

**Desbaste de engranajes cónicos, tipo estándar, en máquina multiejes de control
numérico de propósito general**

Juan David Vergara Rodríguez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Andrés García Barbosa

Ingeniero Mecánico

Codirector

Yamid Gonzalo Reyes

Ingeniero Mecánico

Universidad Santo Tomás, Bogotá

División de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Mecánica

2020

Tabla de contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Resumen | 7 |
| 2. | Introducción..... | 8 |
| 3. | Objetivos..... | 10 |
| 3.1 | Objetivo General..... | 10 |
| 3.2 | Objetivos Específicos | 10 |
| 5. | Marco Referencial | 12 |
| 5.1 | Marco Conceptual..... | 12 |
| 5.1.1 | Engranajes Cónicos Rectos Estándar | 12 |
| 5.1.2 | Dimensiones de engranajes cónicos rectos. | 12 |
| 5.1.2 | Principio 3-2-1 para fijación de piezas..... | 15 |
| 5.1.3 | Metodología de los 6 pines | 16 |
| 5.1.4 | Métodos de fresado | 16 |
| 5.2 | Marco Teórico..... | 17 |
| 5.2.1 | Proceso de cálculo de cónicos rectos. | 17 |
| 5.2.2 | Ecuación canónica de involuta esférica | 18 |
| 5.3 | Antecedentes | 19 |
| 5.3.1 | Procesos de manufactura de engranajes cónicos..... | 19 |
| 6. | Cálculo dimensional del engranaje..... | 22 |
| 6.1 | Dimensiones de los engranajes cónicos..... | 22 |

| | |
|---|----|
| 6.2 Comparación de la involuta geometría del perfil del diente del engranaje cónico.... | 25 |
| 7. Planificación del proceso de manufactura..... | 27 |
| 7.1 Secuencia de trabajo propuesto para engranaje cónico | 27 |
| 7.2 Dispositivo de sujeción de la materia prima..... | 27 |
| 7.2.1 Restricción de grados de libertad | 28 |
| 7.2.2 Dimensionamiento del sujetador..... | 28 |
| 7.3 Disponibilidad del medio tecnológico | 30 |
| 7.3.1 Máquina herramienta | 30 |
| 7.3.2 Materia prima..... | 31 |
| 7.3.3 Herramientas de corte | 32 |
| 7.3.4 Software y máquina virtual | 33 |
| 8. Montaje virtual | 35 |
| 8.1 Trayectorias generadas para desbaste | 35 |
| 8.2 Generación trayectoria del perfil | 36 |
| 8.3 Comparativo de trayectorias generadas por defecto y basadas en la geometría..... | 40 |
| 9. Conclusiones..... | 41 |
| 10. Recomendaciones | 42 |
| 11. Referencias | 43 |
| 12. ANEXOS..... | 44 |
| ANEXO A..... | 46 |

ANEXO B..... 53

Tabla de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Engranajes cónicos..... | 12 |
| Figura 2. Características geométricas engranajes cónicos rectos | 13 |
| Figura 3. Distintos tipos de engranajes cónicos rectos..... | 14 |
| Figura 4. Grados de libertad en un objeto | 15 |
| Figura 5. Principio de los 6 pines, estrategia 3-2-1 | 15 |
| Figura 6. Flujograma para calcular dimensiones de engranaje cónico recto..... | 18 |
| Figura 7. Canónica esférica de la involuta cónica..... | 19 |
| Figura 8. Herramientas de corte para maquinaria | 20 |
| Figura 9. Herramientas de corte engranajes cónicos | 21 |
| Figura 10. Máquina generadora de engranajes | 21 |
| Figura 11. Valor del módulo medio normal | 24 |
| Figura 12. Valores de ángulo, NX..... | 25 |
| Figura 13. Diferencia entre ToolKit y canónica de robótica | 26 |
| Figura 14. Engranaje cónico recto generado por NX | 26 |
| Figura 15. Secuencia de fabricación de engranaje cónico..... | 27 |
| Figura 16. Dispositivo de sujeción de materia prima | 28 |
| Figura 17. Ensamble del sujetador y engranaje..... | 29 |
| Figura 18. Vista superior inclinada y vista de sección longitudinal..... | 29 |
| Figura 19. Máquina virtual, FINITECH GTX-210 con dispositivo de 4 y 5 eje. | 30 |
| Figura 20. Distancia entre dientes | 32 |
| Figura 21. Material recomendado para desbaste de herramientas..... | 33 |
| Figura 22. Máquina virtual GTX-210 | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 23. Trayectorias simuladas en máquina virtual..... | 34 |
| Figura 24. Diagrama de flujo primer proceso de desbaste cara inferior, NX..... | 35 |
| Figura 25. Diagrama de flujo primer proceso de desbaste cara superior, NX..... | 36 |
| Figura 26. Desbaste contorno dientes, NX..... | 36 |
| Figura 27. Conos del engranaje cónico, ápex y variación del cono de techo o cara. | 37 |
| Figura 28. Líneas de construcción para toolpath..... | 37 |
| Figura 29. Conos y generación de líneas del toolpath..... | 38 |
| Figura 30. Toolpath generado..... | 39 |
| Figura 31. Acabado del perfil..... | 39 |

