	73
<i>Tabla 21. Hoja de procesos, montaje con ensamble del sistema de sujeción. Fuente Autor</i>	75

RESUMEN

Se desarrolló un engranaje cónico espiral siguiendo la geometría propuesta en la norma ISO 23509:2006, siguiendo sus características más representativas como lo son: el ángulo de hélice, ángulo de presión y cambios de espesor en el diente a lo largo de la corona, generando una geometría compleja. Para la simulación de todo el proceso de manufactura se empleó el software NX y su módulo de fabricación, esto con el fin de verificar, evitar posibles colisiones y desplazamientos no deseados a la hora de fabricar la pieza, evitando también el uso de máquinas especializadas para sus tallados. El diseño del diente por lo general se obtiene con la máquina herramienta y la herramienta de corte, por lo cual incentiva a consultar otras estrategias de obtención de la geometría del diente y generando su corte mediante el proceso de FaceMilling. Después de generar el engranaje en un software CAD se planifica su proceso de manufactura teniendo en cuenta las limitantes que tiene el centro de mecanizado FINETECH GTX-210, seleccionando el tipo de material a trabajar y las herramientas de corte designadas para cada operación que será ejecutada.

1. INTRODUCCIÓN

Los engranajes son elementos mecánicos que se utilizan para: invertir la dirección de giro, convertir el movimiento rotacional en lineal, variar la velocidad y fundamentalmente transmitir potencia. Es de vital importancia la precisión estandarizada en los dientes puesto que sin ella el funcionamiento del elemento no sería óptimo, dicho estándar está ligado al proceso de manufactura usado por el fabricante o escogido por el diseñador según convenga.

Se consultó con empresas Colombianas (INTERMEC Y RAMFE) de la industria de los engranajes, y en estas se pudo evidenciar que la industria se ha enfocado en la fabricación de engranajes rectos, “la elaboración de los engranajes cónicos espirales no se ha implementado por su alto costo en la obtención de la maquinaria (INTERMEC, comunicación personal, 16 de diciembre de 2022), contando en la actualidad con máquinas de propósito general con 4 o más grados de libertad, lo cual permite la elaboración de elementos complejos para su producción en bajos volúmenes o para prototipos.

Por lo anterior, el control numérico asistido por computador (CNC) es un método especializado en el desarrollo de conjuntos de operaciones tecnológicas de aspecto automático, originado en operaciones numéricas que proporciona un ordenador. De este modo, son máquinas, instrumentos o unidades de fabricación que funcionan autónomamente por medio de un programa de control.

Por lo tanto, las máquinas multieje cuentan con un proceso en el cual las herramientas son controladas por un ordenador de control numérico, estas se desplazan con 4 o más grados de libertad. Las herramientas son capaces de realizar traslaciones a lo largo de los ejes.

El software CAD/CAM se ha implementado en el país para el diseño y producción de proyectos metalmecánicos, lo anterior debido a que se requiere una mayor exactitud dimensional para la fabricación de piezas complejas con una alta precisión y un menor costo.

Por esta razón, este trabajo está enfocado en la implementación virtual del proceso de fabricación de un engranaje cónico espiral en un centro de mecanizado vertical de 4+1 grados de libertad.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Implementar el proceso de fabricación virtual de un engranaje cónico espiral en un centro de mecanizado vertical de 4+1 grados de libertad.

2.2 ESPECÍFICOS

- Obtener la geometría del engranaje.
- Planificar el proceso de manufactura para la obtención del engranaje.
- Verificar el proceso de fabricación de engranaje cónico espiral en centro de mecanizado virtual.

3. MARCO TEORICO

3.1 METODOS PARA LOS PARAMETROS DEL CONO DE PASO

Existe un número infinito de superficies para el cono de paso de cualquier conjunto de engranajes hipoidales. Sin embargo, teniendo en cuenta los datos iniciales establecidos por la norma internacional, el resultado para cada método genera una superficie del cono de paso. En la industria estos métodos de diseño se denominan método 1, método 2 y método 3, y para los engranajes cónicos, como método 0. [1]

Con el método 1 y el método 3, las superficies generadas para el cono de paso se seleccionan de tal manera que el radio hipoide de la curvatura coincida con el radio de curvatura de la herramienta de corte en el punto medio para que los engranajes sean fabricados por el proceso de FaceMilling, y de modo que coincidan con las curvaturas epicicloidales media en el punto medio de los engranajes para el proceso de FaceHobbing. [1]

El método 2, se diseñan para engranajes cortados por el proceso de FaceHobbing, en este caso, el ápice del cono de rueda, el ápex del paso del piñón y el centro de la herramienta de corte se encuentran en línea recta. [1]

3.2 CONFIGURACIONES DE PROFUNDIDAD DEL DIENTE

3.2.1 PROFUNDIDAD ESTANDAR

Se refiere a la configuración donde la profundidad cambia en proporción a la distancia del cono en cualquier sección particular del diente. Si la línea de la raíz de dicho diente se extiende se cruza con el eje en el ápice del cono de paso (Figura 1), pero el ápice del cono de la cara no. La suma de los ángulos dedendum del piñón y de la rueda para el cono de profundidad tipo estándar, $\Sigma\theta_{fs}$, no dependerá del radio de la herramienta de corte. [1]

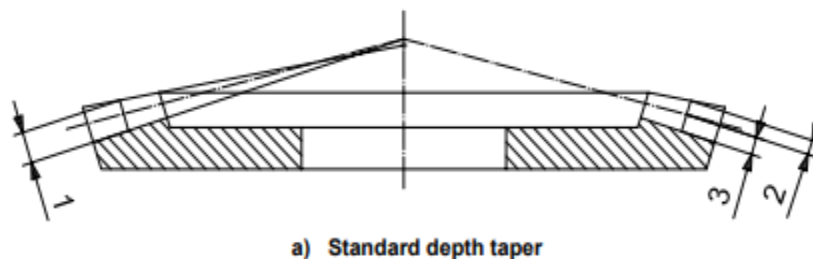


Figura 1. Profundidad estandar. Fuente [1]

3.2.2 ANCHO DE RANURA CONSTANTE

El cono de raíz representa una inclinación de tal manera que el ancho de la ranura es constante mientras mantiene el cono de ancho de espacio adecuado. El ancho de la ranura es cero en ambos casos. [1]

La ecuación para la suma de los ángulos se da en $\Sigma\theta_{fC} = \left(\frac{90m_{et}}{R_{e2}\tan\alpha_n\cos\beta_m} \right) \left(1 - \frac{R_{m2}\sin\beta_{m2}}{r_{c0}} \right)$.

Para la suma de los ángulos dedendum, indica que el radio de la herramienta de corte, r_{c0} , tiene un efecto significativo en la cantidad por lo cual la línea de la raíz tiene una inclinación. Para el diseño determinado, se tiene en consideración las siguientes tendencias. [1]

- ✓ Un gran radio de corte aumenta los ángulos dedendum. Si el radio es demasiado grande, el cono de profundidad puede afectarse negativamente la profundidad de los dientes en cada extremo, es decir, poco profundo en el extremo interno para un contacto dental adecuado, y demasiado profundo en el exterior, lo que puede ocasionar superficies estrechas. Por lo tanto, el radio del cortador no debe ser demasiado grande y se sugiere un límite superior de r_{c0} aproximadamente igual a r_{m2} .
- ✓ Un pequeño radio de la herramienta de corte disminuye la suma de los ángulos dedendum. De hecho, si r_{c0} es igual a $r_{m2}\sin\beta_{m2}$, la suma de los ángulos dedendum se convierte en cero, lo que resulta en dientes de profundidad uniforme. Si r_{c0} es inferior a $r_{m2}\sin\beta_{m2}$, se convierte en una cónica inversa en profundidad y los dientes serían más profundos en la parte interior que en la exterior. Para evitar la profundidad excesiva en la parte interior, se sugiere un valor mínimo de r_{c0} , igual a $1,1r_{m2}\sin\beta_{m2}$.

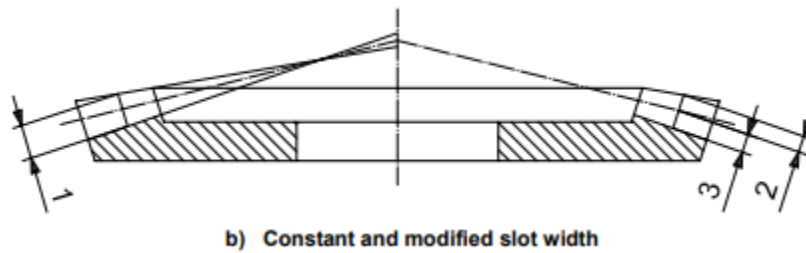


Figura 2. Ancho de ranura constante y modificado. Fuente [1]

3.2.3 ANCHO DE RANURA MODIFICADO

La línea del cono de raíz se inclina sobre el punto medio. En este caso, el ancho de la ranura del miembro del engranaje es constante a lo largo de la longitud del diente y cualquier ancho de la ranura está en el miembro del piñón. (Figura 2) [1]

En el caso en que la línea de la raíz se inclina para permitir el final de la marcha de una operación, el valor de la inclinación es algo arbitrario, pero debe estar dentro de las siguientes condiciones. $\Sigma\theta_{fM} = \Sigma\theta_{fC}$ o $\Sigma\theta_{fM} = \Sigma\theta_{fS}$ (El que sea más pequeño). [1]

- ✓ La suma entre el piñón y los ángulos dedendum de la rueda para el ancho de ranura modificado, $\Sigma\theta_{fM}$, no debe sobrepasar 1,3 veces la suma de los ángulos del dedendum para la profundidad cónica estándar, $\Sigma\theta_{fS}$, y tampoco debe exceder la suma de los ángulos dedendum para el cono de ancho de ranura constante, $\Sigma\theta_{fC}$;
- ✓ En la práctica, se utiliza el de menor valor, $1,3\Sigma\theta_{fS}$ o $\Sigma\theta_{fC}$.

3.2.4 PROFUNDIDAD UNIFORME

La profundidad uniforme es la configuración donde el diente permanece constante a lo largo del ancho de la cara independientemente del radio del cortador. En este caso, la línea de la raíz es paralela a un elemento del cono de la cara, como se muestra (Figura 3). La suma de los ángulos de dedendum del piñón y la rueda para la profundidad uniforme, $\Sigma\theta_{fU}$, es igual a cero. [1]

Para el diente, el radio de la herramienta de corte, r_{c0} , debería ser mayor que $r_{m2}\sin\beta_{m2}$, pero no más de 1,5 veces este valor. Esta aproximación de la curva involuntaria, en conjunto con la profundidad uniforme, sostiene la variación a lo largo del ancho de la cara en el espesor circular normal en el piñón y la rueda al mínimo. [1]

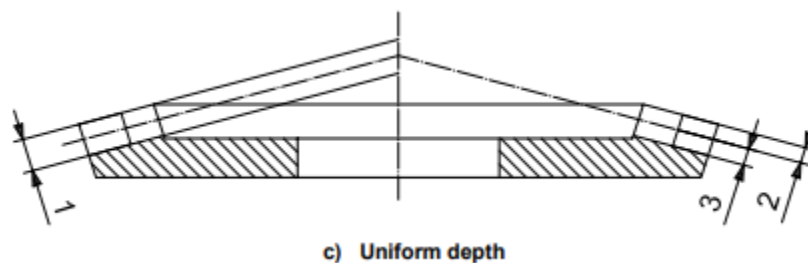


Figura 3. Profundidad uniforme. Fuente [1]

3.3 TIPO DE DATOS II Y TIPO DE DATOS I

El tipo de datos II corresponde a una serie de datos en relación a los dientes del engranaje, en cuanto al tipo de datos I los datos están relacionados a las dimensiones más representativas del engranaje. [1]

3.4 ENGRANAJE CÓNICO ESPIRAL

Los engranajes cónicos espirales están diseñados con dientes curvos oblicuos, comenzando el contacto de transmisión en el extremo del diente y continuando sin problema hasta el otro extremo permitiendo el roce suave, reduciendo las vibraciones y ruidos a velocidades altas. Siendo un componente de uso frecuente en la industria aeronáutica y automotriz, debido a sus altos requerimientos de precisión. Los ejes de la corona y del piñon conforman un ángulo de 90° . (Figura4) [1]

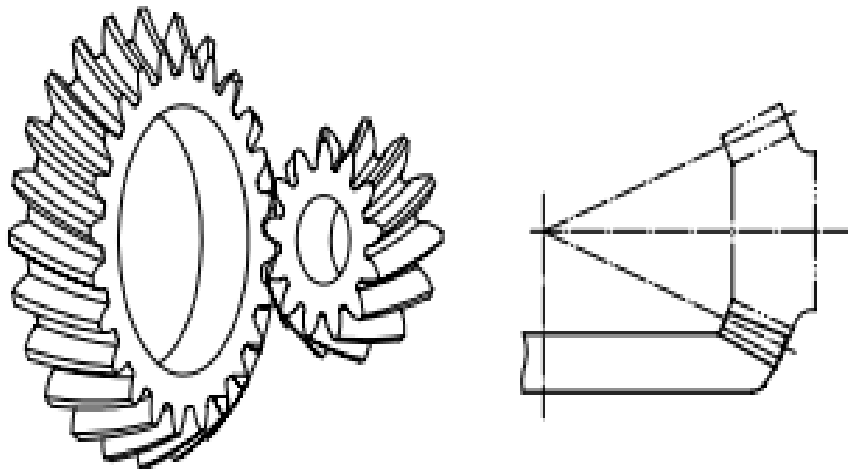


Figura 4. Engranaje cónico espiral. Fuente [1]

4. OBTENCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ENGRANAJE CONICO ESPIRAL

Con el diagrama de flujo se genera el paso a paso para iniciar el proceso de diseño del engranaje establecido por la norma ISO 23509:2006. (Figura 5)

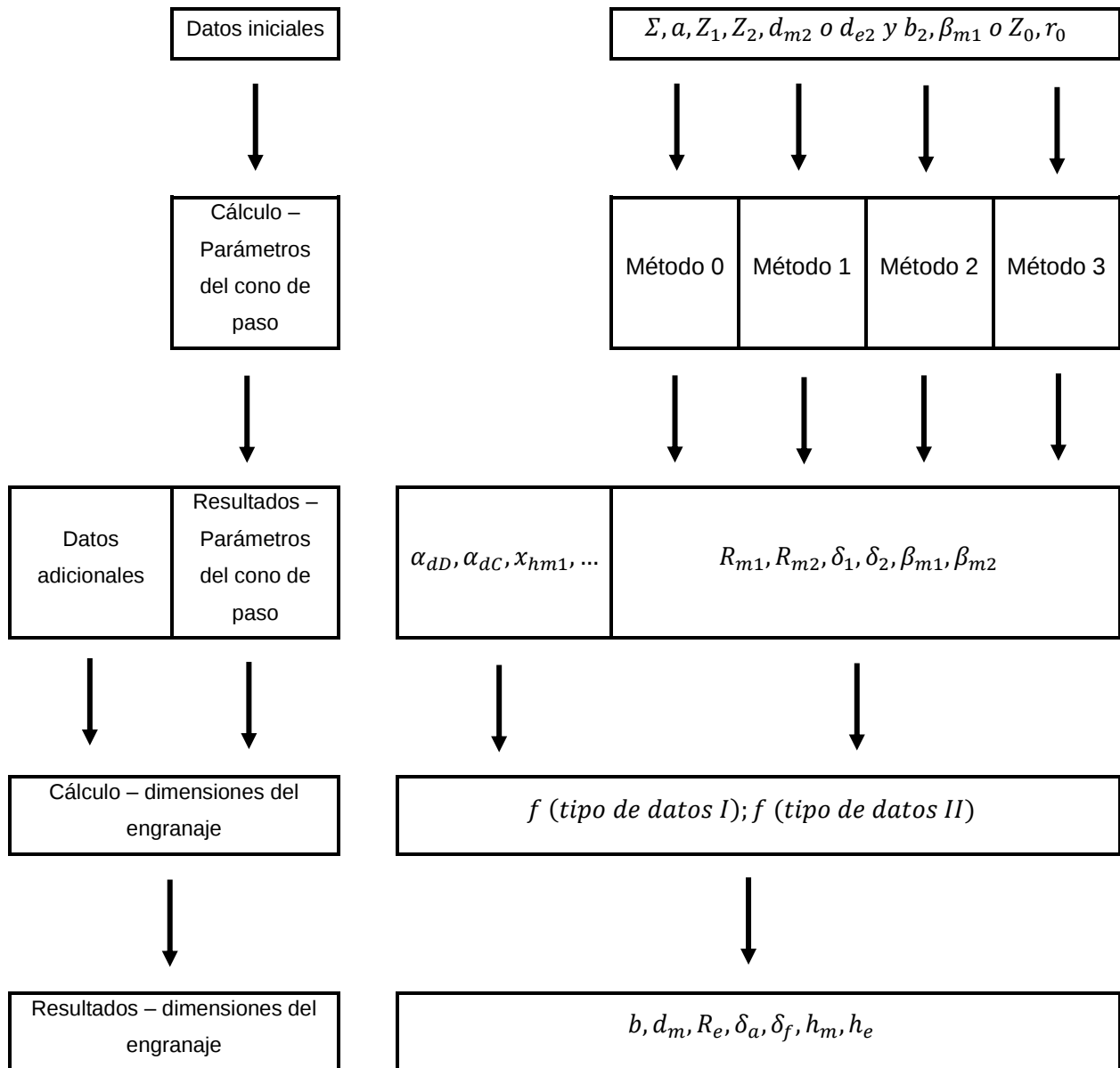


Figura 5. Estructura del cálculo. Fuente [1]

4.1 DATOS INICIALES

De acuerdo al procedimiento propuesto por la norma internacional, inicialmente se procede con el cálculo de los parámetros del cono de paso para el método seleccionado, teniendo en cuenta el conjunto de datos iniciales indicados en la Tabla 1.

Símbolo	Descripción	Método 0
Σ	Ángulo entre ejes	90°
a	Desplazamiento hipoide	0 mm
$Z_{1,2}$	Número de dientes	17 / 34
d_{m2}	Diámetro de paso medio de la rueda	-
d_{e2}	Diámetro de paso exterior de la rueda	150 mm
b_2	Ancho de la cara de la rueda	25 mm
β_{m1}	Ángulo espiral medio del piñón	35°
β_{m2}	Ángulo espiral medio de la rueda	35°
r_{c0}	Radio del cortador	92

Tabla 1. Datos iniciales para el cálculo de los parámetros del cono de paso. Fuente: Autor.

4.1.1 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

Cuanto mayor sea el valor numérico de la relación, menor será la velocidad del eje de salida (eje de transmisión), por lo tanto, la velocidad del vehículo en la marcha correspondiente disminuirá a la misma velocidad diferencial de entrada. Por lo anterior fue escogida la relación de transmisión de $u = 2$. [2]

4.1.2 POTENCIA ESTIMADA

Teniendo en cuenta las diferentes aplicaciones de los engranajes y la variación del torque debido a la carga no constante, el diseñador implementa la estimación de potencia y velocidad que lleva a cabo el ciclo de operación. [1]

Para este caso se selección una potencia de $P = 100KW$ y una revoluciones por segundo de $n = 9500 \frac{rev}{min}$. [3]

$$T_1 = \frac{9500 * P}{n} \quad (1)$$

Donde,

- ✓ P = Potencia del par de engranajes (KW)
- ✓ n = Revoluciones del piñón, en revoluciones por segundo

$$T_1 = 100 \text{ N.m}$$

4.1.3 TAMAÑO ESTIMADO DEL PIÑÓN

Para el engranaje cónico espiral, el diámetro exterior del piñón está dado por la siguiente grafica (Figura 6). Siguiendo de forma vertical el valor del torque al cual está sometido hasta llegar a la relación de transmisión deseada, luego seguir de forma horizontal a la lectura de diámetro exterior del piñón.