1. Resumen

Se propone un proceso de manufactura de un engranaje cónico recto tipo estándar con características geométricas complejas haciendo uso de maquinaria de propósito general tipo CNC con disponibilidad de cuarto y quinto eje para explorar el acercamiento a dicha geometría y verificar que no es necesario hacer uso de maquina y herramienta dedicada a la manufactura de engranajes cónicos para aproximarse a la geometría. Se elaboró una simulación del proceso en un centro de mecanizado vertical virtual con herramientas comerciales de punta plana, redonda y esférica. Para ello se hizo el estudio de la geometría del perfil cónico, cálculo dimensional del engranaje y generación de trayectorias de desbaste y acabado, obteniendo un proceso de acabado en base a la geometría cónica del engranaje disminuyendo los movimientos en simultáneos para llevar a cabo este proceso, así disminuyendo el error acumulado en los ejes involucrados en el acabado del diente y engranaje. Al final se determinó que es posible realizar el desbaste y acabado de un engranaje cónico tipo estándar en un centro de mecanizado vertical con herramienta comercial sin tener ningún tipo de maquina o herramienta especializada para su manufactura.

2. Introducción

Los engranajes cónicos son elementos mecánicos utilizados para la transmisión de potencia entre ejes no paralelos, y se dividen en tres ramas; rectos, espirales e hipoidales [1]; que varían en geometría y desempeño, la manufactura de engranajes cónicos demanda procesos complejos y costoso que requieren de maquinaria y herramienta especializada [2], el proceso de manufactura tiene tres etapas: desbaste, temple y rectificado. Un ejemplo es el proceso de desbaste por generación [3].

Actualmente, en Colombia no se cuenta con maquinaria especializada para tener un completo y adecuado proceso de manufactura de engranajes cónicos, en cambio, el proceso de tallado con fresa modular, en fresadora universal, es común encontrarlo para generación de engranajes cilíndricos. Según un estudio realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) la mayoría de las empresas colombianas con un porcentaje del 86.2% [4] dicen no contar con el presupuesto necesario. Además, estudios realizados por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) (2012) afirma:

En su gran mayoría la cadena está conformada por pequeñas y medianas empresas que cuentan con infraestructuras heterogéneas e incorporan a sus procesos tecnologías tradicionales (mecánicas) que las hacen más intensivas en mano de obra. Por ende, los procesos resultan más costosos y de menor valor agregado. (p.25) [4]

Por ejemplo, RAMFE S.A., empresa colombiana líder en la fabricación y comercialización de motoreductores, cuenta con una línea de producción para el proceso de desbaste, temple y rectificado de engranajes rectos para sus productos, alcanzando calidades entre IT5 y IT 6, idóneas, según norma, para comercialización. La empresa está incursionando en la manufactura de

engranajes cónicos, para cubrir los requerimientos de mantenimiento de sus clientes, e inicio con la implementación del proceso de desbaste sin adquirir maquinaria especializada.

Una alternativa al mecanizado de engranajes cónicos por generación con maquinaria especializada, es realizar la manufactura de engranajes cónicos en maquinaria de control numérico (CNC), en la cual se puede replicar el proceso de desbaste y generación del perfil del diente del engranaje haciendo uso de herramientas comerciales, destinado para aquellas empresas que no necesiten altos volúmenes de producción.

Por lo tanto, el problema que se pretende abordar es el desbaste de un engranaje cónico recto tipo estándar en una máquina CNC de propósito general y herramienta de tipo comercial, para así explorar el proceso de tallado de los mismos, para que, por medio de este estudio tanto pequeñas como medianas empresas que no tengan la posibilidad de contar con tecnología especializada para manufactura de los mismos, y cuenten con maquinaria tipo CNC de propósito general y herramientas de tipo comercial puedan aproximarse y generar la geometría del engranaje.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Implementar el proceso de mecanizado de un engranaje cónico tipo estándar, haciendo uso de máquina herramienta CNC de propósito general y herramienta comercial.