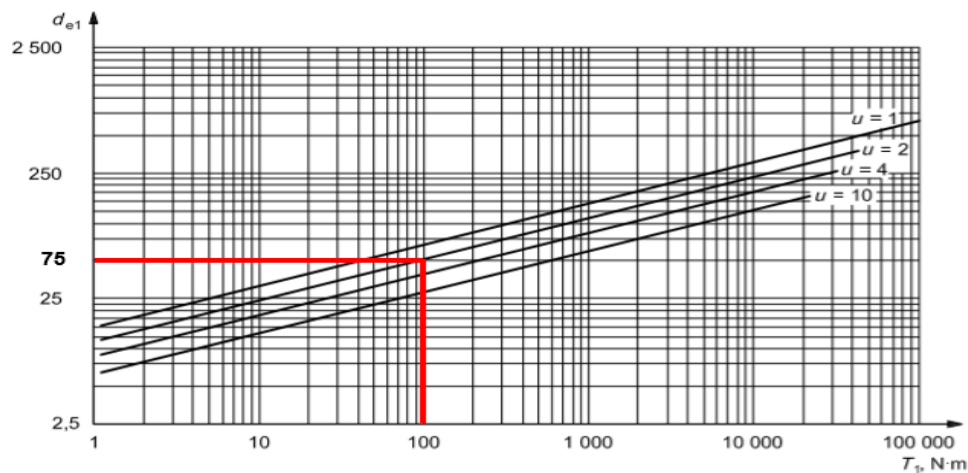


Figura 6. Diámetro exterior del piñón en comparación con el torque. Fuente [1]

De la figura anterior se puede determinar que el diámetro exterior del piñón es $d_{e1} = 75 \text{ mm}$.

$$u = \frac{d_{e2}}{d_{e1}} \quad (2)$$

Donde,

- ✓ u = Relación de transmisión de potencia
- ✓ d_{e1} = Diametro exterior del pinón (mm)

Haciendo uso de la ecuación 2, podemos hallar el diámetro exterior de la rueda

$$d_{e2} = 150 \text{ mm}$$

4.1.4 NÚMERO DE DIENTES

Aunque la selección del número de dientes puede hacerse por parte del diseñador, la norma internacional indica que, para el trabajo en general, la cantidad de dientes deben ser seleccionados de la gráfica. (Figura 7)

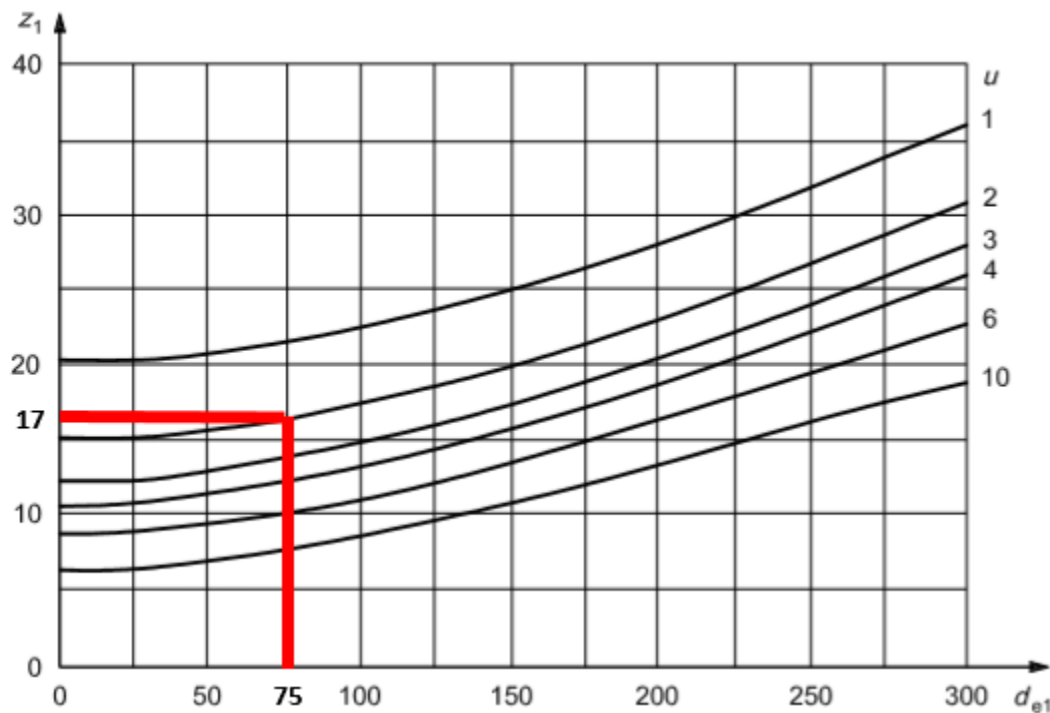


Figura 7. Número aproximado de diente para el piñón. Fuente [1]

De la figura anterior se puede determinar que el número de dientes para el piñón es $Z_1 = 17$.

$$u = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3)$$

Donde,

- ✓ u = Relación de transmisión de potencia
- ✓ Z_1 = Numero de dientes del piñón

Haciendo uso de la ecuación 3, podemos hallar el número de dientes para la rueda.

$$Z_2 = 34$$

4.1.5 ANCHO DE CARA

Cada método que es utilizado para los cálculos de los parámetros del cono de paso tiene sus ecuaciones específicas para determinar el ancho de cara del piñón. Para los engranajes cónicos espirales, el ancho de cara en el piñón es igual al de la rueda. Podemos obtenerlo de la siguiente gráfica. (Figura 8)

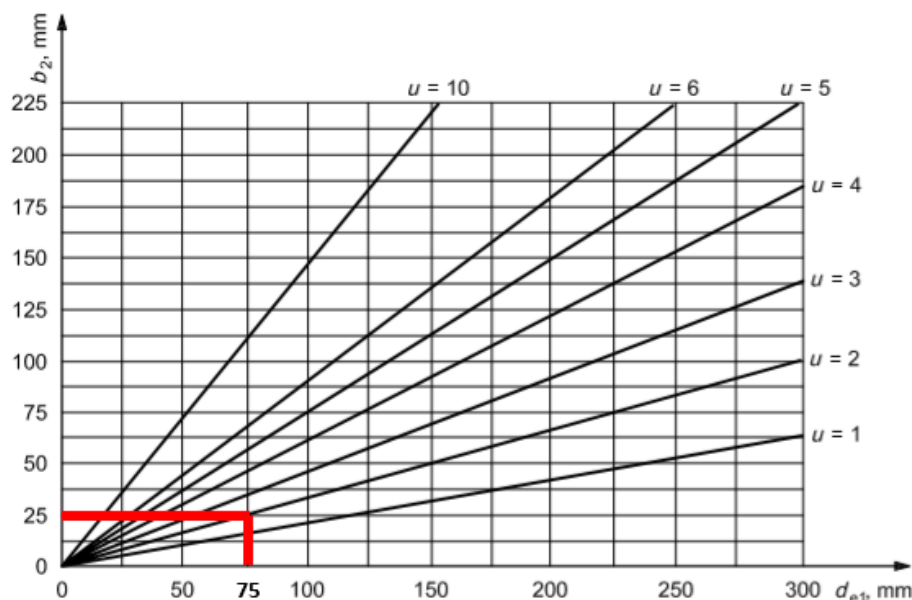


Figura 8. Ancho de la cara de engranajes cónicos espirales que operan a 90° . Fuente [1]

De la figura anterior se puede determinar que el ancho de cara de la rueda y del piñón es $b_2 = b_1 = 25$ mm.

4.2 PARAMETROS DEL CONO DE PASO

Actualmente existen cuatro métodos diferentes para realizar el cálculo de los parámetros del cono de paso. Por cada método, se debe garantizar que los datos en la Tabla 1 se conocen. Las ecuaciones adecuadas conducen a los parámetros del cono de paso, $R_{m1}, R_{m2}, \delta_1, \delta_2, \beta_{m1}, \beta_{m2}$ y c_{be2} . [1] Con los anteriores parámetros, se puede dibujar un sistema esquemático del par de engranajes.

Se selecciona el método 0 para realizar los respectivos cálculos de los parámetros del cono de paso (Tabla 2), ya que los demás métodos están enfocados a la superficie de los engranajes cónicos hipoides, en la norma ISO 23509:2006 se proporcionan las diferentes ecuaciones para calcular los valores. Se hace un modelo bidimensional del cono de paso del par de engranajes. (Figura 9 y 10).

Variable	Descripción	Ecuación	Valor
δ_1	Ángulo de paso del piñón	$\arctan\left(\frac{\sin\Sigma}{\cos\Sigma + u}\right)$	26.57°
δ_2	Ángulo de paso de la rueda	$\Sigma - \delta_1$	63.43°
$R_{e1,2}$	Distancia exterior del cono	$\frac{d_{e2}}{2 * \sin\delta_2}$	83.85 mm
$R_{m1,2}$	Distancia media del cono	$R_{e2} - \frac{b_2}{2}$	71.35 mm
$\beta_1 = \beta_2$	Ángulo espiral del piñón y la rueda	-	35°

Tabla 2. Cálculo de parámetros del cono de paso. Fuente: Autor.

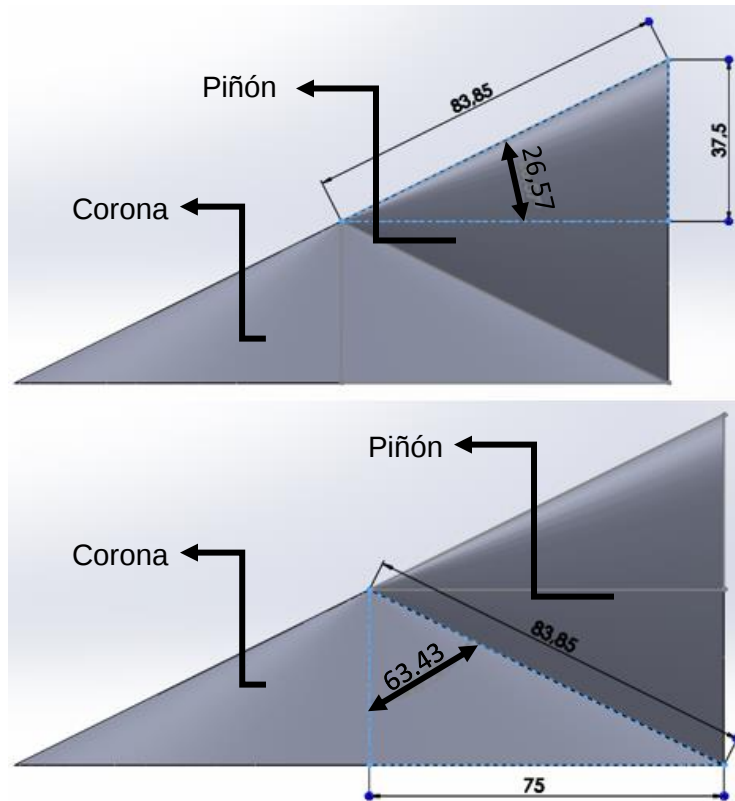


Figura 9. Dimensiones cono de paso par cinemático. Fuente Autor

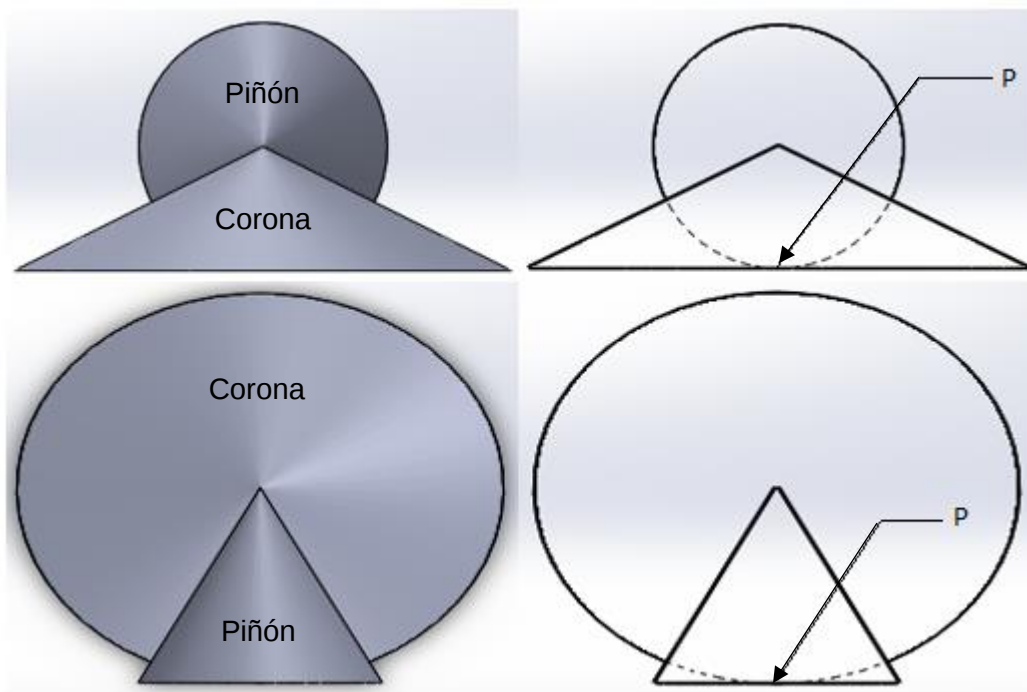


Figura 10. Cono de paso engranaje cónico espiral vista frontal y superior. Fuente: Autor.

4.3 DATOS ADICIONALES

Conociendo los parámetros del cono de paso, se necesita un conjunto de datos adicionales para realizar el cálculo de las dimensiones del engranaje (Tabla 3). Se anexan los datos del engranaje cónico en el tipo de datos II.

Datos tipo I			Datos tipo II		
Símbolo	Descripción	Valor	Símbolo	Descripción	Valor
α_{dB}	Ángulo de presión de diseño nominal – Lado de accionamiento				20°
α_{dC}	Ángulo de presión de diseño nominal – Lado accionado				20°
f_{alim}	Factor de influencia del ángulo de presión límite				0°
x_{hm1}	Coeficiente de cambio de perfil	0.44	c_{ham}	Factor de rueda medio addendum	0.28
k_{hap}	Factor de addendum básico de engranaje de la corona	1	k_d	Factor de profundidad	2
k_{hfp}	Factor de dedendum básico de engranaje de la corona	1.25	k_c	Factor clearance	0.125
x_{smn}	Coeficiente de modificación de espesor	0.03	k_t	Factor de espesor	0.06
j_{en}	Reacción externa				0.13
θ_{a2}	Ángulo de la rueda addendum				1.38
θ_{f2}	Ángulo de la rueda dedendum				4.17

Tabla 3. Datos adicionales para el cálculo de las dimensiones del engranaje. Fuente Autor.

4.3.1 ÁNGULO DE PRESIÓN NORMAL

Existen tres tipos de ángulos de presión normal que debemos considerar.

- ✓ Ángulo de presión de diseño nominal, α_d , es un valor necesario para el inicio del cálculo. Puede ser la mitad de la suma de los ángulos de presión o diferentes en el lado conductor y el conducido.
- ✓ Ángulo de presión generado, α_n , es el ángulo de presión del engranaje generador; se puede hallar en el flanco del diente en la sección media normal.
- ✓ Ángulo de presión efectivo, α_e , será un valor calculado.

El ángulo de presión de diseño que más se utiliza para los engranajes cónicos es de 20°. Basado en lo anterior el ángulo afecta el diseño del engranaje de varias maneras. Los ángulos más bajos pueden aumentar la relación de contacto transversal, reduce las fuerzas axiales y de separación, aumentando el ancho de ranura.

En cuanto a los engranajes cónicos, la presión limite siempre es igual a cero, los ángulos de presión de diseño nominal tendrán los mismos valores que los ángulos de presión generados.

Para evitar el corte en los engranajes cónicos espirales, se usa un ángulo de presión de diseño de 20° o superior para piñones con 12 o menos dientes.

4.3.2 PROFUNDIDAD DEL DIENTE

Normalmente la norma internacional define un factor de profundidad, k_d , es de 2 este se usa para el cálculo de la profundidad de trabajo medio h_{mw} , pero puede variar para el diseño. En la tabla 4 se proporcionan los factores de profundidad sugeridos que se basan en el número de dientes del piñón. [1]

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 4. Factor de profundidad. Fuente [1]

4.3.3 FACTOR CLEARANCE

El espacio libre es constante a lo largo de toda la longitud de los dientes, este cálculo se realiza en el punto medio. Normalmente, el valor de es 0.125 se usa para el factor clearance, k_c , pero puede variar para ser adaptado al diseño y otro requisitos.

4.3.4 FACTOR MEDIO ADDENDUM

Este factor aporta la profundidad de trabajo entre el addendum del piñón y la rueda. Por lo general, el addendum del piñón suele ser más largo que el addendum de la rueda, Los valores sugeridos para los engranajes con ángulos de eje $\Sigma = 90$ se encuentra en la tabla 5.

Ángulo de desplazamiento de la rueda en el plano axial, η .

$$\eta = a \sin(\sin \zeta_m \cos \delta_2) \quad (4)$$

Donde,

- ✓ a = Compensación hipoide.
- ✓ ζ_m = Ángulo de desplazamiento del piñón en el plano axial.
- ✓ δ_2 = Ángulo de paso de la rueda.

Relación equivalente, u_a .

$$u_a = \sqrt{\frac{\cos \delta_1 \tan \delta_2 \cos \eta}{\cos \delta_2}} \quad (5)$$

Donde,

- ✓ δ_1 = Ángulo de paso del piñón.

Reemplazando en la ecuación 4.

$$\eta = 0 * \sin(\sin(0) * \cos(63.43))$$

$$\eta = 0$$

Reemplazando en la ecuación 5.

$$u_a = \sqrt{\frac{\cos(26.57) * \tan(63.43) * \cos(0)}{\cos(63.43)}}$$

$$u_a = 2$$

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
Zerol bevel	$0,210 + 0,290/u_a^2$	13 or more

Tabla 5. Factor medio addendum. Fuente [1]

De la tabla 5 podemos obtener la ecuación con la cual hallaremos el valor de c_{ham} .

$$c_{ham} = 0.210 + \frac{0.290}{u_a^2} \quad (6)$$

Reemplazando en la ecuación 6, el valor obtenido en la ecuación 6.

$$c_{ham} = 0.210 + \frac{0.290}{2^2}$$

$$c_{ham} = 0.28$$

4.3.5 FACTOR DE ESPESOR

El espesor circular medio normal se calcula en el punto medio. El valor de k_t se basan en el esfuerzo a flexión equilibrado y se halla mediante la Figura 11, la norma internacional plantea una ecuación para ser más precisos en este factor. [1]

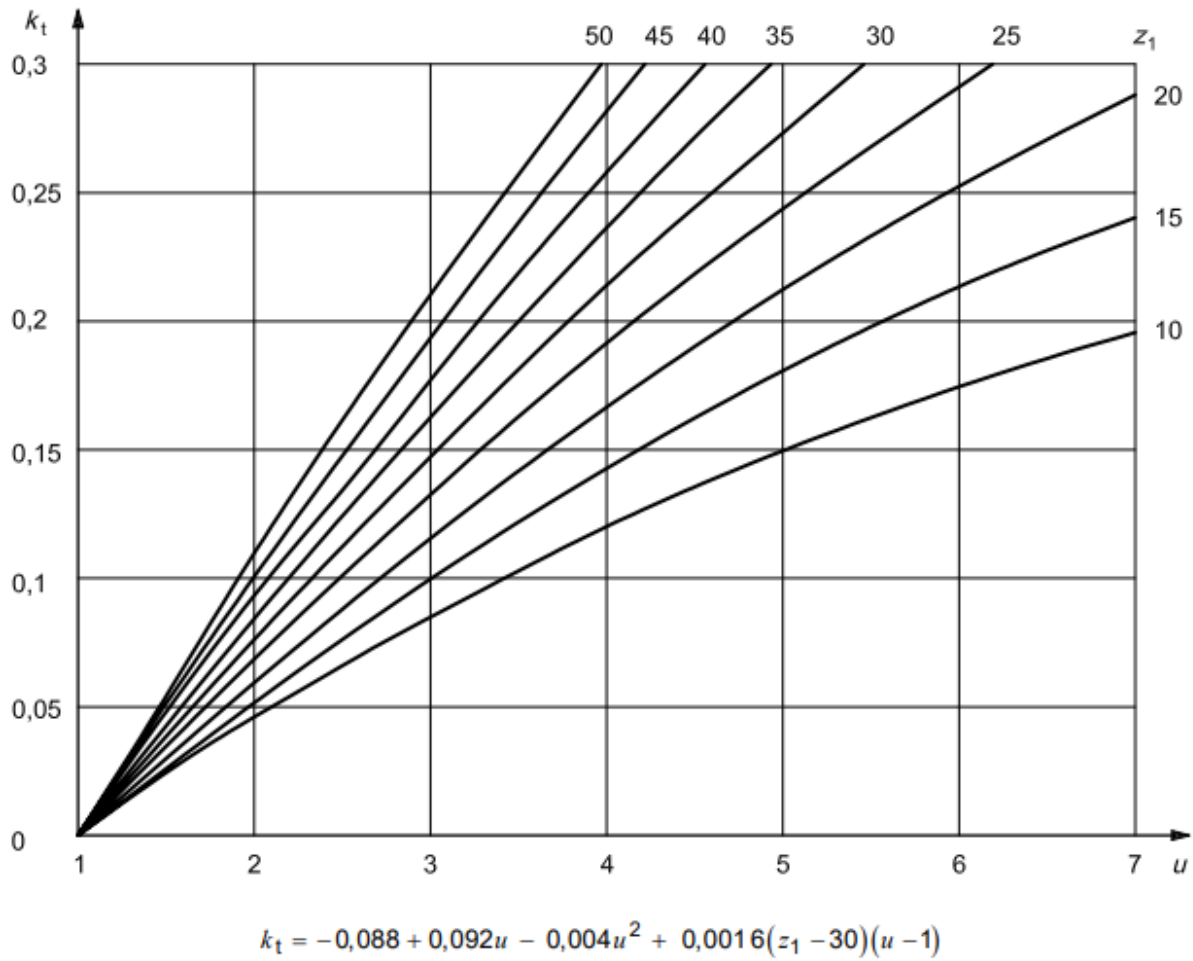


Figura 11. Factor de espesor. Fuente [1]

Ecuación planteada por la norma internacional.

$$k_t = -0.088 + 0.092u - 0.004u^2 + 0.0016(z_1 - 30)(u - 1) \quad (7)$$

Donde,

- ✓ u = Relación de transmisión de potencia.
- ✓ Z_1 = Número de dientes del piñon.

Reemplazando en la ecuación 7.

$$k_t = -0.088 + 0.092 * 2 - 0.004 * 2^2 + 0.0016 * (17 - 30) * (2 - 1)$$

$$k_t = 0.06$$

4.3.6 REACCIÓN NORMAL EXTERNA

El valor mínimo sugerido para la reacción externa está determinado en la tabla 6. Se observa que la dicha reacción es proporcional al módulo.

Outer transverse module	Minimum normal backlash mm	
	ISO accuracy grades	
	4 to 7	8 to 12
25,00 to 20,00	0,61	0,81
20,00 to 16,00	0,51	0,69
16,00 to 12,00	0,38	0,51
12,00 to 10,00	0,30	0,41
10,00 to 8,00	0,25	0,33
8,00 to 6,00	0,20	0,25
6,00 to 5,00	0,15	0,20
5,00 to 4,00	0,13	0,15
4,00 to 3,00	0,10	0,13
3,00 to 2,50	0,08	0,10
2,50 to 2,00	0,05	0,08
2,00 to 1,50	0,05	0,08
1,50 to 1,25	0,03	0,05
1,25 to 1,00	0,03	0,05

Tabla 6. Reacción mínima normal exterior. Fuente [1]

Teniendo en cuenta que nuestro modulo transversal exterior es de $m_{et2} = 4.41$, podemos obtener el valor de la reacción mínima exterior observando la tabla 6. Con una precisión de grados 4 – 7.

$$j_{en} = 0.13$$

4.3.7 ÁNGULO ADDENDUM Y DEDENDUM DE LA RUEDA

La suma de los ángulos de dedendum del piñón y la rueda es un valor que se calcula y establece el cono de profundidad que se elige con el método de corte. Las ecuaciones para su respectivo cálculo se visualizan en la tabla 7.

Depthwise taper	Sum of dedendum angles (degrees)
Standard	$\Sigma \theta_{fs} = \arctan\left(\frac{h_{fm1}}{R_{m2}}\right) + \arctan\left(\frac{h_{fm2}}{R_{m2}}\right)$ (C.3)
Uniform depth	$\Sigma \theta_{fU} = 0$
Constant slot width	$\Sigma \theta_{fC} = \left(\frac{90m_{et}}{R_{e2} \tan \alpha_n \cos \beta_m}\right) \left(1 - \frac{R_{m2} \sin \beta_{m2}}{r_{c0}}\right)$ (C.4)
Modified slot width	$\Sigma \theta_{fM} = \Sigma \theta_{fC}$ or $\Sigma \theta_{fM} = 1,3 \Sigma \theta_{fs}$, whichever is smaller (C.5)

Tabla 7. Reacción mínima normal exterior. Fuente [1]

El método seleccionado es profundidad estándar, ya que este no depende del radio de la herramienta de corte, en esta configuración la profundidad cambia en proporción a la distancia del cono en cualquier sección particular del diente. La línea de raíz se extiende y se cruza con el eje del ápice del cono de paso, como se observa en la Figura 12.

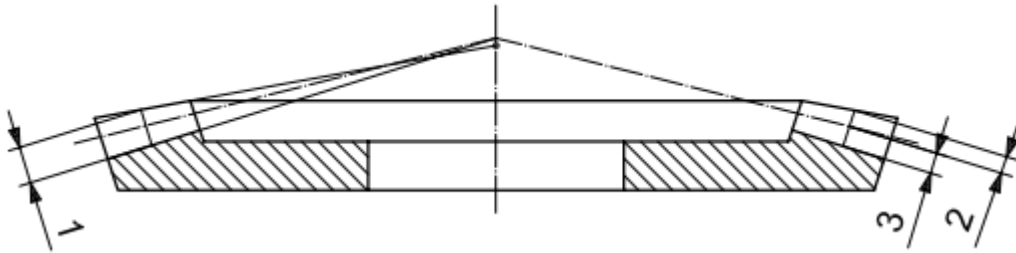


Figura 12. Profundidad estándar. Fuente [1]

La suma de los ángulos se divide entre el piñón y la rueda, utilizando las ecuaciones de la tabla 8.

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 8. Ángulos theta de la rueda. Fuente [1]

Reemplazando los valores en la ecuación C.3 de la tabla 7. Obtenemos.

$$\Sigma\theta_{fs} = 5.55^\circ$$

Reemplazando los valores en las ecuaciones C.6 y C.7 de la tabla 8, obtenemos los ángulos addendum y dedendum de la rueda.

$$\theta_{a2} = 1.38^\circ$$

$$\theta_{f2} = 4.17^\circ$$

4.3.8 TRANSFORMACION DE DATOS

El tipo de datos II se puede transformar directamente en el tipo de datos I y viceversa. En la tabla 9 se muestran las ecuaciones respectivas. Esto con el fin de relacionar el tipo de datos I a las dimensiones más representativas del engranaje.

Tipo de datos I	Tipo de datos II
$x_{hm1} = k_d \left(\frac{1}{2} - c_{ham} \right)$	$c_{ham} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x_{hm1}}{k_{hap}} \right)$
$k_{hap} = \frac{k_d}{2}$	$k_d = 2k_{hap}$
$k_{hfp} = k_d \left(k_c + \frac{1}{2} \right)$	$k_c = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{hfp}}{k_{hap}} - 1 \right)$
$x_{smn} = \frac{k_t}{2}$	$k_t = 2x_{smn}$

Tabla 9. Tipo de datos II y tipo de datos I. Fuente [1]

Usando las ecuaciones que se encuentran en la tabla 9. Podemos transformas el tipo de datos.

$$x_{hm1} = 2 * \left(\frac{1}{2} - 0.28 \right)$$

$$x_{hm1} = 0.44$$

$$k_{hap} = \frac{2}{2}$$

$$k_{hap} = 1$$

$$k_{hfp} = 2 * \left(0.125 + \frac{1}{2} \right)$$

$$k_{hfp} = 1.25$$

$$x_{smn} = \frac{0.06}{2}$$

$$x_{smn} = 0.03$$

4.4 DIMENSIONES DEL ENGRANAJE CONICO ESPIRAL

Las cotas más representativas del engranaje se plasman en la tabla 10. Con estos valores podemos generar un sólido en revolución del engranaje cónico espiral – rueda. (Figura 13, 14 y 15)

Variable	Descripción	Valor	Unidad
b_2	Ancho de cara de la rueda	25	mm
R_{e2}	Distancia del cono de paso exterior - Rueda	84	mm
R_{i2}	Distancia del cono de paso interior - Rueda	59	mm
δ_{a2}	Ángulo de la cara - Rueda	64.82	°
δ_2	Ángulo de paso - Rueda	63.43	°
δ_{f2}	Ángulo de la raíz - Rueda	59.27	°
r_{ai2}	Radio exterior interno - Rueda	53.38	mm
r_{i2}	Radio de paso interno - Rueda	53	mm
r_{fi2}	Radio interno – Rueda	51	mm
r_{ae2}	Radio exterior - Rueda	76	mm
r_{e2}	Radio de paso exterior – Rueda	75	mm
r_{fe2}	Radio exterior interno - Rueda	72.3	mm

Tabla 10. Valores para solido en revolución. Fuente Autor

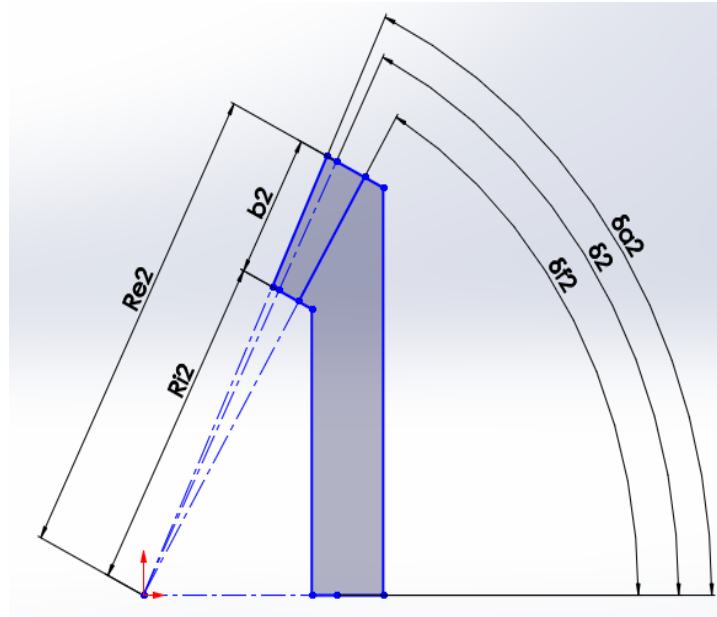


Figura 13. Ancho de cara, ángulos y distancias del cono de paso. Fuente Autor

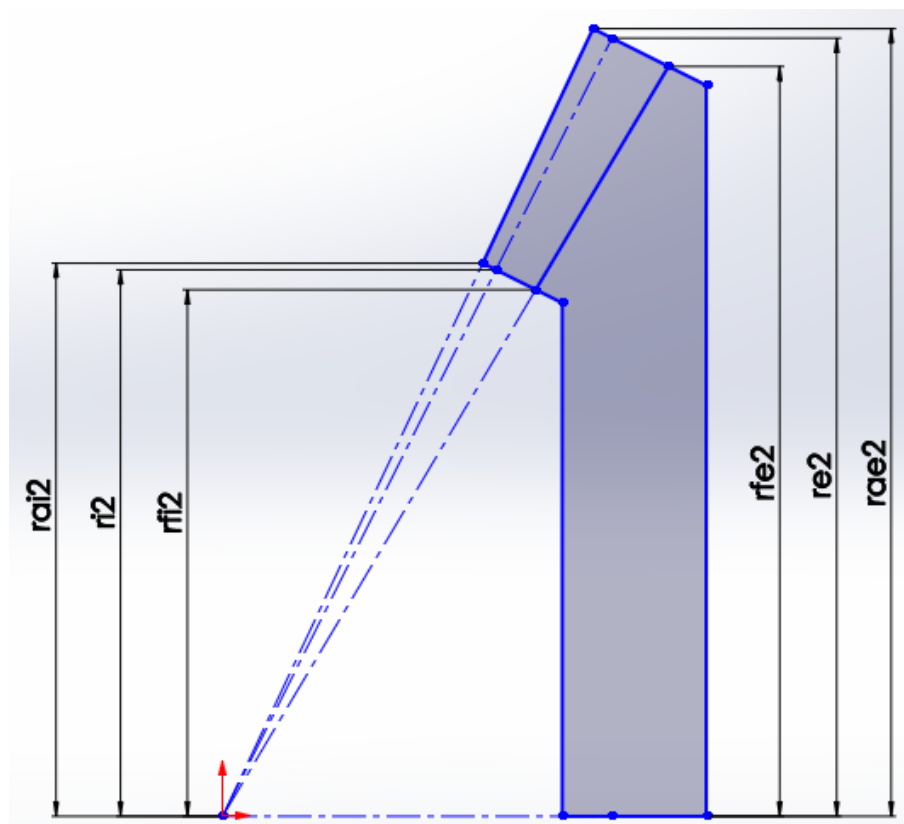


Figura 14. Ancho de cara, ángulos y distancias del cono de paso. Fuente Autor

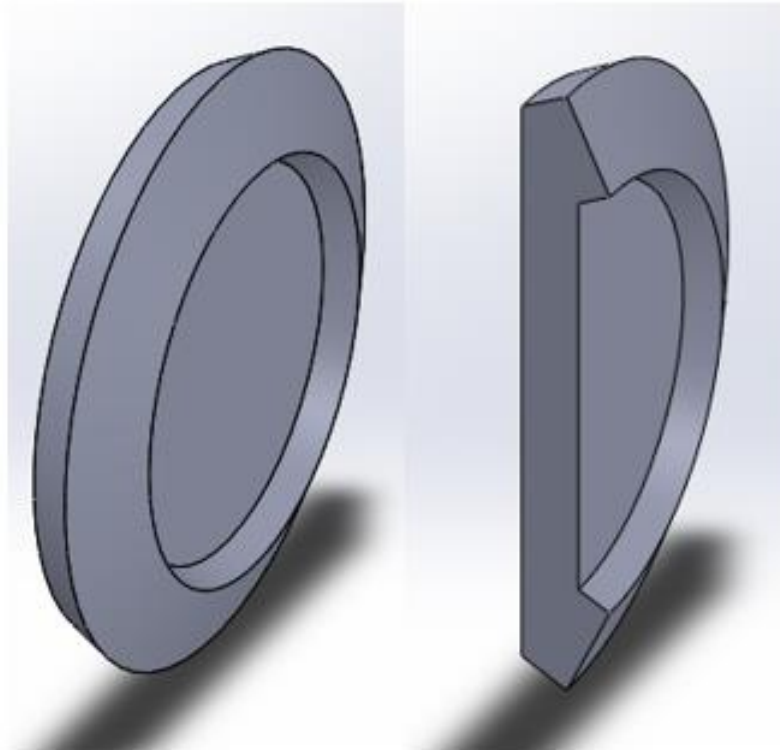


Figura 15. Modelo CAD, solido en revolución. Fuente Autor

4.5 GENERACIÓN DEL PERFIL DEL DIENTE

La geometría del diente del engranaje cónico espiral se puede obtener teóricamente con la ayuda de la cinemática de la máquina herramienta y la geometría de la herramienta. Las técnicas analíticas se establecen en la geometría del diente y la ecuación de involuta. Generando un cambio en la configuración de la máquina herramienta y los parámetros del cortador para obtener los cambios deseados en la geometría. [4]

Para este propósito, hace falta una superficie de referencia que cambia con la configuración de la máquina y los parámetros del cortador. Por lo tanto, existe la necesidad de que la referencia sea independiente de los parámetros nombrados anteriormente. La superficie espiraloide sirve a este propósito, ya que se deriva de los parámetros y se conoce como una superficie idealizada. [4]

Con este método, se establece una perpendicularidad a la superficie deseada desde el punto medio, y la distancia se calcula desde el punto mencionado hasta el pie de la perpendicularidad. Para dar solución, se resuelve un conjunto de ecuaciones no lineales con el esquema numérico adecuado. [4]

4.5.1 INVOLUTA ESPIRALOIDE

Cuando se obtiene un plano tangente que contiene el arco circular sobre el cono de base como se muestra en la Figura 16, se obtiene la superficie de la involuta espiraloide. Se observa que un punto en el arco circular a la distancia del cono r_i genera el envolvente esférico desde el momento en que el plano tangente comiza a rodar sobre el cono base. Cualquier punto como P a una distancia r comienza a generar el involuto esférico, después de rodar sobre cierto ángulo. [4]

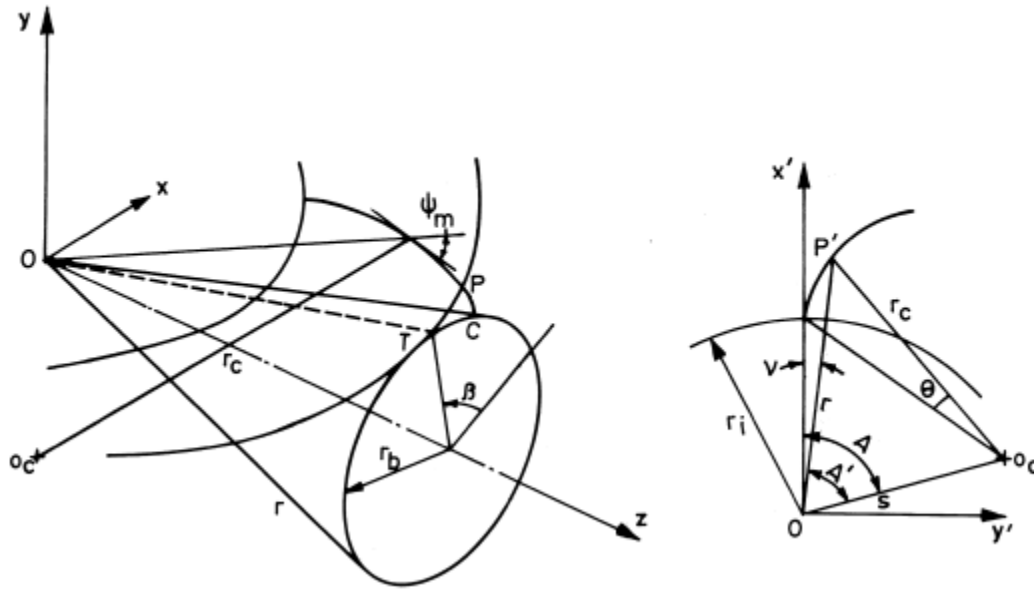


Figura 16. Sistema de coordenadas de involuta espiraloide, Fuente [4]

En la Figura 16. Se muestra el arco circular con radio r_c y un centro en O_c . Las coordenadas de un punto P en el arco circular a una distancia de cono r y un ángulo v están dados por.

$$x' = r * \cos(v)$$

$$y' = r * \sin(v)$$

El ángulo polar v se calcula de la siguiente manera.

$$v = A - A' \quad (8)$$

La distancia entre el centro de la corona del engranaje y el centro de corte s viene dado por.

$$s = \sqrt{a_m^2 + r_c^2 - 2a_m r_c \sin \psi_m} \quad (9)$$

Donde a_m es la distancia media del cono y ψ_m es el ángulo espiral medio.

El ángulo A se calcula como.

$$A = \cos^{-1} \left[\frac{s^2 + r_i^2 - r_c^2}{2sr_i} \right] \quad (10)$$

El ángulo A' se calcula como.

$$A' = \cos^{-1} \left[\frac{s^2 + r^2 - r_c^2}{2sr} \right] \quad (11)$$

La ecuación del plano tangente está dada por.

$$x \cos \alpha \cos \beta + y \cos \alpha \sin \beta - z \sin \alpha = 0$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$(x - r \sin \alpha \cos \beta)^2 + (y - r \sin \alpha \sin \beta)^2 + (z - r \cos \alpha)^2 = 4r^2 \sin^2 \left(\frac{\beta \sin \alpha - \nu}{2} \right)$$

Figura 17. Ecuaciones del plano tangente. Fuente [4]

Las coordenadas resultantes están dadas por.

$$x = r \cos(\beta \sin \alpha - \nu) \sin \alpha \cos \beta + r \sin(\beta \sin \alpha - \nu) \sin \beta$$

$$y = r \cos(\beta \sin \alpha - \nu) \sin \alpha \sin \beta - r \sin(\beta \sin \alpha - \nu) \cos \beta$$

$$z = r \cos(\beta \sin \alpha - \nu) \cos \alpha$$

Figura 18. Coordenadas resultantes. Fuente [4]

Resolviendo las ecuaciones 8,9,10 y 11 para obtener los valores correspondientes y reemplazar en los en las coordenadas resultantes se observan en la tabla 11.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
a_m	Distancia media del cono	71.3525	mm
r_c	Radio del cortador de la herramienta	92	mm
ψ_m	Ángulo de espiral medio	35	°
s	-	77.62	mm

r_i	Distancia del cono interno	51	mm
A	-	88.83	°
A'	-	69.34	°
ν	Ángulo polar en el arco circular	19.48	°

Tabla 11. Valores de las ecuaciones. Fuente Autor

Con ayuda del software SolidWorks y su herramienta de “curva conducida por una ecuación” reemplazamos las diferentes ecuaciones de la figura 18, para obtener el perfil de involuta espiraloide. (Figura 19)

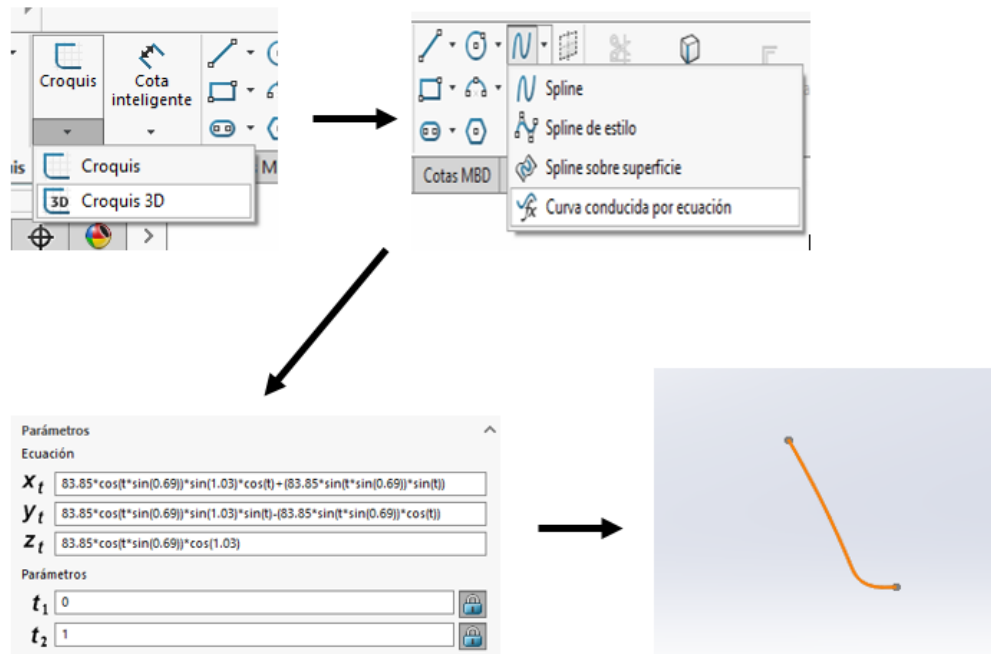


Figura 19. Curva conducida por una ecuación perfil de involuta espiraloide. Fuente Autor.

Ubicando el perfil de la involuta espiraloide en el sólido de revolución mediante un plano tangente a la parte exterior del engranaje. (Figura 20)

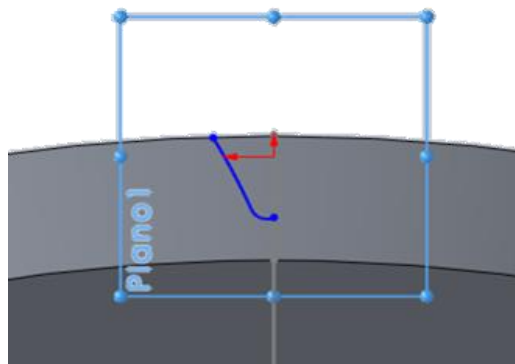


Figura 20. Perfil de involuta. Fuente Autor

El perfil se completa cerrando el croquis (Figura 21) para realizar un corte de barrido y generar el perfil del diente correspondiente.

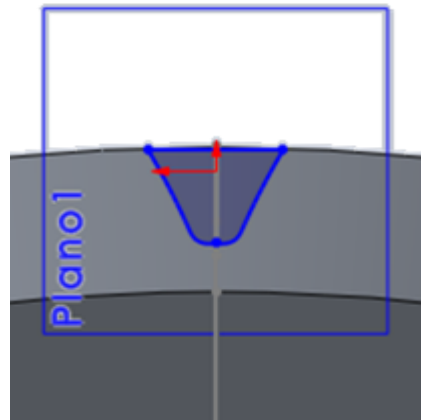


Figura 21. Croquis del perfil del diente cerrado. Fuente Autor.