3.2 Objetivos Específicos

- Definir las características geométricas y dimensiones del engranaje cónico que se requieren para el mecanizado del diente.
- Planear el proceso de manufactura por arranque de viruta de un engranaje cónico tipo estándar en maquinaria CNC de propósito general.
- Realizar montaje virtual, para el mecanizado de un engranaje cónico tipo estándar en máquina virtual.

5. Marco Referencial

5.1 Marco Conceptual

5.1.1 Engranajes Cónicos Rectos Estándar

Los engranajes cónicos rectos estándar son usados para transmisión de potencia entre dos ejes no colineales Figura 1, donde la configuración más común es un ángulo de 90° ; como puede ser el diseño del diferencial de un automóvil, también se pueden encontrar distintos diseños donde el ángulo entre ellos puede ser agudo u obtuso, dependiendo de la necesidad para la transmisión de potencia [5].

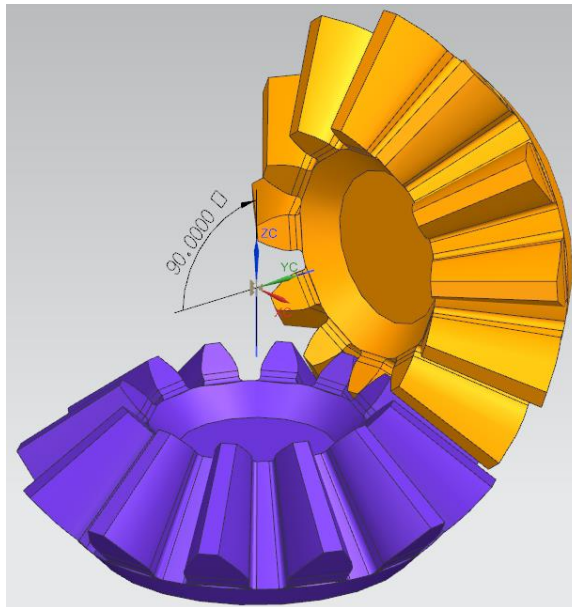


Figura 1. Engranajes cónicos

Fuente: Autor

5.1.2 Dimensiones de engranajes cónicos rectos.

En la Figura 2 se presentan las distintas características dimensionales que hacen parte de un engranaje cónico recto y se observa los distintos conos que determinan su geometría.

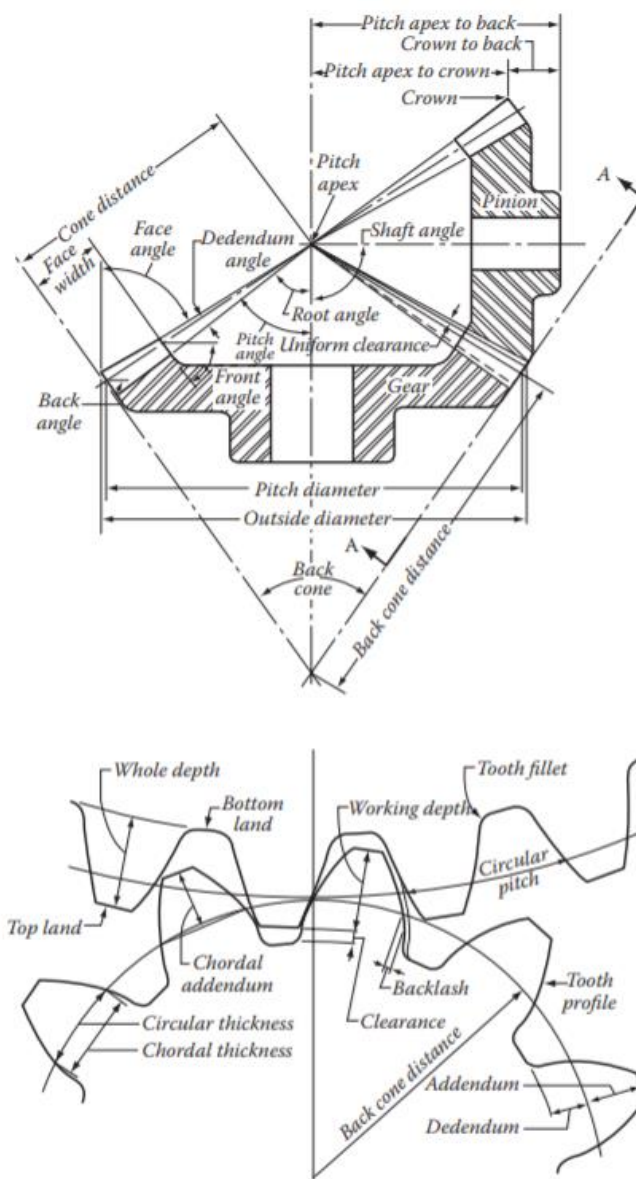


Figura 2. Características geométricas engranajes cónicos rectos

Fuente:[6]