La curva guía para generar el corte de barrido se genera a partir del método de FaceMilling (Figura 22). Adjuntando sus dimensiones más representativas. (Tabla 13).

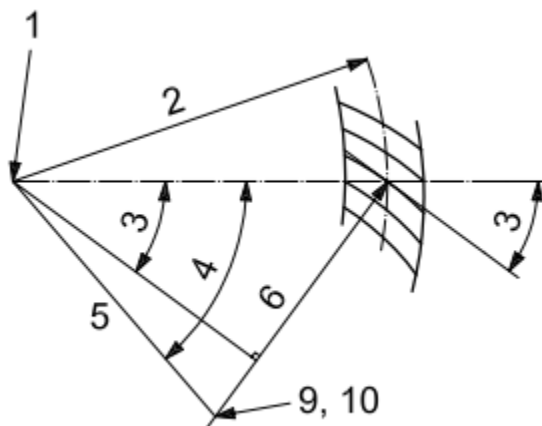


Figura 22. Proceso de FaceMilling. Fuente [1]

Variable	Descripción	Valor
(2) R_{m2}	Distancia media del cono	71.35 mm
(3) β_{m2}	Ángulo en espiral	35°
(6) r_{c0}	Radio del cortador	92 mm

Tabla 12. Variables representativas del proceso FaceMilling. Fuente Autor.

La curva de corte con el método FaceMilling sobre el modelo CAD se observa en la siguiente figura. (Figura 23)

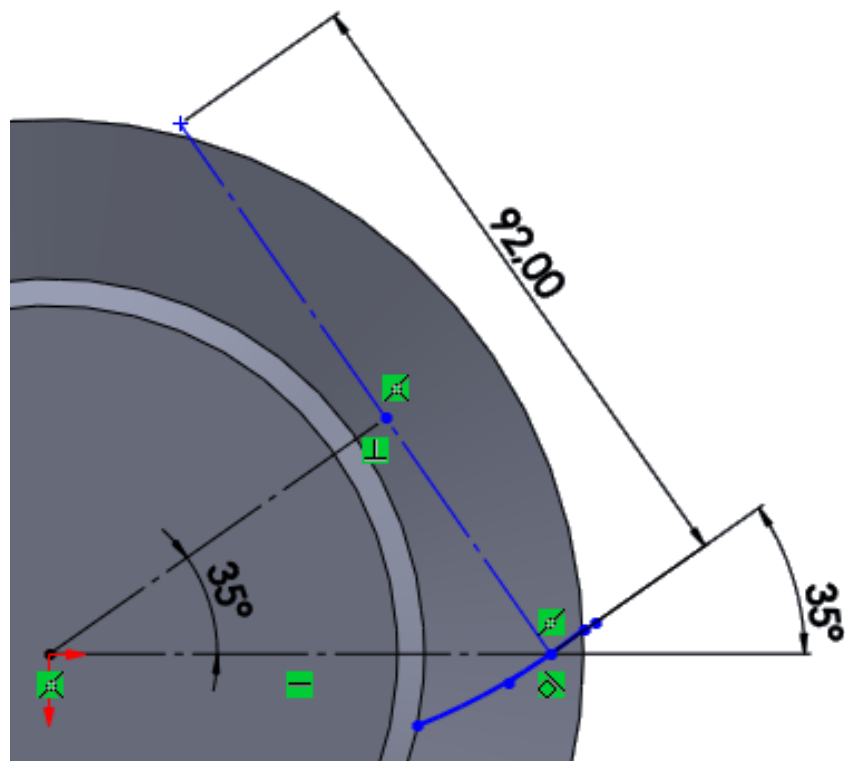


Figura 23. Método FaceMilling en CAD. Fuente Autor.

Con base en los anteriores procedimientos, se ejecuta el corte de barrido para generar el perfil del diente en el engranaje cónico espiral y presentar el par de engranajes. (Figura 24 y 25)

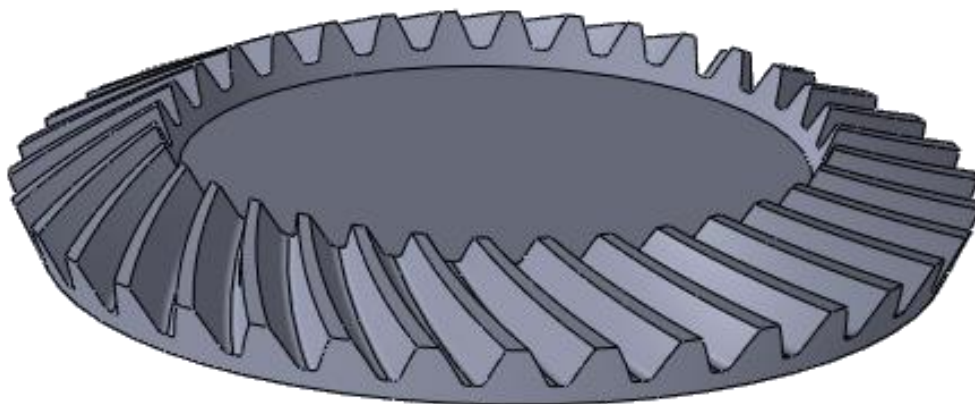


Figura 24. Engranaje cónico espiral.

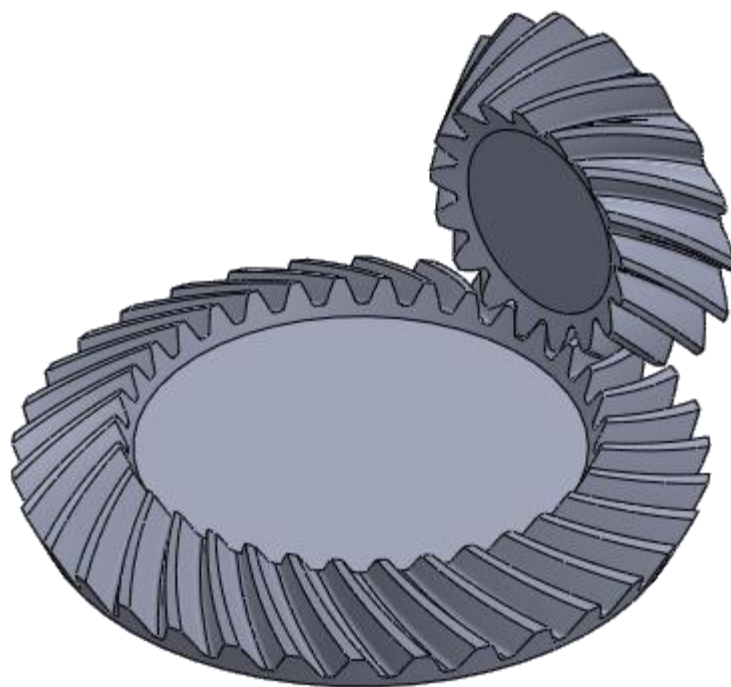


Figura 25. Par de engranajes cónicos espirales. Fuente Autor

5. PROCESO DE MANUFACTURA

Para el respectivo proceso de manufactura se plantea seguir el diagrama de trabajo plasmado en la siguiente figura (Figura 26), el cual describe todo el paso a paso que se desea ejecutar.

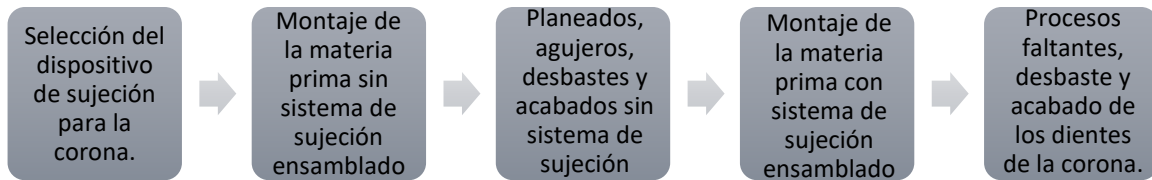


Figura 26. Paso a paso proceso de manufactura. Fuente Autor

5.1 ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN

La sujeción de la pieza de trabajo es la parte más esencial del mecanizado, independientemente si se usan maquinas convencionales o máquinas de control numérico. [5]

Aproximadamente el 40% de las piezas de manufactura son rechazadas por errores de dimensionamiento, esto se debe al diseño de accesorios deficientes. Dichos elementos tienen como finalidad el posicionamiento con precisión y limitar adecuadamente las respectivas piezas de trabajo en el sistema de coordenadas de la máquina. [6]

Actualmente, los procedimientos de fijación proporcionan a los fabricantes una capacidad de mecanizado al mantener la pieza de trabajo en orientaciones que no son factibles con la máquina herramienta base. Por lo tanto, se puede ahorrar el costo significativo de adquirir maquinas herramientas costosas. Además, la modularidad y la reconfigurabilidad de los mismos accesorios permiten la reutilización de los recursos de fabricación. Estos accesorios modulares se consideran adecuados para realizar sistemas de fabricación CNC reconfigurables. [7]

Los sistemas de fijación se basan en la estandarización de sus componentes, y se diseñan como un grupo de elementos estándar con tolerancias relativamente estrictas. Dichos elementos se pueden juntar en diferentes variedades para sujetar las diferentes piezas. [8]

5.1.1 DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN

Para el dispositivo de sujeción se utilizó el principio de posicionamiento 3-2-1, el cual restringe los movimientos de la pieza en sus respectivos ejes X-Y-Z, se logra con la adición de fuerzas externas eliminando los seis grados de libertad. Estas restricciones se dan en rotación y traslación (Figura 27). Se plantea el sistema de sujeción cumpliendo los parámetros descritos anteriormente. (Figura 28)

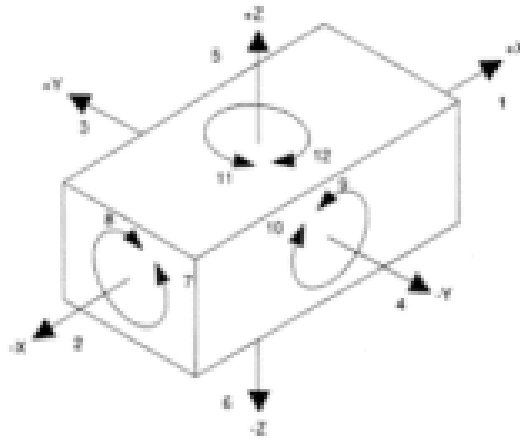


Figura 27. Restricción de movimientos. Fuente [6]

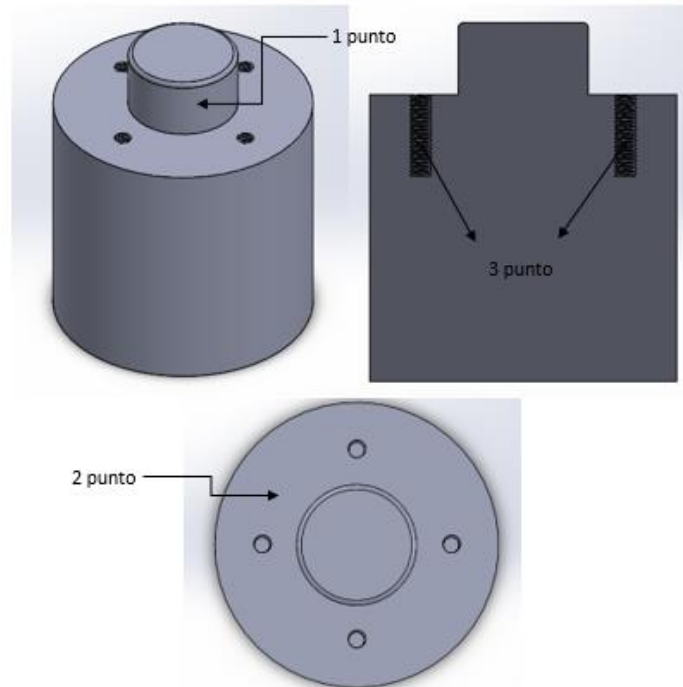


Figura 28. Sistema de sujeción. Fuente Autor

5.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN

El diámetro de la sección donde será sujetado el sistema es de (60 mm), con una longitud de 56mm. El cambio de sección corresponde a un diámetro de (25 mm) por una longitud de 14 mm, esto con el fin de ubicar el comparador para su alineación. Para más detalle. (Anexo 1)

Se presenta el ensamble entre la corona y el sistema de sujeción planteado. (Figura 29)

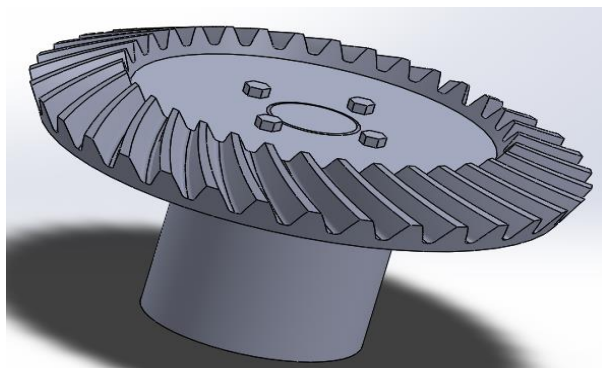


Figura 29. Ensamble del sistema de sujeción y corona. Fuente Autor

5.2 COMPONENTES SIMULACIÓN VIRTUAL

En el mundo de la manufactura se han desarrollado simuladores CNC, esto permite planificar, programar y comprobar el mecanizado que se desea realizar, teniendo en cuenta todos los componentes en el entorno de programación. Todas las máquinas, herramientas, dispositivos de sujeción se adjuntan como gemelos digitales para el entorno de fabricación virtual. Con el fin de hallar y solventar posibles inconvenientes de colisiones y límites. Teniendo en cuenta lo mencionado la máquina virtual con la que se generara la corona del engranaje cónico espiral es la FINETECH GTX-210 de la Universidad Santo Tomás, considerando sus características técnicas de operación. (Figura 30)

		GTX-210
	X/Y/Z travel	320X450X380 mm
	B-axis tilt range	-40 – 110°
Travel	C-axis rotation angle	360°
	Max workpiece size	Ø200*160L
	Spindle nose to work	0-380mm
Axes feed rates	X/Y/Z - axis	36 m/min
C-axis work table dia		Ø210
Centering hole dia		Ø40H7
T slot	Standard	12H7 mm*1
	B axis	25 rpm
Work table max	C axis	25 rpm
Max workpiece weight		50 – 75 Kg

Figura 30. Especificaciones máquina FINETECH GTX - 210. Fuente GTX-210

5.2.1 MÁQUINAS VIRTUALES Y HERRAMIENTAS DE CORTE

Para la verificación y simulación de trayectorias del proceso de manufactura, se realizó con la ayuda del software NX y se seleccionó el equipo FINETECH GTX-210 porque es el equipo del

que dispone la Universidad (Figura 31), en la cual se han realizado varias simulaciones para la obtención de diferentes engranajes. [14] [15] [16]

En el entorno de fabricación se proceden a realizar las operaciones para la preparación de la materia prima, posteriormente se realiza el desbaste y acabado de los dientes.

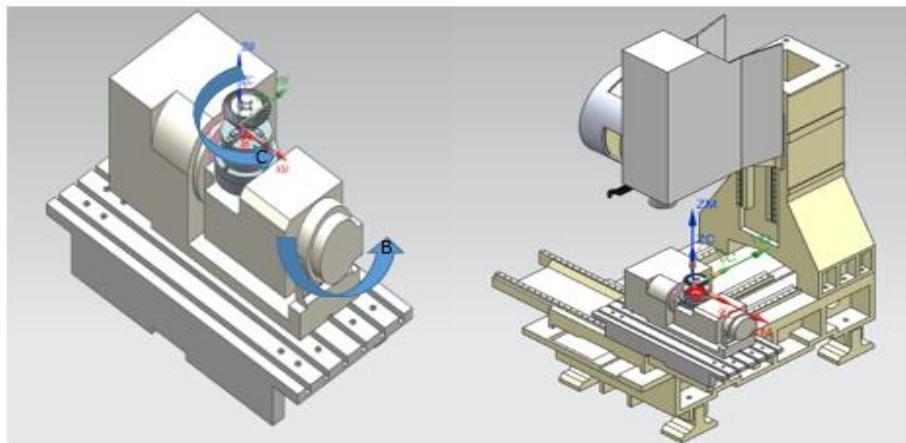
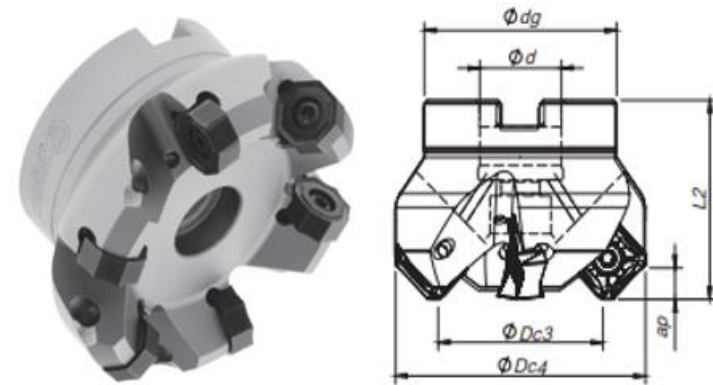


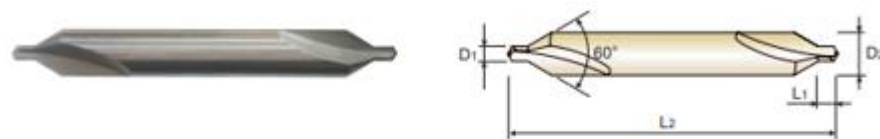
Figura 31. Máquina virtual FINETECH GTX-210, pieza de trabajo y sistemas de sujeción. Fuente Autor

En la selección de las herramientas de corte se contó con el inventario que tiene la Universidad Santo Tomás en el centro de mecanizado FINETECH GTX-210, señalando las herramientas de mayor dimensión para cada operación. En el proceso de planeado de la parte superior e inferior de la materia prima se usó una fresa de planeado de diámetro 50 mm (Figura 32), en los procesos de agujeros se procede a realizar primero un centro punto con una broca de centro de diámetro 3.15mm (Figura 33), en el agujero del centro se utiliza una broca helicoidal de diámetro 7.8 mm (Figura 34), en los cuatro agujeros se utiliza una broca helicoidal de diámetro 4.2 mm (Figura 35), en los procesos de desbaste y acabado de la parte interior y exterior del engranaje se usa una fresa punta plana de diámetro 6 mm (Figura 36), para el desbaste de la parte superior de los dientes se usó una fresa de alto avance diámetro 32 mm (Figura 37), para el acabado de la parte superior de los dientes se usó una fresa de bola de diámetro 16 mm (Figura 38).