Al referirse a engranajes cónicos estándar, se tiene en cuenta las dimensiones como: Profundidad total, valor del addendum y del dedendum que pueden variar dependiendo del tipo de engranaje cónico Figura 3.

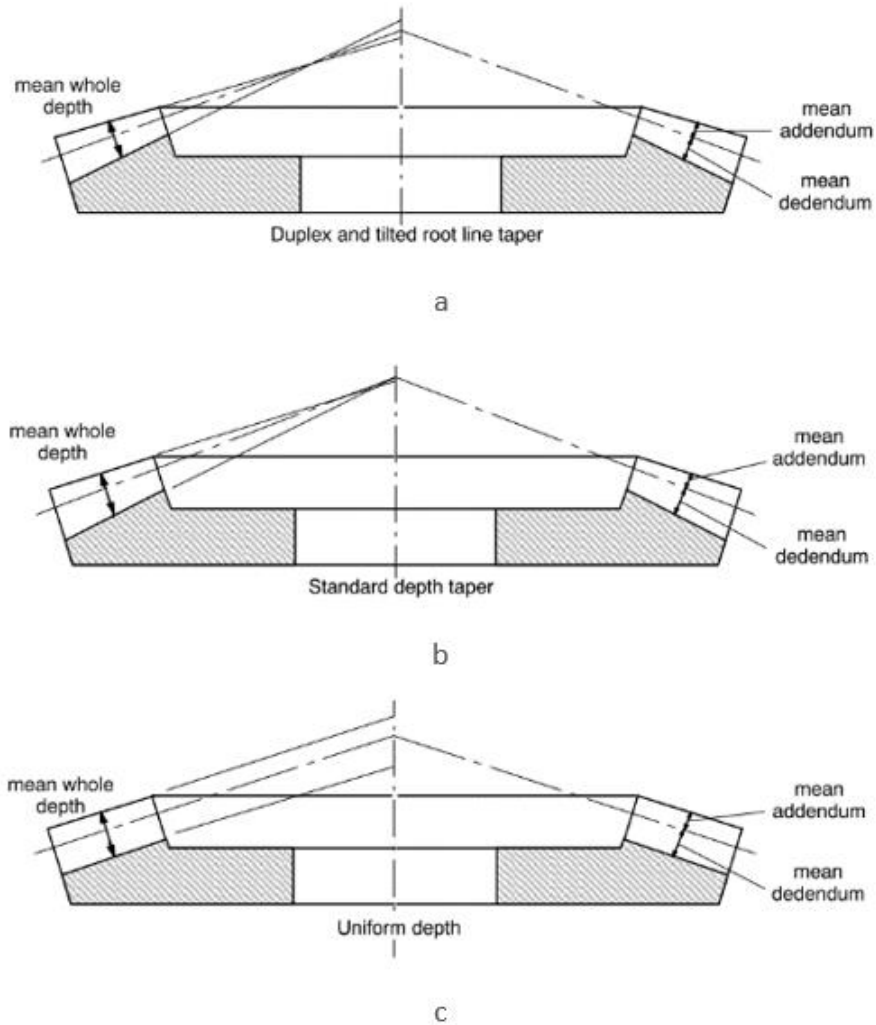


Figura 3. Distintos tipos de engranajes cónicos rectos

Fuente:[7]

Un engranaje de profundidad estándar se caracteriza por proyectar sus conos (raíz y primitivo) y convergen en un mismo punto conocido como ápex o ápice Figura 3b, en cambio el cono superior o de cara queda por debajo de dicho punto.

Un engranaje de profundidad uniforme se caracteriza por su profundidad de diente y los valores de addendum y dedendum se mantienen constantes a lo largo del diente Figura 3c.

A diferencia de las demás, el tipo dúplex se caracteriza en que sus conos convergen en un mismo punto, pero no sobre el eje de construcción del engranaje como un tipo estándar Figura 3a.