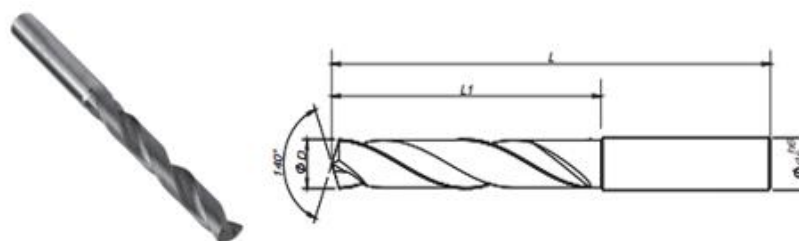
	Dimensions Dimensões Dimensiones (mm)								Kg	Specifications	
	ϕDc	$\phi Dc2$	$\phi Dc3$	$\phi Dc4$	ϕd	ϕdg	L	L2		Arbor Type	Ap (mm)
4	50	57,6	47,1	62	22	48	40	41,5	0,383	A	3,5 6,0

Figura 32. Fresa de planeado diámetro 50mm. Fuente [9]



Drill Diameter	Shank Diameter	Pilot Length	Overall Length
$D1$	$D2$	$L1$	$L2$
3.15	8	3.9	50

Figura 33. Broca de centro diámetro 3.15mm. Fuente [12]



Dimensions Dimensões Dimensiones (mm)				Z
ϕD	ϕds	L1	L	
7,8	8	53	91	2

Figura 34. Broca helicoidal diámetro 7.8mm. Fuente [12]

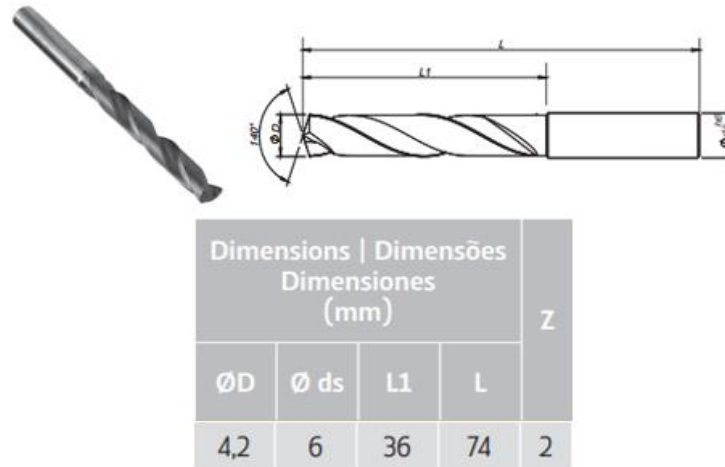


Figura 35. Broca helicoidal diámetro 7.8mm. Fuente [12]

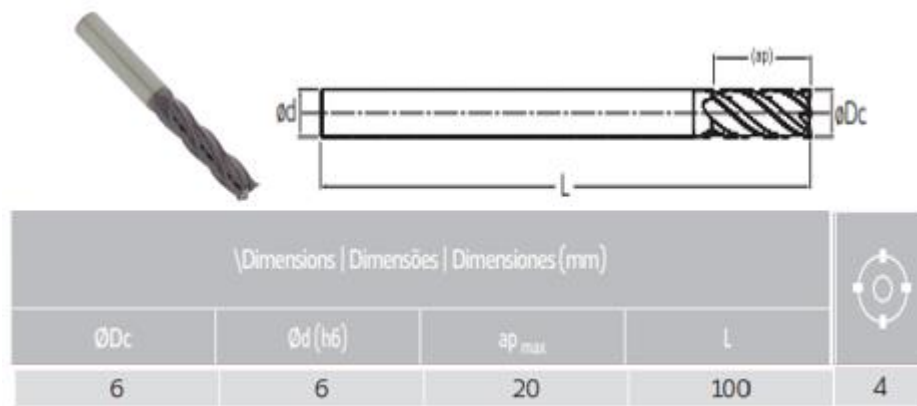


Figura 36. Fresa punta plana diámetro 6mm. Fuente [11]

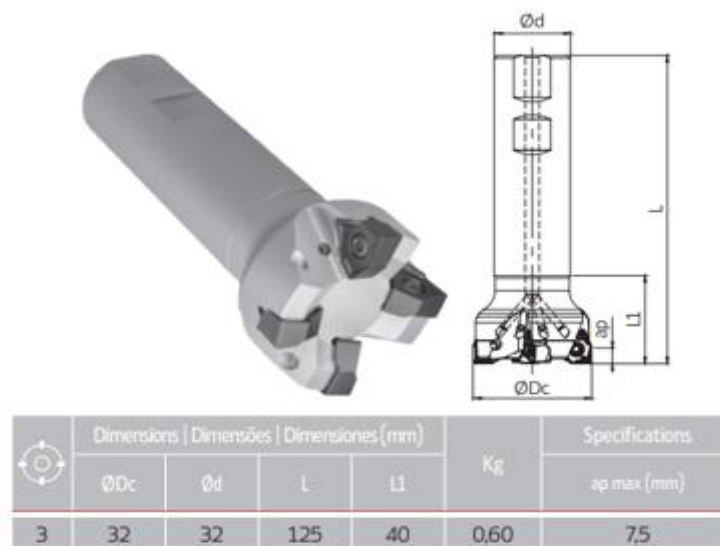


Figura 37. Fresa de alto avance diámetro 32mm. Fuente [10]

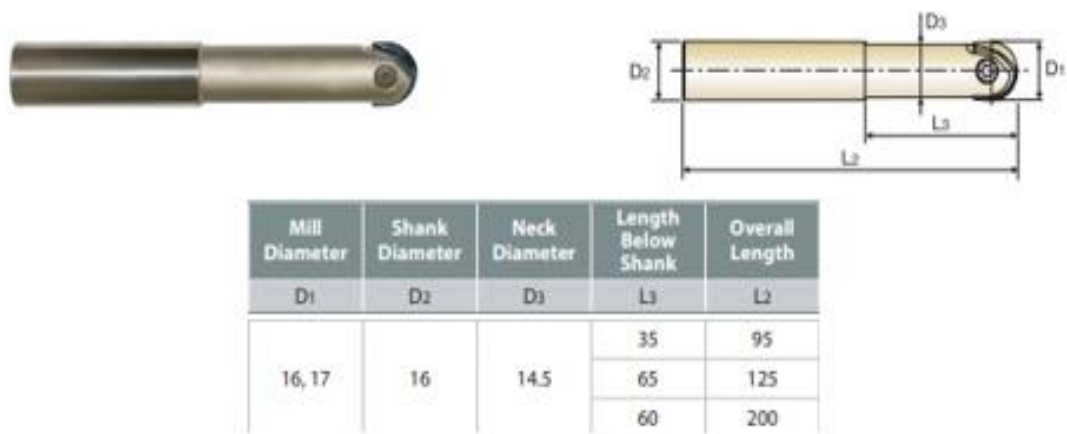


Figura 38. Fresa de bola diámetro 16mm. Fuente [13]

Por otra parte, para la selección de las herramientas de corte del desbaste y acabado de los dientes se debe tener presente el radio del flanco, Con ayuda de un software CAD se realiza un análisis de curvatura para conocer estos valores. (Figura 39)

Los datos obtenidos se observan en la tabla 15.

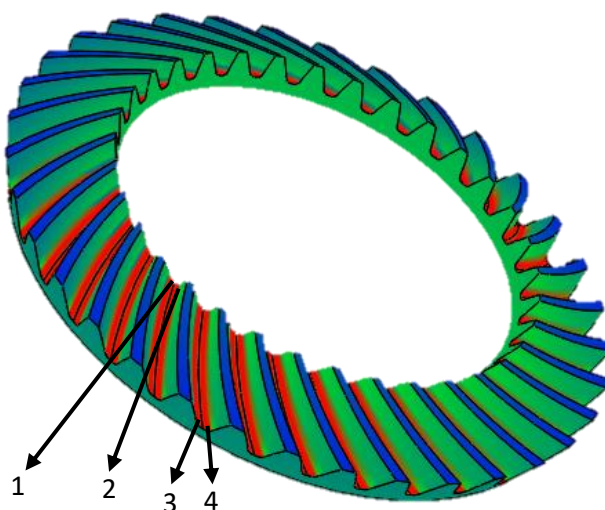


Figura 39. Análisis de curvatura CAD. Fuente Autor

Variable	Descripción	Valor	Unidades
1	Radio cono interior flanco izquierdo	0.99437	mm
2	Radio cono interior flanco derecho	0.992662	mm
3	Radio cono exterior flanco izquierdo	0.942192	mm
4	Radio cono exterior flanco derecho	0.996462	mm

Tabla 13. Valores análisis de curvatura. Fuente Autor

Se selecciona la herramienta para el desbaste una fresa plana de diámetro 2 mm (Figura 40), con los valores obtenidos en la tabla 15, se selecciona una fresa de bola de diámetro 2 mm para realizar el acabado de los dos flancos del diente (Figura 41). Detalles de los parámetros de corte de las herramientas (Anexo 2).

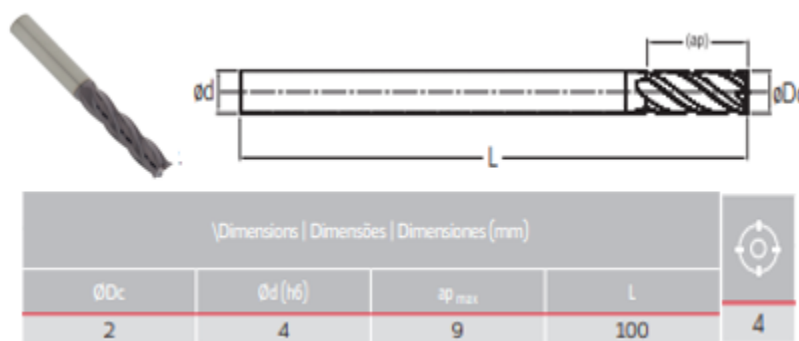


Figura 40. Fresa plana de diámetro 2 mm. Fuente [9]

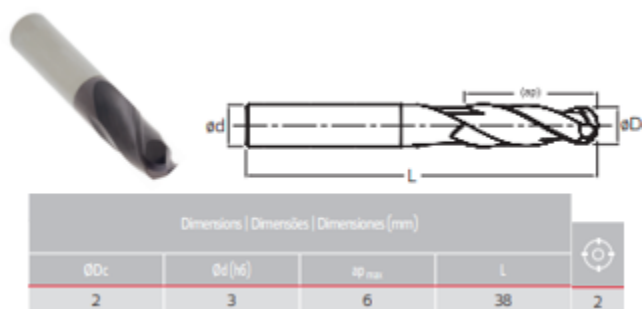


Figura 41. Fresa de bola diámetro 2 mm. Fuente [9]

6. PROPUESTA CAM PARA LA PREPARACIÓN DE MATERIA PRIMA Y OBTENCIÓN DE LOS DIENTES

Teniendo en cuenta las limitaciones que presenta el centro de mecanizado de la Universidad Santo Tomás debido que no puede trabajar los cinco ejes simultáneamente, se plantean las estrategias acordes para evitar esta limitación, parametrizando las estrategias de corte en movimientos de 3+2 y 4+1.

A continuación, se presentarán las estrategias usadas para la obtención del engranaje cónico espiral (Figura 42).

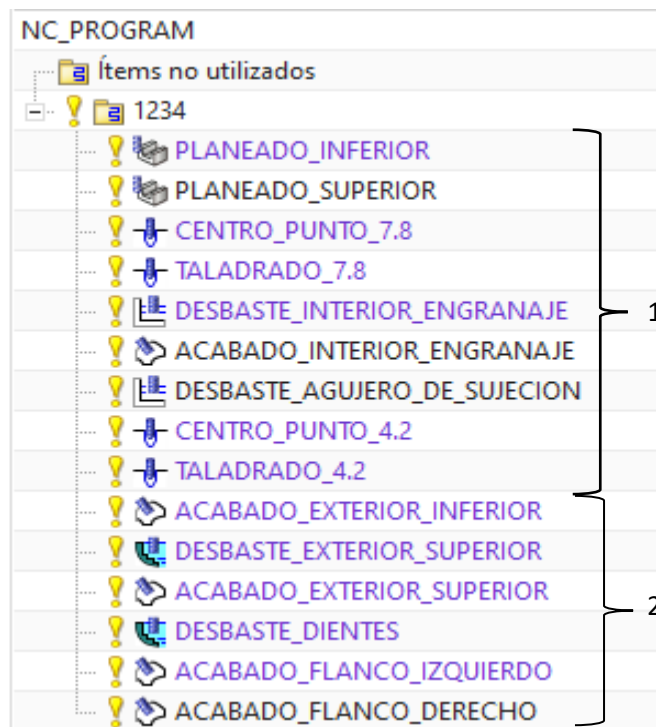


Figura 42. Árbol de estrategias. Fuente Autor

En las estrategias que se presentaran en el grupo n° 1, la materia prima está fijada mediante el sistema de sujeción de la copa de cuatro mordazas del centro de mecanizado. En el grupo n° 2, se ensambla el sistema de sujeción planteado y se fija con la ayuda de la copa de cuatro mordazas.

6.1 TRAYECTORIAS DE PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

6.1.1 PLANEADO PARTE INFERIOR Y SUPERIOR DEL ENGRANAJE

En el proceso de planeado se plantea la estrategia **FRESADO FRONTAL CON LIMITES**, en la cual genera el corte de forma normal al eje de la herramienta fija que se encuentran dentro del área definida por los límites planarios.

Los límites normales al eje de la herramienta donde se desea realizar el corte se seleccionan mediante caras, curvas o puntos. Se planearon dos milímetros a partir de la materia prima en las dos estrategias, con patrón de corte **zigzag**, con un avance de 454.8 mm/m y una duración de 4 minutos y 48 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso para la parte inferior del engranaje, señalando los límites de corte. (Figura 43)

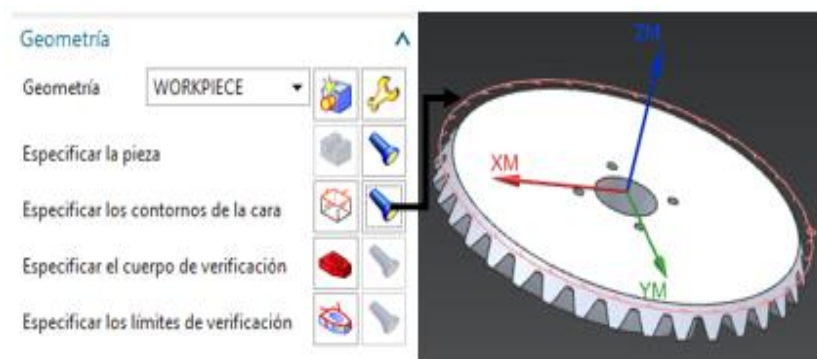


Figura 43. Límite de la pieza seleccionada mediante curvas parte inferior. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de planeado de la parte inferior del engranaje se observa en la siguiente figura. (Figura 44)

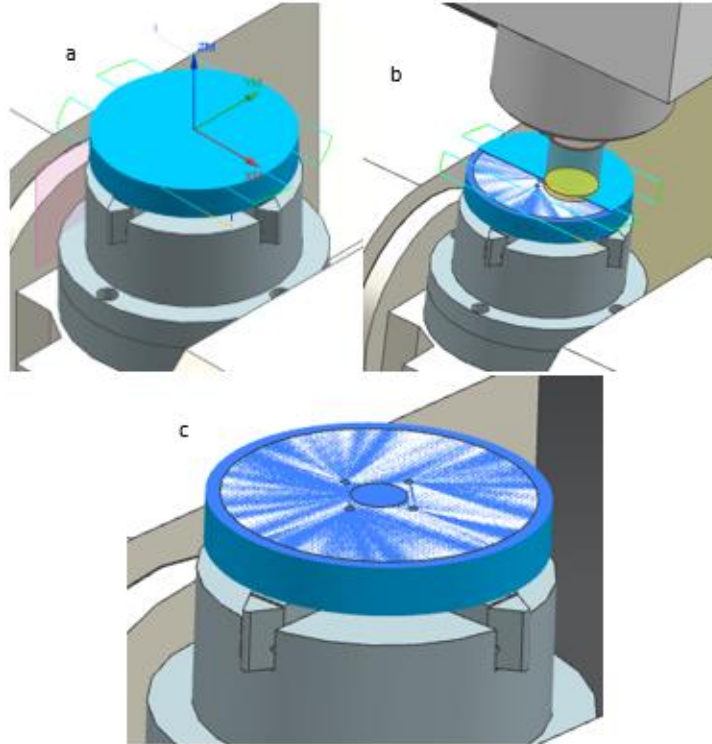


Figura 44. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

A continuación, se muestra el respectivo proceso para la parte superior del engranaje, señalando los límites de corte. (Figura 45)

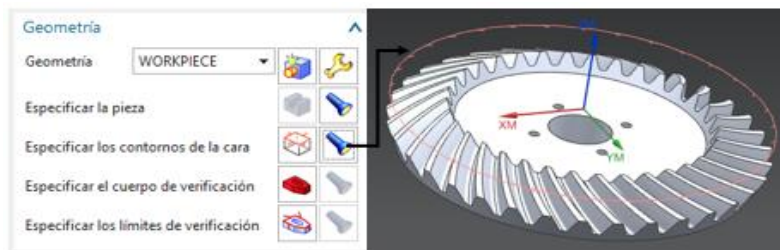


Figura 45. Límite de la pieza seleccionada mediante curvas parte superior. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de planeado de la parte superior del engranaje se observa en la siguiente figura. (Figura 46)

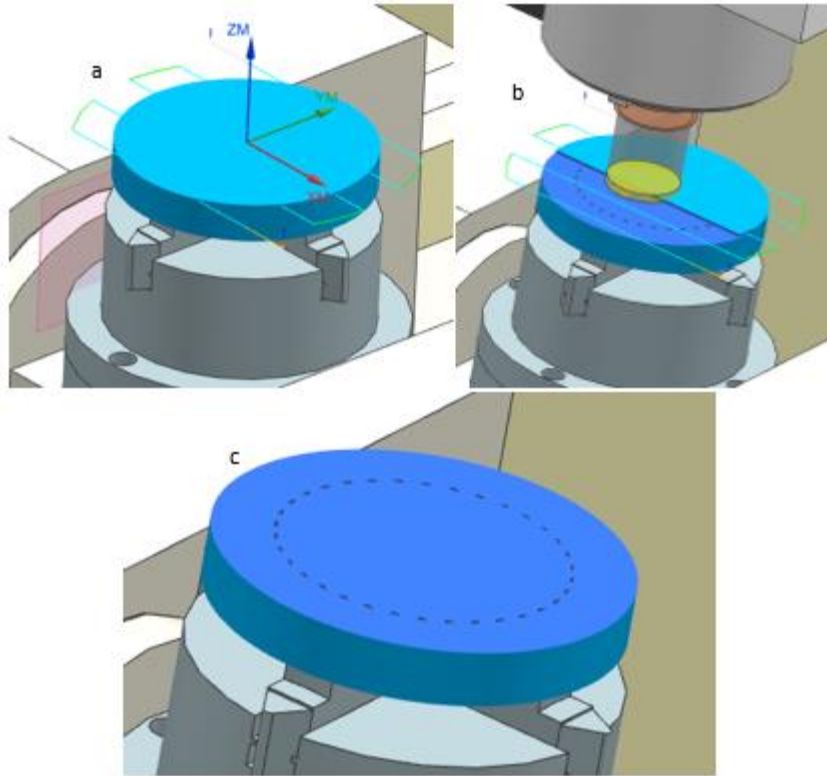


Figura 46. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.2 CENTRO PUNTO

En el proceso de los agujeros de centro punto se plantea la estrategia **TALADRO DE PUNTO**, se selecciona mediante la geometría del agujero con el fin de determinar el volumen de material que será retirado, en dicho proceso cuando se señalan dos o más geometrías se cambia de un movimiento único a un ciclo de máquina. El material removido lo señala automáticamente la estrategia, con un avance de 79.6 mm/m y una duración de 5 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso del agujero de centro punto para el taladrado de diámetro 7.8 mm en movimiento único, especificando la geometría. (Figura 47)

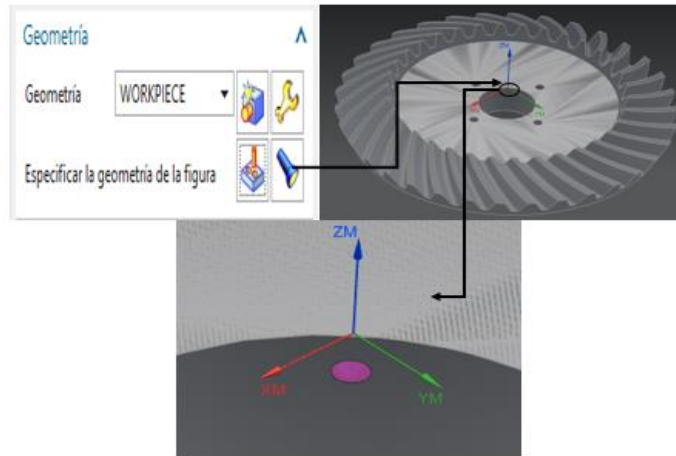


Figura 47. Selección del agujero central para el centro punto. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de estrategias de la estrategia de agujero de centro punto para el agujero de diámetro 7.8 mm se observa en la siguiente figura. (Figura 48)

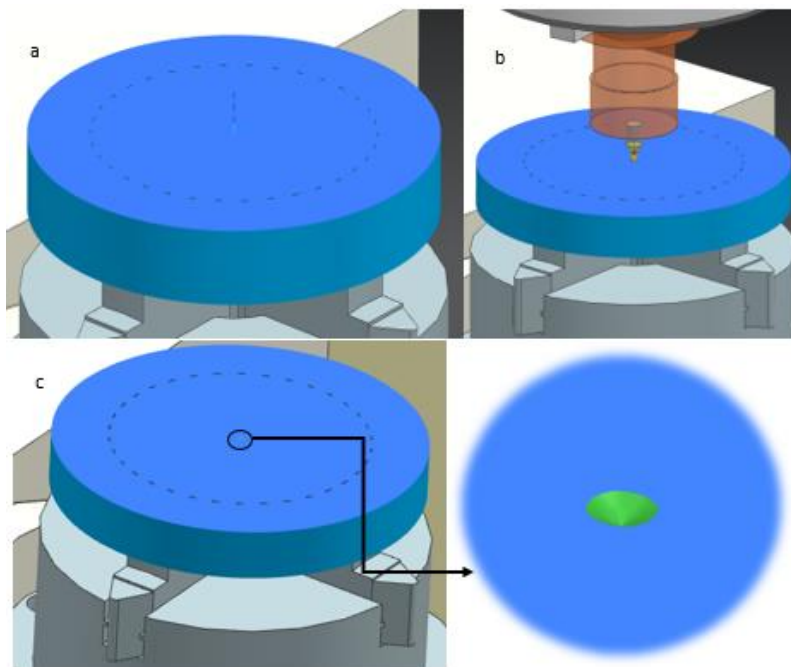


Figura 48. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.3 TALADRADO DIÁMETRO 7.8 mm

En el proceso de realizar el agujero central de la pieza se plantea la estrategia **TALADRADO**, se selecciona la geometría del agujero con el fin de determinar el volumen del material retirado, en dicho proceso cuando se señalan dos o más geometrías se cambia de un movimiento único a un

ciclo de máquina. La longitud de taladrado en este método es de 22.6 mm, con un avance de 1101.9 mm/m y una duración de 2 segundos.

A continuación, se muestra el proceso de taladrado del agujero de diámetro 7.8mm en un movimiento único, especificando la geometría. (Figura 49)

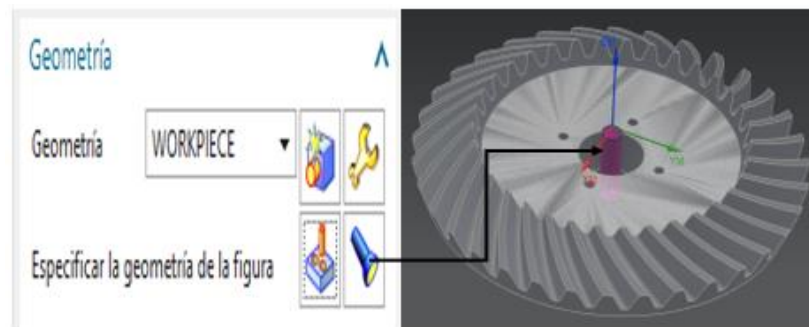


Figura 49. Selección de la geometría para el taladrado. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de taladrado del agujero de diámetro 7.8mm se observa en la siguiente figura. (Figura 50)

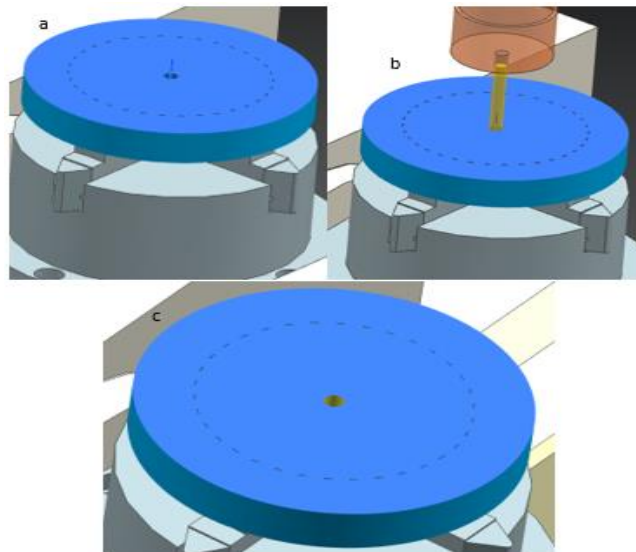


Figura 50. a). Trayectoria de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.4 DESBASTE PARTE INTERIOR DEL ENGRANAJE

En el proceso de desbaste interior del engranaje se plantea la estrategia **FRESADO PLANO**, remueve el material en niveles de cortes planarios normales al eje de la herramienta fija, se

definen los contornos de forma paralela al piso. Estos contornos definen los niveles de corte, se selecciona el piso para definir el corte inferior.

Al seleccionar los contornos se definen mediante caras, curvas o puntos, el material removido por nivel en este proceso es de 2 mm, con un patrón de corte de **seguir la pieza**, con un avance de 553.9 mm/m y una duración de 13 minutos y 18 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso de desbaste interior del engranaje, especificando los contornos, límites y pisos de la geometría. (Figura 51)

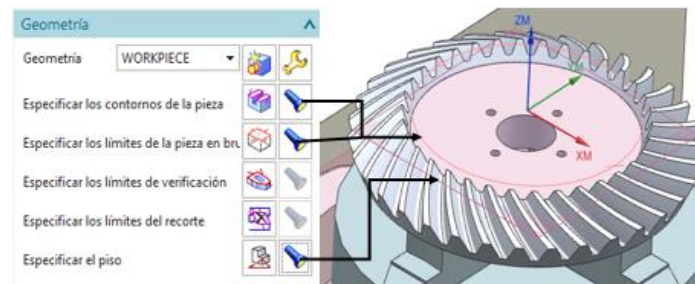


Figura 51. Selección de los contornos y piso. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de desbaste interior del engranaje se observa en la siguiente figura. (Figura 52)

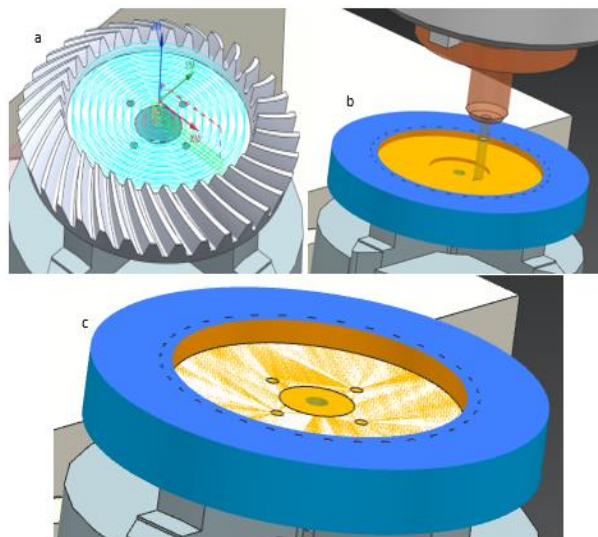


Figura 52. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.5 ACABADO PARTE INTERIOR DEL ENGRANAJE

En el proceso del acabado interior del engranaje se plantea la estrategia **PERFIL DE CONTORNO**, contornea la superficie con un eje variable perfilando las paredes sesgadas con la herramienta de corte, se especifica la geometría de la pieza y la geometría del piso.

El material removido por la herramienta será de 1 mm paralelo respecto a la geometría de la pared, con un avance de 553.9 mm/m y una duración de 2 minutos y 13 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso de acabado de la parte interior del engranaje, especificando la pared y el piso de la geometría. (Figura 53)

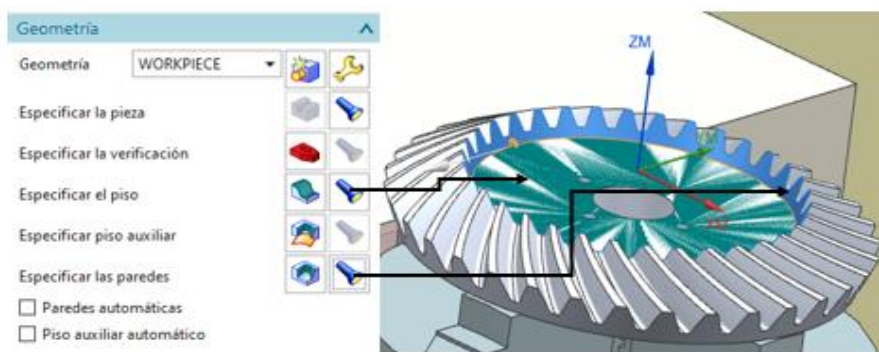


Figura 53. Selección de piso y paredes de la geometría. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia del acabado interior del engranaje se observa en la siguiente figura. (Figura 54)

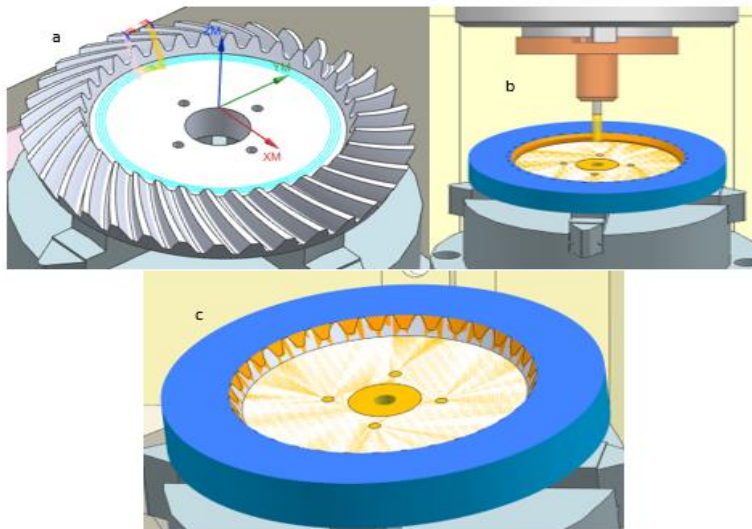


Figura 54. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.6 DESBASTE AGUJERO DE SUJECIÓN

En el proceso para el desbaste del agujero de sujeción, se plantea la misma estrategia que se ejecutó en el proceso de desbaste interior del engranaje, el material removido por cada nivel durante el proceso es de 2 mm, con un patrón de corte de **seguir la pieza**, un avance de 553.9 mm/m y una duración de 2 minutos y 46 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso del desbaste del agujero de sujeción. Especificando los contornos, límites y piso. (Figura 55)

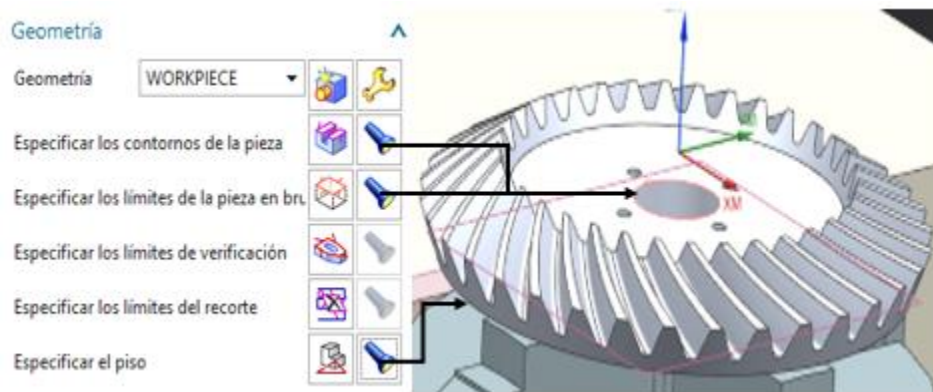


Figura 55. Selección de los contornos y piso. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de desbaste del agujero de sujeción se observa en la siguiente figura. (Figura 56)

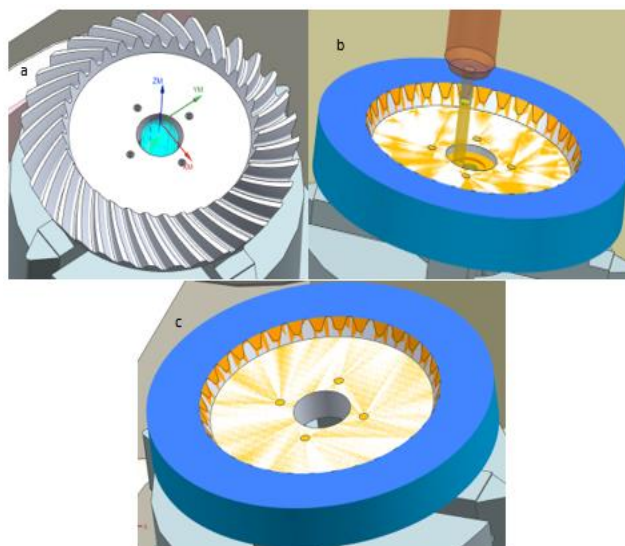


Figura 56. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.7 CENTRO PUNTO Y TALADRADO DE DIÁMETRO 4.2 mm

En el proceso de centro punto y taladrado para los agujeros de diámetro 4.2mm, se plantean las mismas estrategias que se ejecutaron en los procesos para el agujero de diámetro 7.8mm. Para estas operaciones la maquina realiza su propio ciclo, con avance de 79.6 mm/m y 2046.3 mm/m, con una duración de 25 segundos.

En la asignación de la geometría se señala la misma en los dos procesos. (Figura 57)

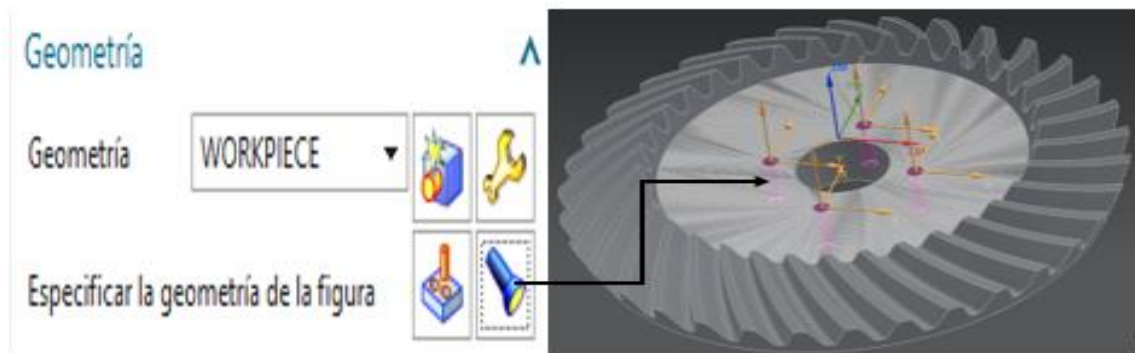


Figura 57. Selección de geometría para agujero de centro y taladrado diámetro 4.2mm. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de centro punto se observa en la siguiente figura. (Figura 58)

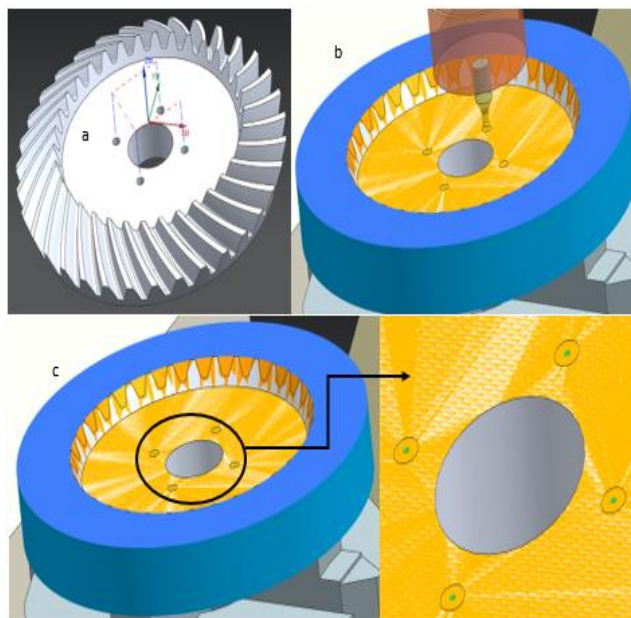


Figura 58. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia taladrado de diámetro 4.2 mm se observa en la siguiente figura. (Figura 59)

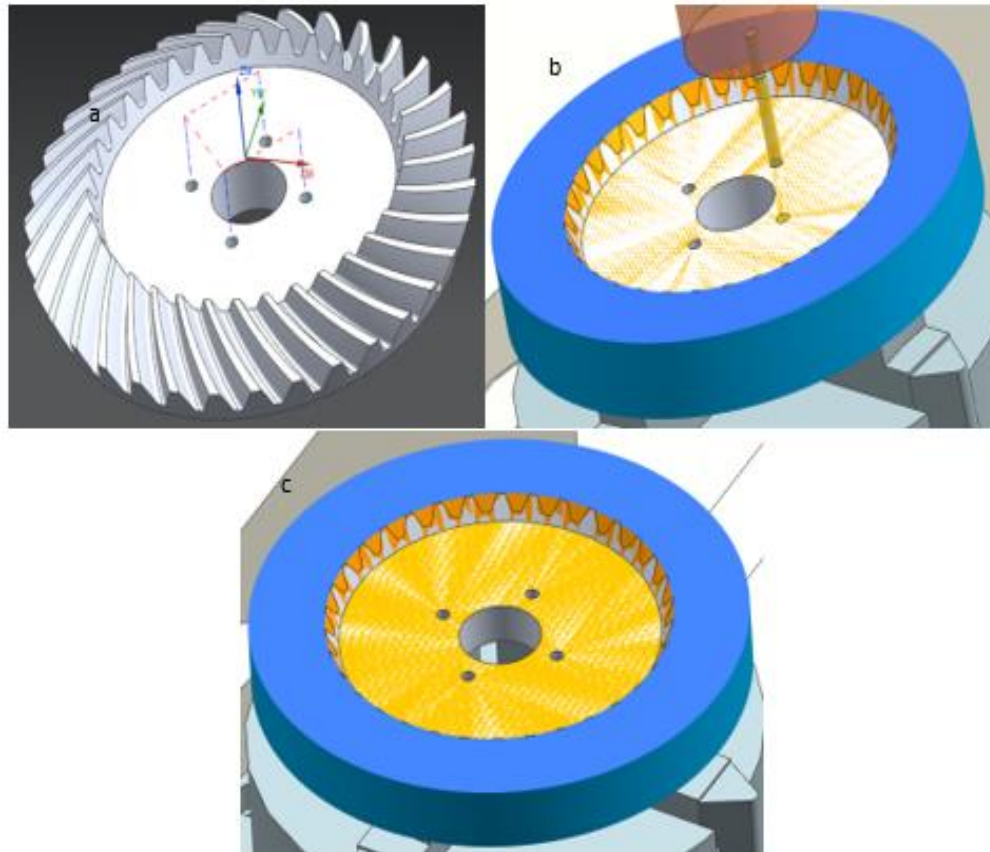


Figura 59. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente autor

6.1.8 ACABADO EXTERIOR PARTE INFERIOR DEL ENGRANAJE

En el proceso de acabado exterior de la parte inferior del engranaje, se plantea la misma estrategia que se ejecutó en el proceso del acabado de la parte interior del engranaje, el material removido en esta operación es de 1 mm paralelo respecto a la geometría de la pared, con un avance de 553.9 mm/m y una duración de 5 minutos y 21 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso de acabado exterior de la parte inferior del engranaje, especificando la pared y el piso de la geometría. (Figura 60)

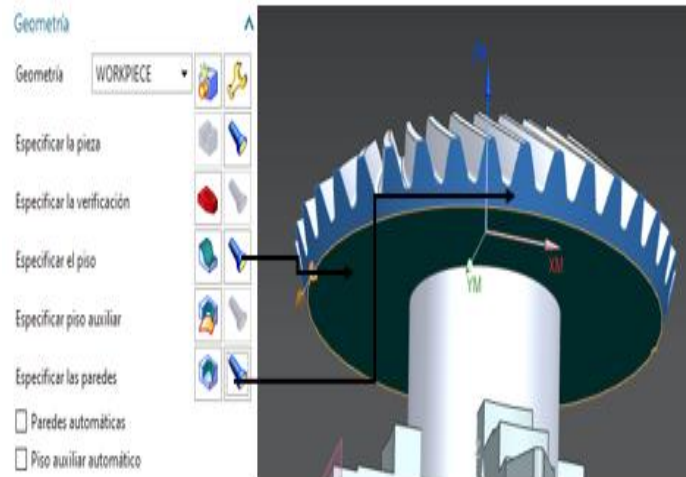


Figura 60. Selección de piso y paredes de la geometría. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia acabado exterior parte inferior del engranaje se observa en la siguiente figura. (Figura 61)

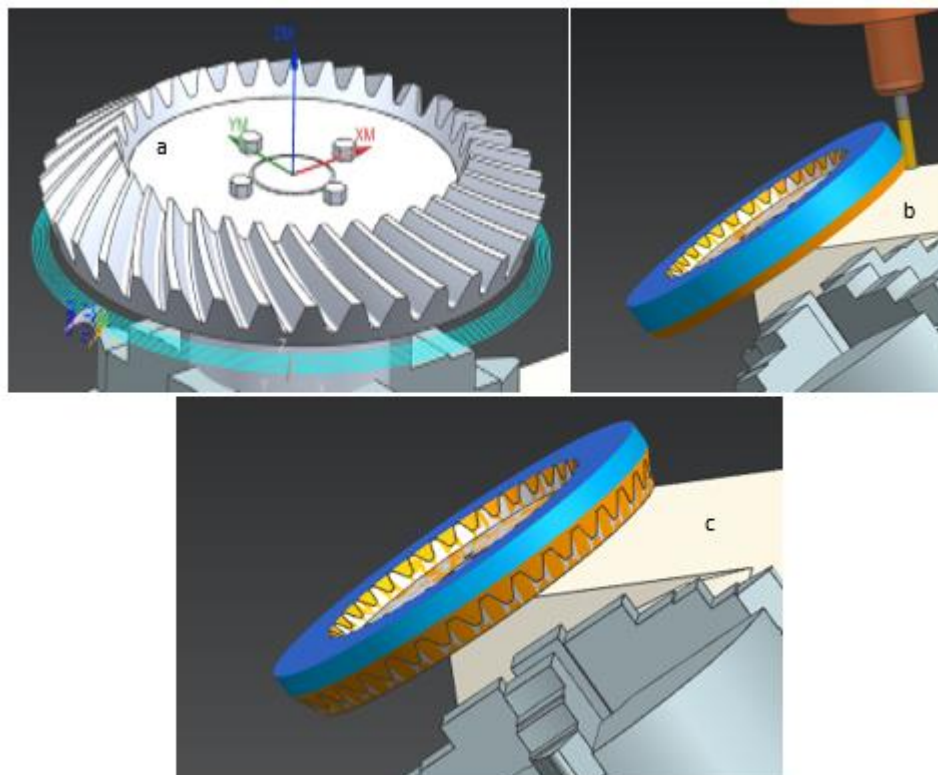


Figura 61. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.1.9 DESBASTE EXTERIOR SUPERIOR DEL ENGRANAJE

En el proceso del desbaste exterior superior del engranaje se plantea la estrategia **FRESADO DE CAVIDADES**, desbasta de forma contorneada y removiendo material en los niveles de corte planario normales al eje de la herramienta de corte. Se deben especificar las áreas del corte.

El sobre material dejado en este proceso es de 0.1 mm para realizar el acabado posteriormente, cada nivel de corte para el desbaste es de 0.3 mm, con un patrón de corte de **seguir la periferia**, con un avance de 3000 mm/m y una duración de 46 minutos y 50 segundos.

A continuación, se muestra el respectivo proceso de desbaste exterior superior del engranaje, especificando el área de corte. (Figura 62)

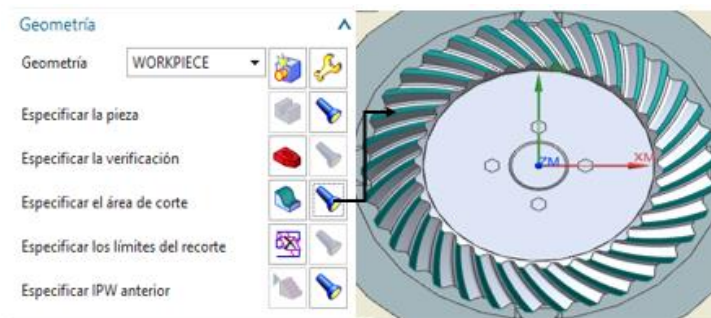


Figura 62. Especificación de áreas de corte. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia del desbaste exterior superior del engranaje se observan en la siguiente figura. (Figura 63)

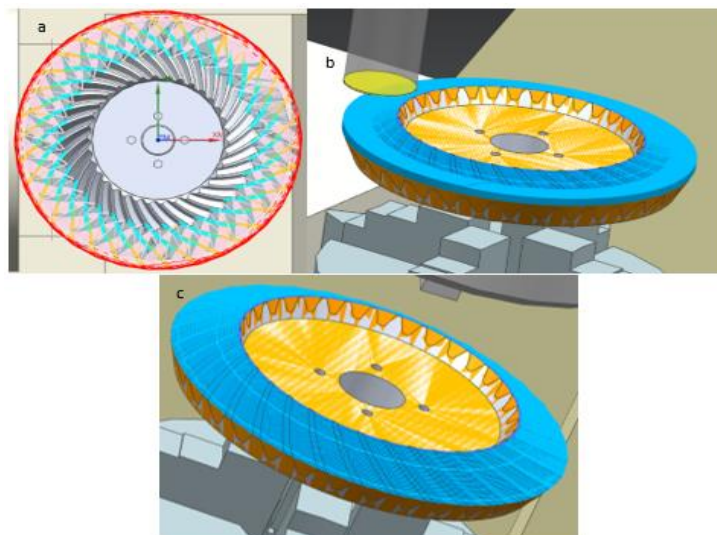


Figura 63. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

6.2 DESBASTE Y ACABADO DE LOS DIENTES

6.2.1 ACABADO EXTERIOR SUPERIOR DEL DIENTE

En el proceso del acabado exterior superior del diente se plantea la estrategia **CONTORNO VARIABLE**, contornea la superficie con ejes variables, utiliza diferentes métodos de guía, contención, patrones de corte y ejes de herramienta.