5.1.2 Principio 3-2-1 para fijación de piezas

Las piezas manufacturadas mediante arranque de viruta deben contar con objetos de sujeción o sujetadores que restrinjan los grados de libertad de la pieza, se entiende como grados de libertad movimientos traslacionales o rotaciones sobre los distintos ejes cartesianos Figura 4.

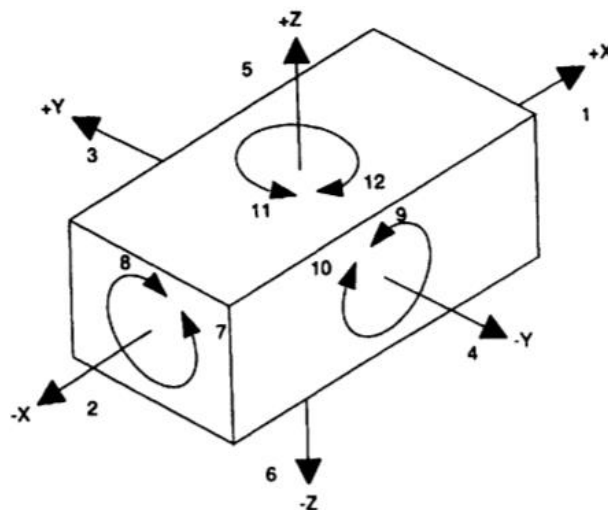


Figura 4. Grados de libertad en un objeto

Fuente:[8]

Para el diseño de un objeto de sujeción existen principios que facilitan la manera de comprender como se debe restringir los grados de libertad, el principio conceptual de localización 3-2-1 consiste en hacer uso en cada uno de los distintos planos cartesianos como limitantes de movimiento Figura 5.

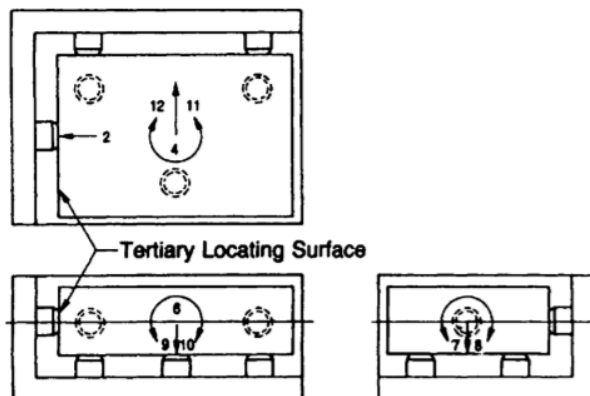


Figura 5. Principio de los 6 pines, estrategia 3-2-1

Fuente:[8]

5.1.3 Metodología de los 6 pines

Cada uno de los pines o puntos cumple con una función en particular Figura 5, donde cada uno de los pines bloquea y obstruye los movimientos de la pieza.

The three points in one plane restrict five degrees of freedom (four rotational and one linear), the two points in the second plane restrict an additional three degrees of freedom (two rotational and one linear), and the single point in the third plane restricts an additional degree of freedom (one linear), for a total of nine degrees of freedom. The remaining three degrees of freedom are restricted by banking the workpiece against the six locators, using clamps (Creese,1999, p.387-388).

Al restringir completamente los movimientos del objeto se inicia con el proceso de arranque de viruta.

5.1.4 Métodos de fresado

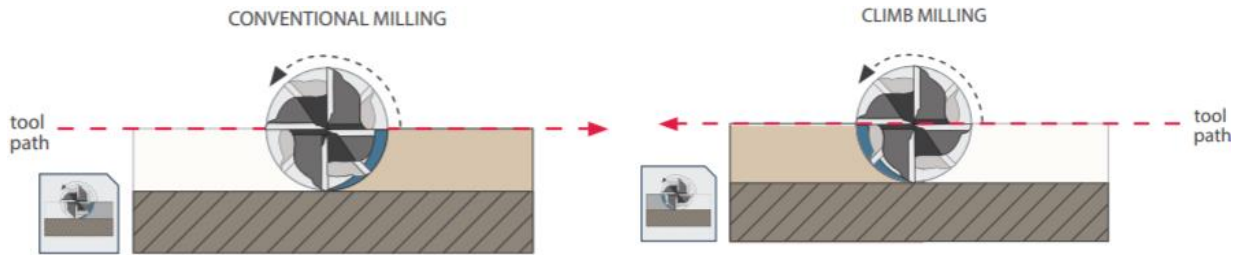
Las principales metodologías de corte del fresado se dividen en dos términos como convencional y de escalado, subida o climb por su denotación en inglés y en la siguiente tabla [1] se presentará la diferencia de una a otra:

Tabla 1. Diferencias entre metodología convencional y de subida

| Discordante | Concordante |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Se prefiere el fresado convencional para superficies rugosas y abrasivas al retirar o romper la cascarilla de material, soldada, áreas endurecidas por trabajo o cortadas con llama. • El diente se encuentra con la pieza de trabajo en la parte inferior del corte. • El acabado superficial es peor porque las virutas son transportadas hacia | <ul style="list-style-type: none"> • Mayor acabado superficial; disminución del frotamiento y el trabajo endurecimiento; hasta un 50% más de vida útil de la herramienta. • Produce fuerza hacia abajo en la pieza, disminuyendo el movimiento de la pieza. • El diente se encuentra con la pieza de trabajo en la parte superior del corte. El ancho de la viruta comienza como |

arriba por dientes y cayendo frente al cortador.

máximo en el máximo ancho del corte y disminuye a cero.



Fuente: Información obtenida del catálogo virtual de la página conical cutting tools: <https://conicalendmills.com/downloads/>

5.2 Marco Teórico

5.2.1 Proceso de cálculo de cónicos rectos.

En la siguiente Figura 6 se presenta el flujograma del proceso de cálculo de los engranajes cónicos, propuesto por la ISO, un proceso iterativo de diferentes valores, donde podemos determinar la geometría y dimensionamiento del engranaje.