Se especifica la geometría de la pieza, el método de guía y el eje de la herramienta variable adecuado.

El método guía seleccionado es **área de superficie**, el eje de la herramienta se modifica con un vector relativo señalando un ángulo de avance de -45° (ver Figura 64). El patrón de corte ajustado para el proceso es **zig**, el avance es de 1591.5 mm/m y una duración de 9 minutos y 4 segundos. En el método ejecutado se facilita la limitación de los ejes usados, en este caso se posiciona el eje B de manera fija y los ejes sobrantes generan el movimiento obteniendo como resultado una estrategia de 4+1 (Figura 66).

A continuación, se muestra el respectivo proceso de acabado exterior superior del diente.

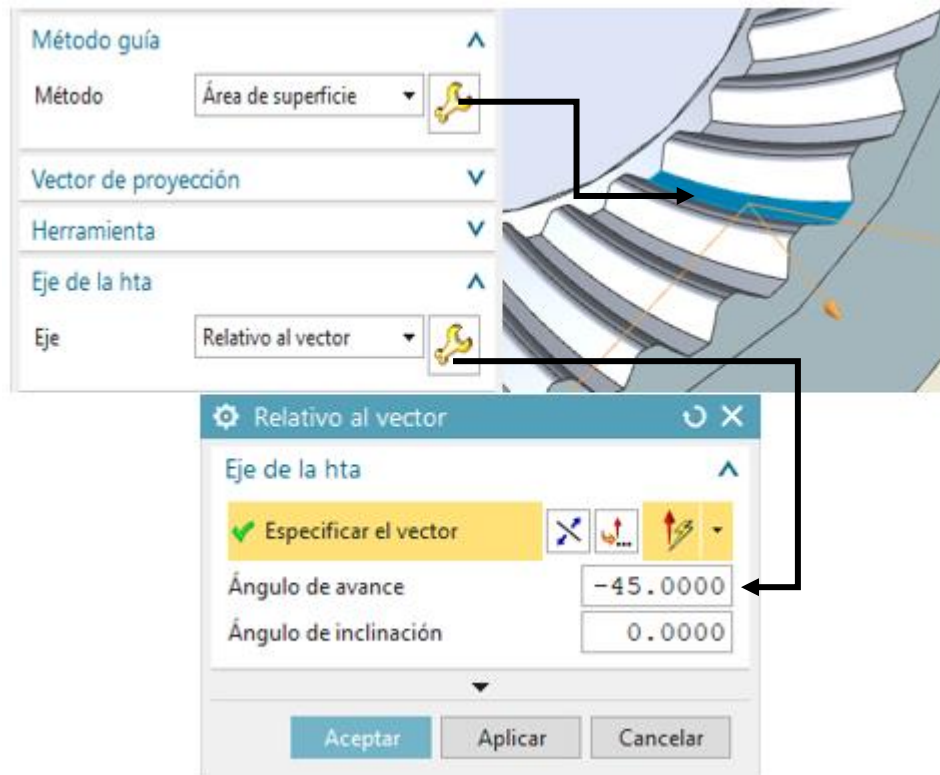


Figura 64. Método guía y vector relativo del eje de la herramienta. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de acabado exterior superior del diente se observa en la siguiente figura. (Figura 65)

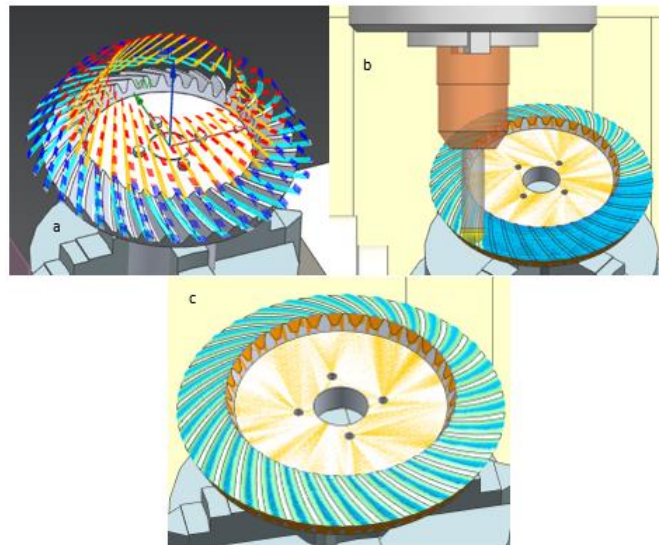


Figura 65. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

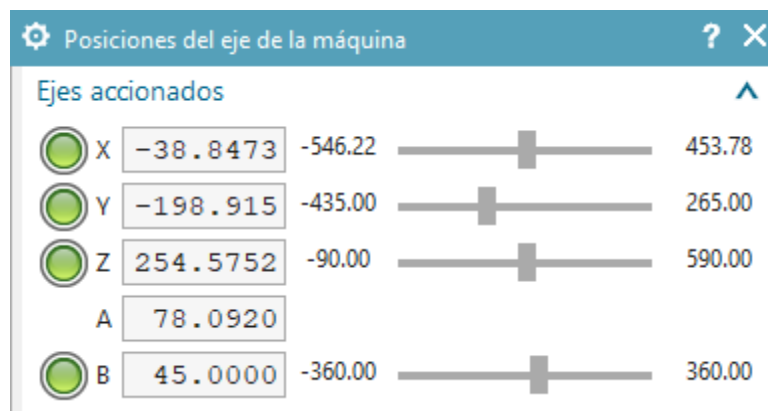


Figura 66. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor

6.2.2 DESBASTE ENTRE DIENTES

En el proceso del desbaste entre dientes, se plantea la misma estrategia ejecutada en el desbaste exterior superior del engranaje. Se seleccionan las áreas donde se desea realizar el corte, se modifica el vector del eje de la herramienta con el fin de que este coincida con el ángulo de cara de la corona (Figura 67), el patrón de corte ajustado para el proceso es **seguir la periferia**, con un avance de 305.6 mm/m y una duración de 5 horas, 54 minutos y 10 segundos,

para este método se dejan fijos los ejes A y B, y los ejes sobrantes generan el movimiento obteniendo como resultado una estrategia de 3+2 (Figura 69).

A continuación, se muestra el respectivo proceso del desbaste entre dientes.



Figura 67. Selección del área de corte y especificación del vector de la herramienta. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia de desbaste de los dientes se observa en la siguiente figura. (ver Figura 68).

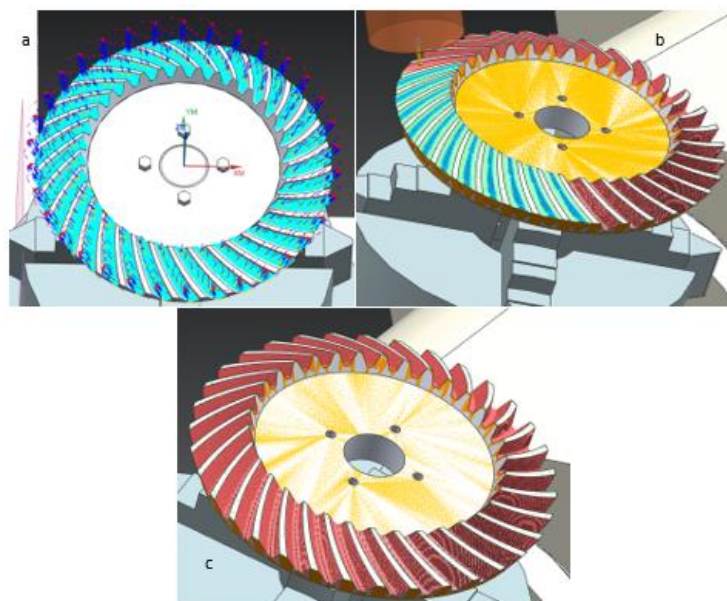


Figura 68. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor



Figura 69. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor

6.2.3 ACABADO DE LOS DIENTES

En el proceso de acabado de los dientes, se plantea la misma estrategia ejecutada en el acabado exterior de la parte superior del engranaje. Para el flanco izquierdo del engranaje se realiza la siguiente estrategia, el método guía seleccionado es **línea aerodinámica**, el eje de la herramienta se modifica con un vector relativo señalando un ángulo de avance de -45° y un ángulo de inclinación de -19° (Figura 70), el patrón de corte ajustado para el proceso es **zig**, un avance de 3000 mm/m y una duración de 28 minutos y 54 segundos, se posiciona el eje B de manera fija y los ejes sobrantes generan el movimiento obteniendo una estrategia de 4+1. (Figura 72)

A continuación, se muestra el respectivo proceso para el acabado del flanco izquierdo.

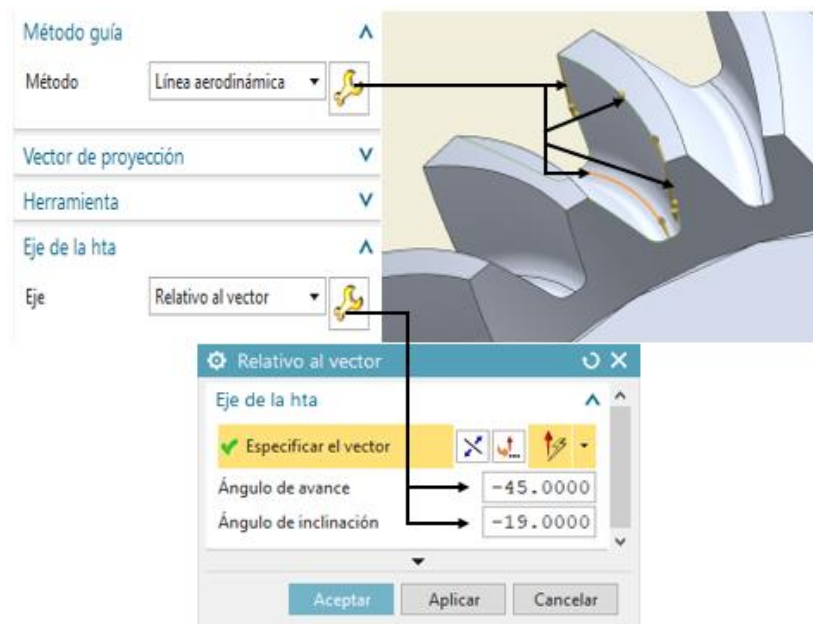


Figura 70. Método guía y vector relativo del eje de la herramienta. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia del acabado del flanco izquierdo del diente se observa en la siguiente figura. (ver Figura 71)

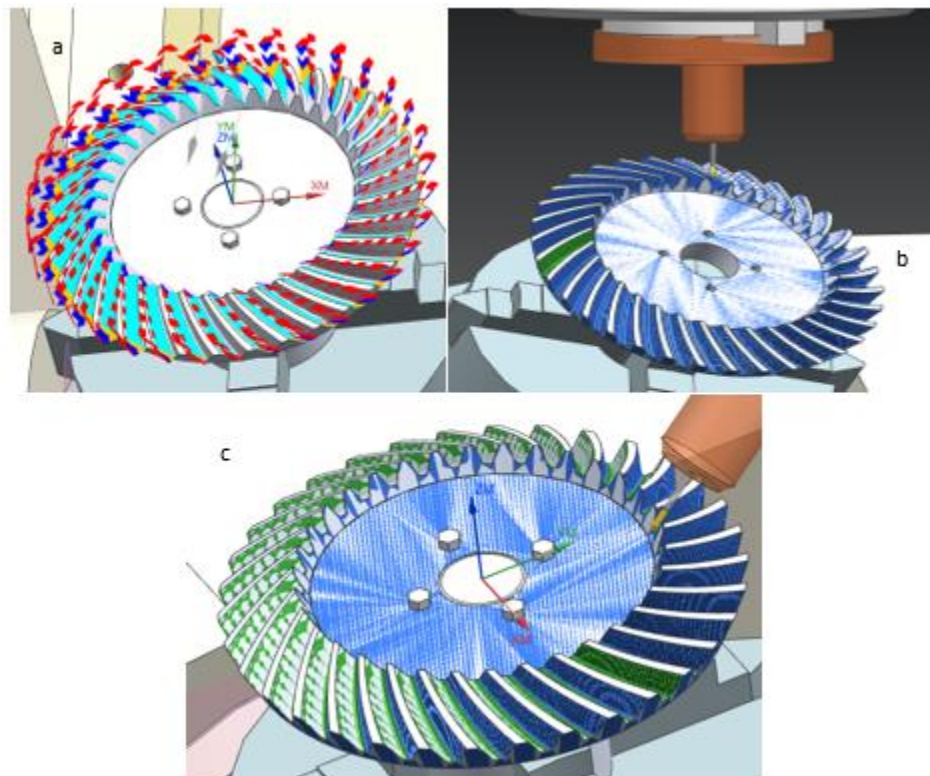


Figura 71. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso terminado. Fuente Autor

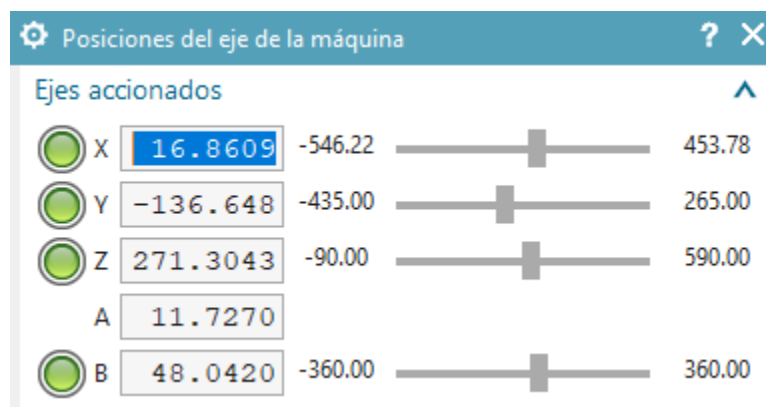


Figura 72. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor

Para el flanco derecho del engranaje se realiza la siguiente estrategia, el método guía seleccionado es **línea aerodinámica**, el eje de la herramienta se modifica con un vector relativo señalando un ángulo de avance de -45° y un ángulo de inclinación de -19° (Figura 73), el patrón de corte ajustado para el proceso es **zig**, un avance de 3000 mm/m y una duración de 28 minutos

y 54 segundos, se posiciona el eje B de manera fija y los ejes sobrantes generan el movimiento obteniendo una estrategia de 4+1. (Figura 75)

A continuación, se muestra el respectivo proceso para el acabado del flanco derecho.



Figura 73. Método guía y vector relativo del eje de la herramienta. Fuente Autor

El proceso de simulación y verificación de trayectorias de la estrategia del acabado del flanco derecho del diente se observa en la siguiente figura. (Figura 74)

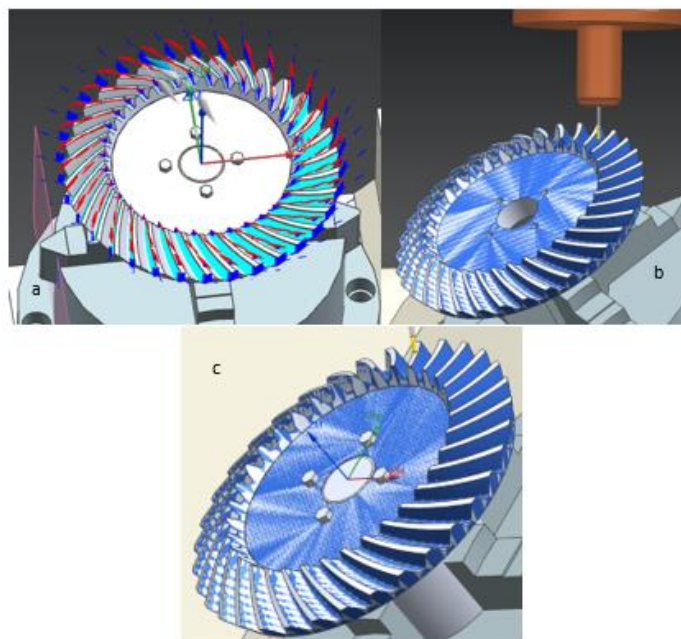


Figura 74. a). Trayectorias de la herramienta, b). Proceso de simulación en máquina virtual, c). Proceso finalizado. Fuente Autor



Figura 75. Posición de los ejes en máquina virtual. Fuente Autor

7 ANALISIS Y RESULTADOS

El software NX permite usar la herramienta **analizar** desde la verificación de trayectorias de la herramienta, permitiendo señalar cualquier punto de la geometría para verificar su medición.

Se analiza la geometría hasta el proceso del desbaste de los dientes (Figura 76), con el fin de verificar si cumple con el sobre material ajustado para este desarrollo, también verificando la metrología de las demás operaciones obtenidas hasta tal punto.

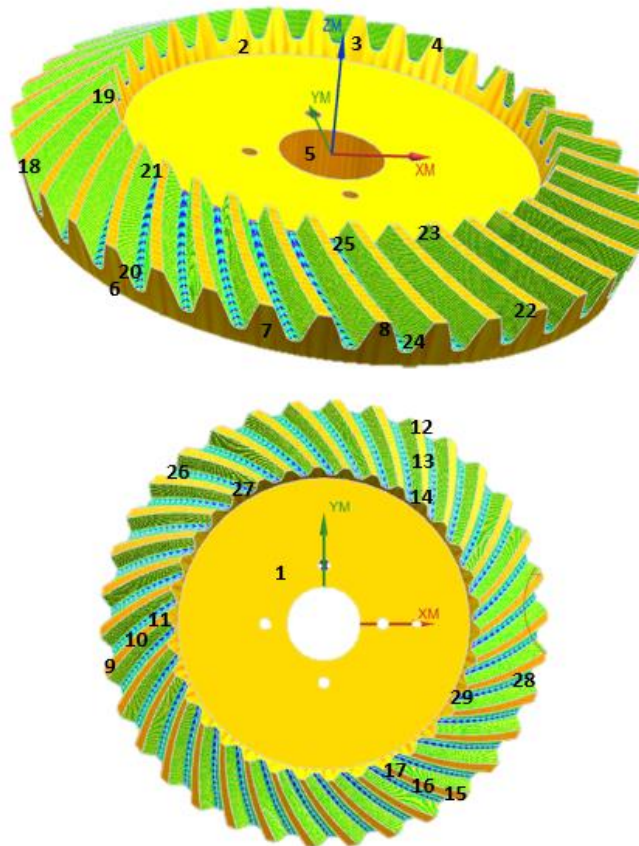


Figura 76. Análisis de metrología hasta el desbaste de dientes. Fuente Autor



Figura 77. Rango de valores y colores del análisis. Fuente Autor

Operación	Punto	Medida (mm)
Desbaste interior	1	0
Acabado interior	2	0.0075
	3	0.001
	4	0.0047
Agujero de sujeción	5	-0.01
Acabado exterior	6	-0.0066
	7	-0.0056
	8	0.0052
Acabado superior del diente	9	-0.0244
	10	-0.0142
	11	-0.012
	12	-0.0283
	13	-0.0205
	14	-0.0168
	15	-0.0291
	16	-0.0105
	17	-0.0207
Desbaste entre dientes	18	0.1310
	19	0.0913
	20	0.1445
	21	0.1699
	22	0.1118
	23	0.1440
	24	0.1669
	25	0.1072
	26	0.2915
	27	0.5451
	28	0.1323
	29	0.2758

Tabla 14. Datos de la medición. Fuente Autor

De la tabla 16, los datos positivos señalan sobre material, en cuanto a los negativos señala material retirado de más respecto a la pieza que se tiene contemplada a mecanizar en este caso la corona cónica espiral, en el desbaste interior se logra el acabado con el plano señalado como piso que fue referenciado para esta operación, para el acabado interior y exterior del engranaje se obtiene un resultado del orden de milésimas de milímetro, para el agujero de sujeción se obtiene un acabado del orden de centésimas de milímetro, para el acabado superior del diente se obtiene un resultado del orden de centésimas de milímetro, para el desbaste entre dientes el sobre material en cada flanco cumple con la condición de estar en decimas de milímetro, pero sobre pasa dicho valor en el valle.