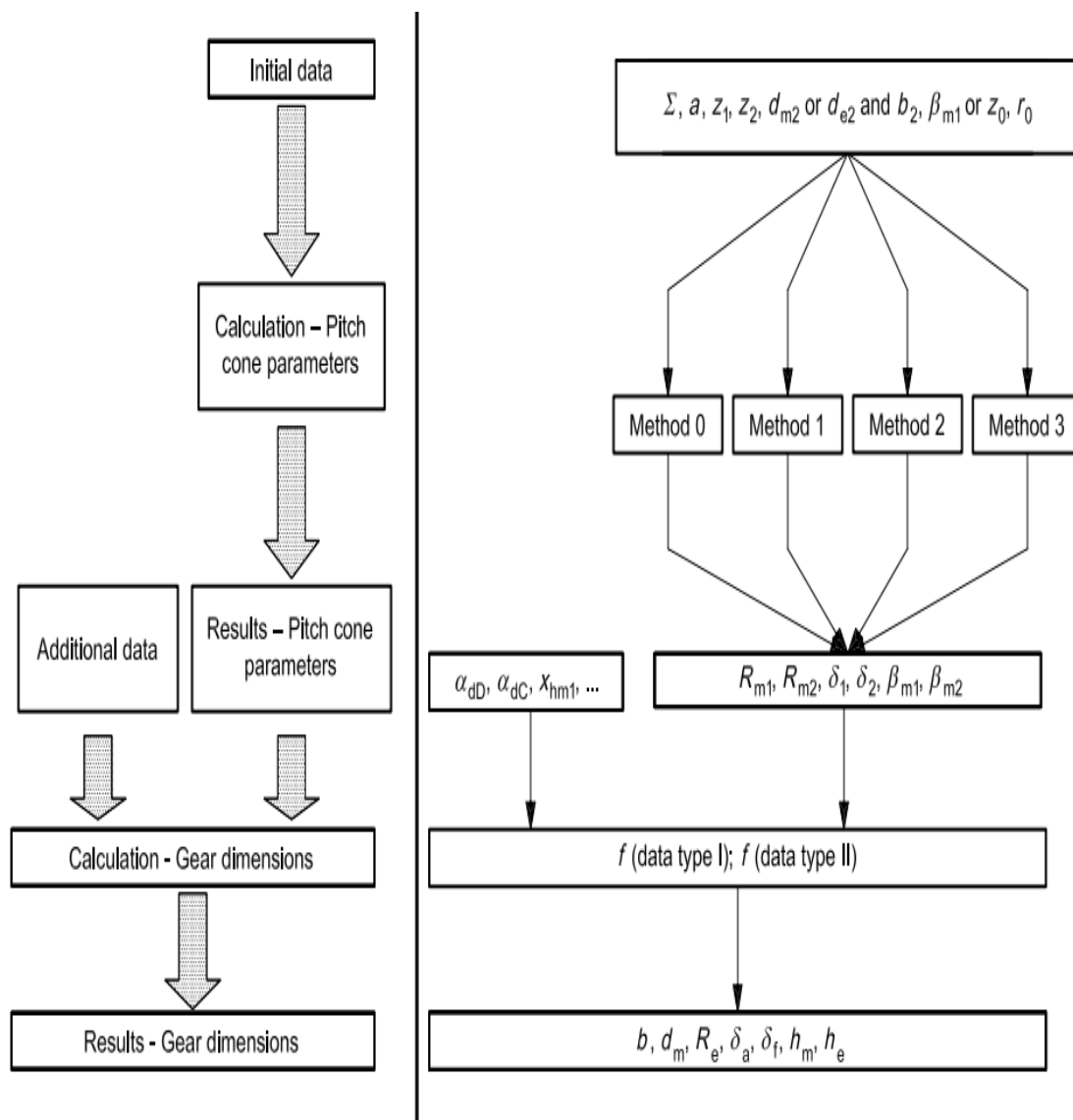


Figura 6. Flujo para calcular dimensiones de engranaje cónico recto

Fuente:[9]

5.2.2 Ecuación canónica de involuta esférica

Se presentarán las ecuaciones canónicas (1) para el desarrollo de la involuta esférica del engranaje cónico en coordenadas cartesianas para proyectar en un espacio tridimensional.

$$x = R \cos(\beta \sin(\alpha_b)) \sin(\alpha_b) \cos(\beta) + R \sin(\beta \sin(\alpha_b)) \sin(\beta) \quad (1)$$

$$z = R \cos(\beta \sin(\alpha_b)) \cos(\alpha_b)$$

Donde:

R: Distancia a lo largo del cono base, o radio de tangente (base) plano en Figura 7

α_b : Ángulo de cono base

β : Ángulo de balanceo a través del cual el cono base gira durante el movimiento de balanceo

puro

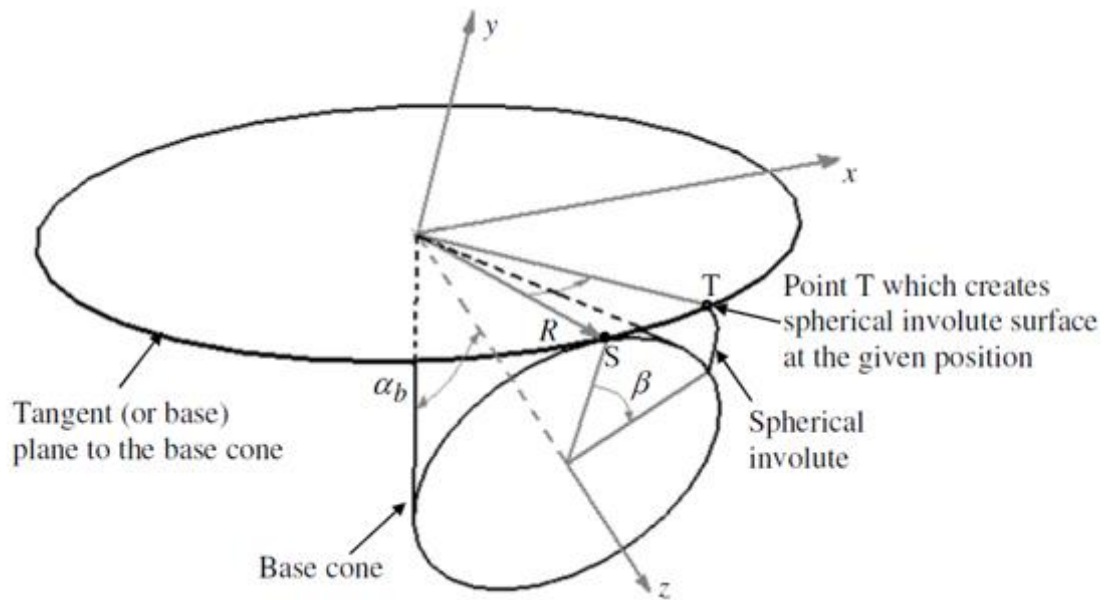


Figura 7. Canónica esférica de la involuta cónica

Fuente:[10]

5.3 Antecedentes

5.3.1 Procesos de manufactura de engranajes cónicos

5.3.1.1 Herramientas talladoras de engranajes.

Los procesos de manufactura de engranajes cónicos se dividen en dos grandes grupos formado y maquinado [5], el proceso de formado se llevan a cabo en: fundición, moldeo por inyección, extrusión, etc. Por otro lado, el proceso de maquinado hace uso de maquinaria

especializada para el proceso de manufactura en grandes cantidades, las cuales hacen uso de distintas herramientas las cuales el propósito de generar el perfil del engranaje Figura 8.