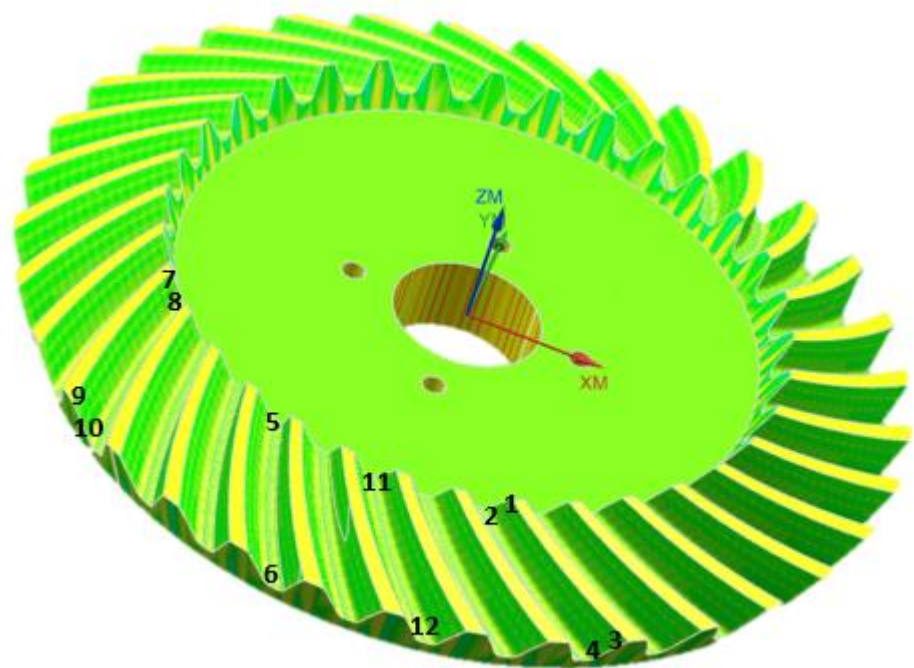


Figura 78. Análisis de metrología desbaste de dientes. Fuente Autor

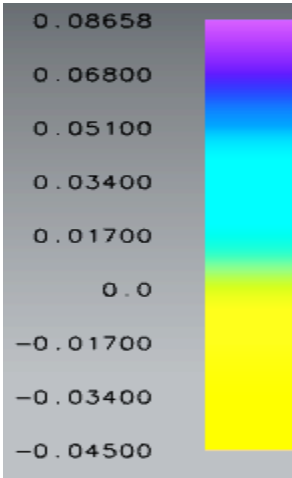


Tabla 15. Rangos de valores y colores del análisis. Fuente Autor

Operación	Punto	Medida (mm)
Acabado flanco izquierdo	1	0.0077
	2	0.0008
	3	0.0049
	4	0.0095
	5	0.0002
	6	0.0071
Acabado flanco derecho	7	0.0096
	8	0.0037
	9	0.0043
	10	0.0091
	11	0.0038
	12	0.0001

Tabla 16. Datos de la medición. Fuente Autor

Para el acabado de los dientes tanto en el flanco derecho como en el izquierdo y en el valle de los mismos, las lecturas tomadas están por el orden de las milésimas de milímetro.

Teniendo en cuenta la duración de cada proceso simulado durante la fabricación del engranaje cónico espiral se determina que el tiempo para obtener esta pieza es de 8 horas, 16 minutos y 55 segundos.

8 CONCLUSIONES

- ✓ Se obtuvo la geometría del engranaje por medio del modelado de la superficie en el software CAD, lo cual permitió generar el perfil del diente por medio del método 0 y las ecuaciones paramétricas que describen el perfil de involuta espiraloide, generando una alternativa de la geometría del diente del engranaje cónico espiral que se obtiene de manera teórica de la máquina herramienta y la geometría de la herramienta de corte, obteniendo una superficie idealizada.

- ✓ Se planificó el proceso de manufactura obteniendo de esta manera la producción del engranaje cónico espiral, evitando posibles colisiones entre la herramienta de corte y la materia prima, obteniendo las trayectorias de la herramienta de corte y sus respectivos movimientos en los diferentes ejes teniendo en cuenta los límites de la máquina.

- ✓ Se verificó el proceso de fabricación del engranaje cónico espiral en un centro de mecanizado virtual en el módulo de manufactura del software NX, y se demuestra que es útil para producción a bajos volúmenes y/o prototipos, presentando una aproximación en el orden de las micras, sin considerar factores como la deflexión de la herramienta, vibración del montaje tecnológico y elasticidad del material, estimando un tiempo de fabricación de 12 horas teniendo en cuenta los tiempos de preparación y montaje de la pieza en la máquina.

9 RECOMENDACIONES

- ✓ En futuros trabajos relacionados con engranajes cónicos espirales generar la superficie mediante la cinemática de la máquina herramienta y la geometría de la herramienta de corte.
- ✓ Se recomienda usar otras herramientas estándares y estrategias en la simulación del proceso de mecanizado para el desbaste y acabado de dientes, con el fin reducir el número de ejes utilizados.
- ✓ Se recomienda realizar el proceso de fabricación en la máquina FINETECH GTX-210 de la Universidad Santo Tomás y hacer montajes para desarrollar procesos de acabado con herramientas especializadas en materiales endurecidos y evaluar la calidad dimensionalmente.

10 REFERENCIAS

- [1] International Organization for Standardization, “ISO 23509: Bevel and hypoid gear geometry,” vol. 2006, p. 146, 2006.
- [2] Tuniblog, (2013). Mejor aceleración – diferencial corto / caja de cambios. <https://www.tuningblog.eu/es/kategorien/tuning-wiki/differential-tuning-233200/>
- [3] <https://motorgiga.com/honda/e/e/2020/precio-ficha-tecnica>
- [4] Shunmugam, M. S., Rao, B. S., & Jayaprakash, V. (n.d.). *ESTABLISHING GEAR TOOTH SURFACE GEOMETRY AND NORMAL DEVIATION Part II* Bevel gears. Retrieved November 25, 2022.
- [5] Císar, M., Kuric, I., Čuboňová, N., & Kandra, M. (2017). Design of the clamping system for the CNC machine tool. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 137, p. 01003). EDP Sciences.
- [6] Wardak, K. R., Tasch, U., & Charalambides, P. G. (2001). Optimal fixture design for drilling through deformable plate workpieces part I: model formulation. *Journal of Manufacturing Systems*, 20(1), 23-32.
- [7] Vichare, P., Nassehi, A., & Newman, S. T. (2011). Unified representation of fixtures: clamping, locating and supporting elements in CNC manufacture. *International Journal of Production Research*, 49(16), 5017-5032.
- [8] Mihaylov, O. (2019). Determining the Positions of the Elements for the 3-2-1 Principle of Location in a Solidworks Add-in. In *Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. Volume III* (Vol. 160, p. 165).
- [9] Palbit. (2022). Proprietary milling line. *Milling catalogue*, A64 - A67.
- [10] Palbit. (2022). Proprietary milling line. *Milling catalogue*, A120 – A122.
- [11] Palbit. (2022). General purpose endmills. *Solid carbide end mills catalogue*, 10-14.
- [12] Palbit. (2022). Solid carbide drills. *Solid carbide drills catalogue*, 10-15.
- [13] YG. (2022). Steel ball holder. *I-XMILL EUROPA*, 18 - 23.
- [14] Vergara Rodríguez, J. (2020). *Desbaste de engranajes cónicos, tipo estándar, en máquina multiejes de control numérico de propósito general*. Universidad Santo Tomás.
- [15] Chacon Vargas, S. (2019). *Comparación de la curva de involuta de engranajes de dientes rectos, manufacturados con herramienta estándar, a partir de la geometría obtenida de un acelerador de dibujo y de las ecuaciones paramétricas*. Universidad Santo Tomás.
- [16] Cárdenas Páez, C. (2022). *Diseño de un engranaje hipoide y su fabricación en máquinas CNC multieje técnica 4+1 ejes*. Universidad Santo Tomás.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO 1. PLANO DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

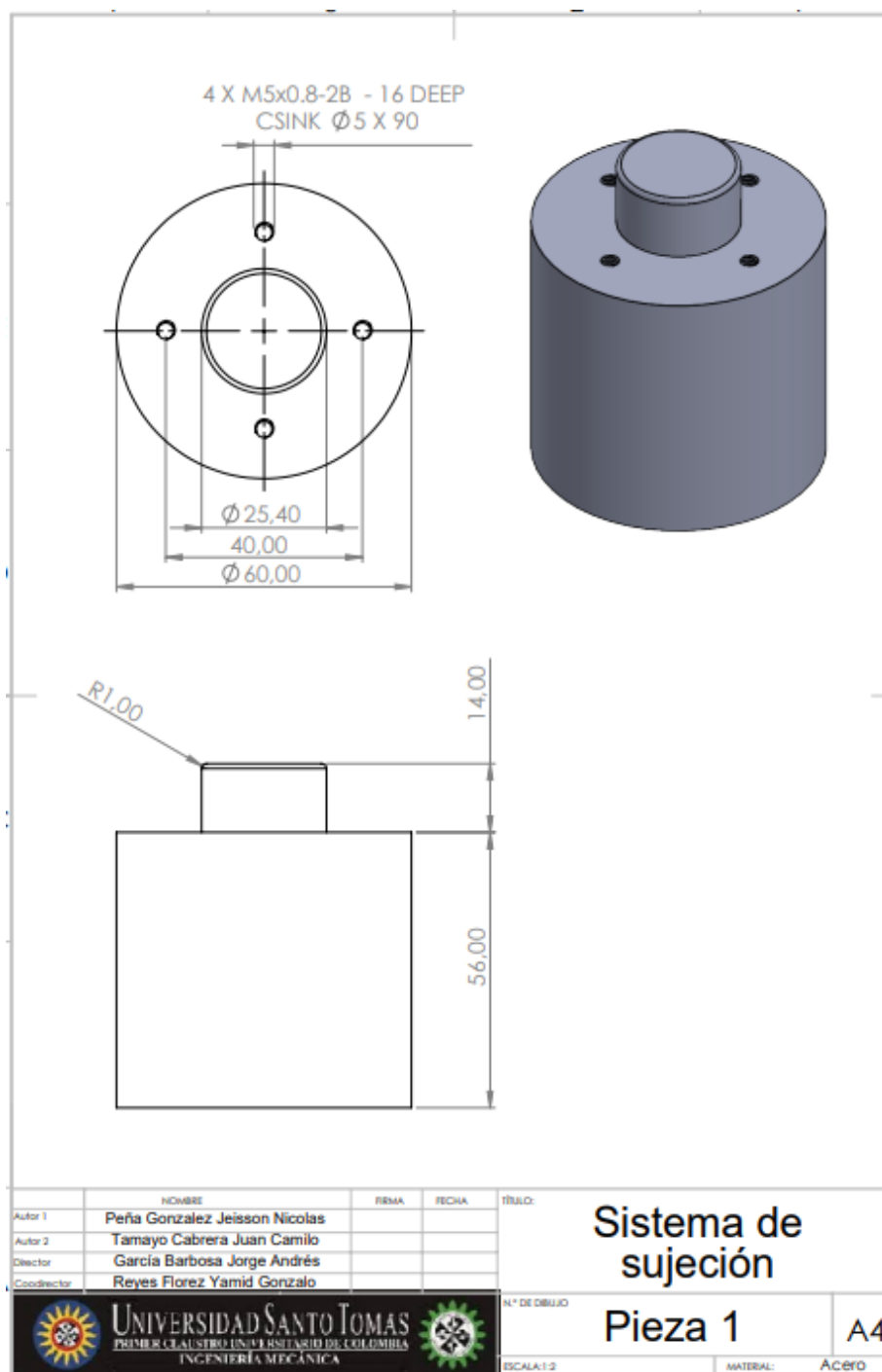
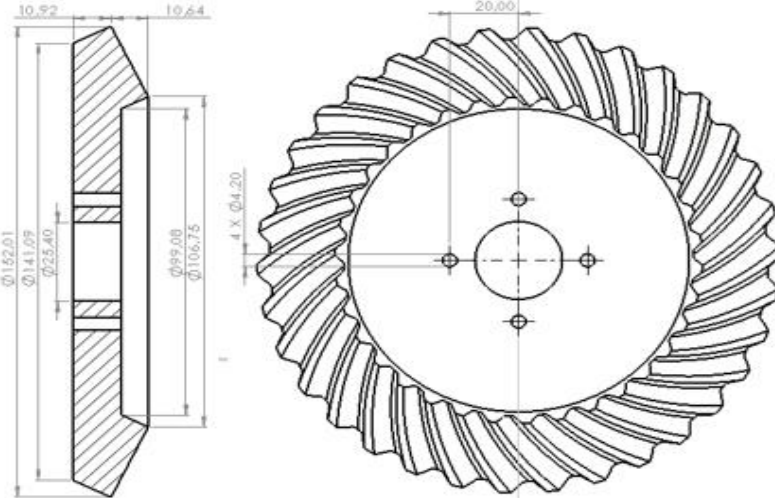
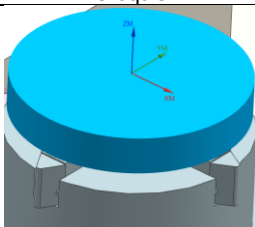


Figura 79. Plano sistemas de sujeción. Fuente Autor

9.2 ANEXO 2. HOJAS DE PROCESOS

Material: Duraluminio			HOJA DE PROCESOS Preparación de la materia prima			Jeisson Peña, Juan Tamayo			
Material en bruto (mm): Ø153.01 mm X 25.56 mm						Fecha: 27/11/2022			
Universidad Santo Tomás		Planeado de la parte inferior del engranaje con ayuda de la máquina virtual, montaje sin ensamble del sistema de sujeción				Facultad de ingeniería mecánica			
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech GTX-210							
									
Operación	Designación	Croquis	Herramienta	fz (mm/diente)	Vf (mm/min)	n (RPM)	Vc (m/min)	Ap (mm)	
1.1	Pieza en bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR						

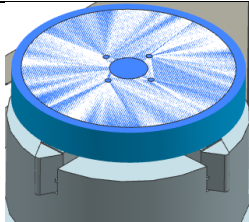
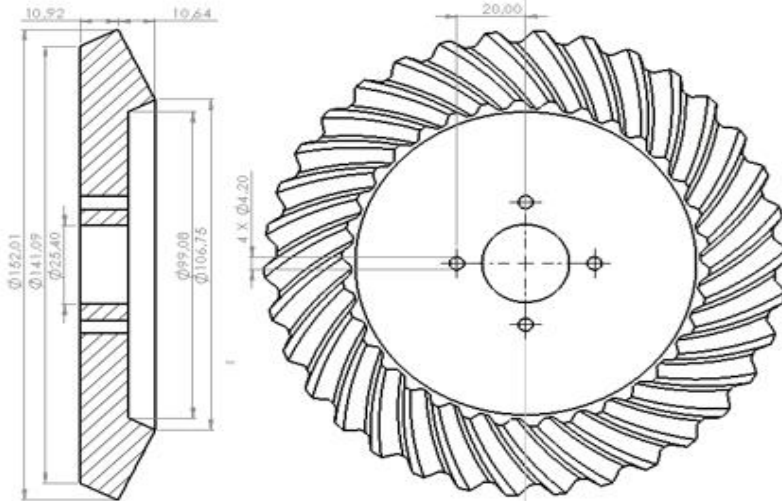
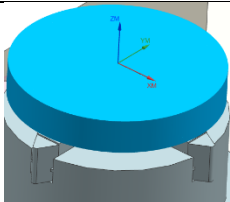
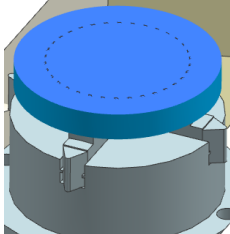
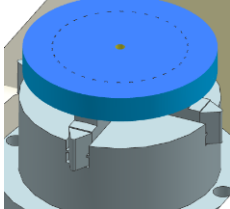
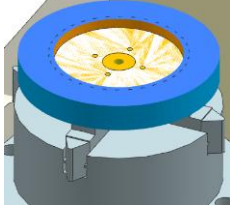
1.2	Planeado inferior		N° 21 Fresa de planeado. Diámetro 50 mm. Insertos 4.	0.15	458.4	764	120	2
-----	-------------------	---	--	------	-------	-----	-----	---

Tabla 17. Hoja de procesos, planeado inferior del engranaje. Fuente Autor

Material: Duraluminio			HOJA DE PROCESOS Preparación de la materia prima			Jeisson Peña, Juan Tamayo			
Material en bruto (mm): Ø153.01 mm X 25.56 mm						Fecha: 27/11/2022			
Universidad Santo Tomás		Planeado, agujeros, desbaste y acabado del engranaje parte superior con ayuda de la máquina virtual, montaje sin ensamble del sistema de sujeción				Facultad de ingeniería mecánica			
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech GTX-210							
									
Operación	Designación	Croquis	Herramienta	fz (mm/diente)	Vf (mm/min)	n (RPM)	Vc (m/min)	Ap (mm)	

2.1	Pieza en bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR					
2.2	Planeado superior		N° 21 Fresa de planeado. Diámetro 50 mm. Insertos 4.	0.15	458.4	764	120	2
2.3	Centro punto para agujero de diámetro 7.8 mm		N° 2 Broca de centro. Diámetro 3.15 mm. Filos 2	0.025	79.6	1592	40	0.45
2.4	Taladrado diámetro 7.8 mm		N° 6 Broca helicoidal. Diámetro 7.8 mm. Filos 2	0.15	1101.9	3673	90	23
2.5	Desbaste interior		N° 11 Fresa punta plana. Diámetro 6 mm. Filos 4	0.029	553.9	4775	90	2

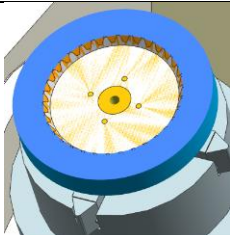
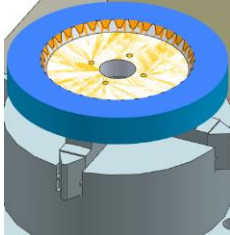
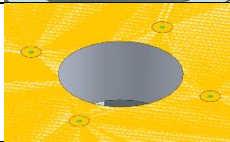
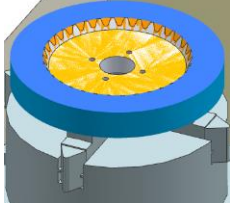
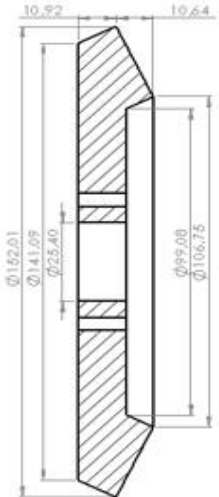
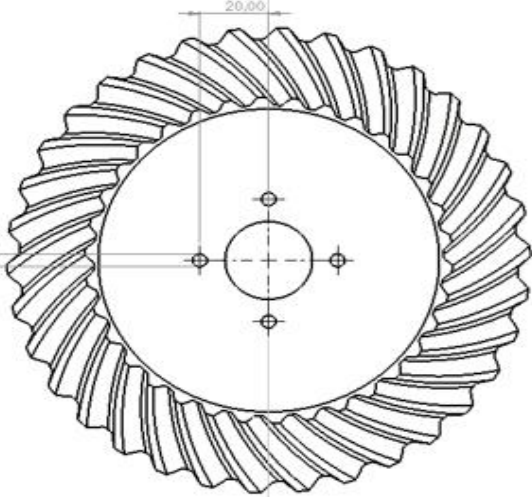
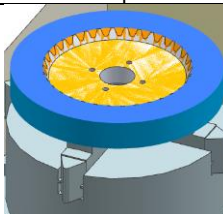
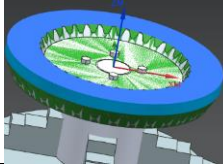
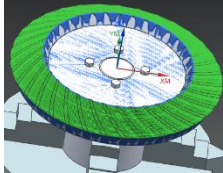
2.6	Acabado interior		N° 11 Fresa punta plana. Diámetro 6 mm. Filos 4	0.029	553.9	4775	90	1
2.7	Desbaste agujero de sujeción		N°11 Fresa punta plana. Diámetro 6 mm. Filos 4	0.029	553.9	4775	90	1
2.8	Centro punto para agujero de diámetro 4.2 mm		N°2 Broca de centro. Diámetro 3.15 mm. Filos 2	0.025	79.6	1592	40	0.3031
2.9	Taladrado diámetro 4.2 mm		N° 4 Broca helicoidal. Diámetro 4.2 mm. Filos 2	0.15	2046.3	6821	90	13.8931

Tabla 18. Hoja de procesos, montaje sin ensamble del sistema de sujeción. Fuente Autor

Material: Duraluminio	 HOJA DE PROCESOS Preparación de la materia prima, desbaste y acabado delos dientes 		Jeisson Peña, Juan Tamayo
Material en bruto (mm): Ø153.01 mm X 25.56 mm			Fecha: 27/11/2022
Universidad Santo Tomás	Planeado, agujeros, desbaste y acabado del engranaje parte superior con ayuda de la máquina virtual, montaje con ensamble del sistema de sujeción		Facultad de ingeniería mecánica

Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech GTX-210							
									
Operación	Designación	Croquis	Herramienta	fz (mm/diente)	Vf (mm/min)	n (RPM)	Vc (m/min)	ap (mm)	
3.1	Pieza en bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR						
3.2	Acabado exterior inferior		Nº 11 Fresa punta plana. Diámetro 6 mm. Filos 4.	0.029	553.9	4775	90	1	
3.3	Desbaste exterior superior		Nº 22 Fresa de alto avance. Diámetro 32 mm. Insertos 3	0.4675	3000	2139	215	0.3	

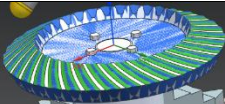
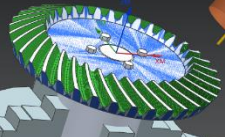
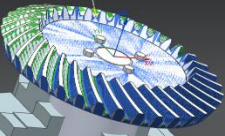
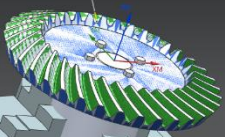
3.4	Acabado exterior superior		N° 18 Fresa de bola. Diámetro 16 mm. Insertos 2.	0.25	1591.5	3183	160	0.1
3.5	Desbaste de dientes		Fresa punta plana. Diámetro 2 mm. Filos 4	0.008	305.6	9549	60	0.3
3.6	Acabado flanco izquierdo		Fresa de bola. Diámetro 1 mm. Insertos 2	0.125	3000	12000	75	50 p
3.7	Acabado flanco derecho		Fresa de bola. Diámetro 1 mm. Filos 4	0.125	3000	12000	75	50 p

Tabla 19. Hoja de procesos, montaje con ensamble del sistema de sujeción. Fuente Autor