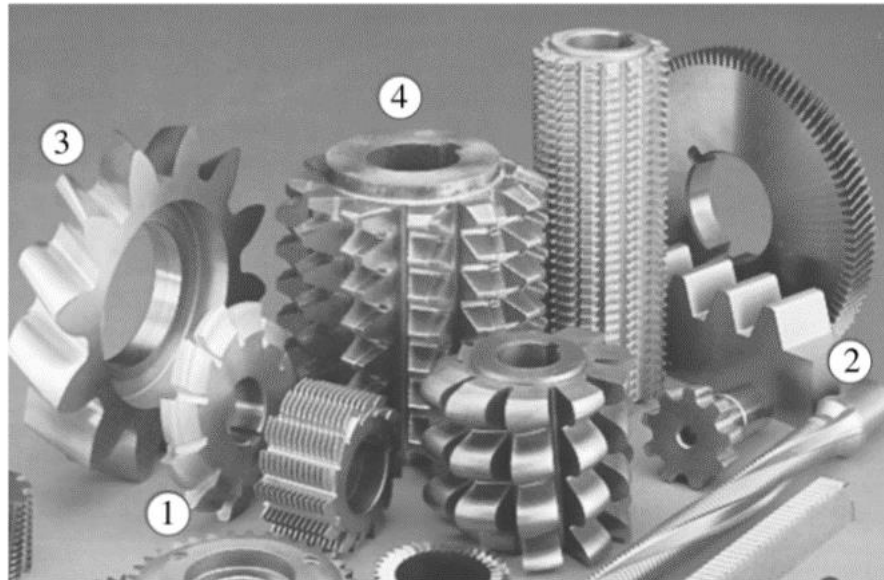


Figura 8. Herramientas de corte para maquinaria

Fuente: [5]

En la industria manufacturera de engranajes cónicos es común observar el proceso de generación mediante corte, el cual se realiza en maquinaria específica:

El método de generación es análogo al método de generación de cremalleras ya descrito. Los cortadores se mueven de manera alternativa a través de la cara del engrane cónico, como sucede con la herramienta en la cepilladora de mesa fija. Las máquinas para engranes cónicos espirales operan con base en el mismo principio, en tanto que el cortador en espiral es básicamente un cortador de fresado de careado con varias hojas de corte de lados rectos que sobresalen de su periferia Figura 9 [11].

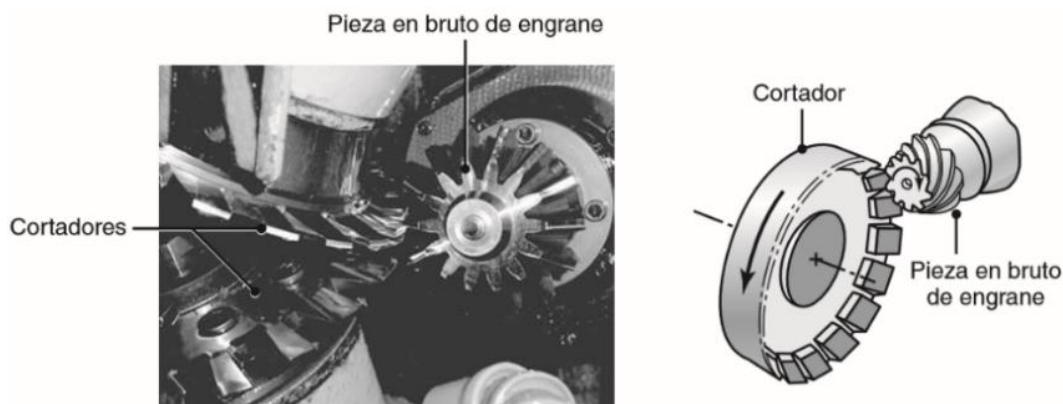


Figura 9. Herramientas de corte engranajes cónicos

Fuente: [11]

5.3.2.1 Maquinaria para engranajes cónicos.

Actualmente a nivel industrial la manufactura de engranajes cónicos es un proceso donde la cinemática requerida por la máquina exige movimientos repetitivos oscilatorios a lo largo del perfil cónico del diente para así generar la curva característica o involuta, la Figura 10 muestra una máquina especializada para la generación de engranajes cónicos por arranque de viruta. Para generar dicho perfil se hace uso de un par de cortadores Figura 9 los cuales son de uso específico para este tipo de desbaste [2].



Figura 10. Máquina generadora de engranajes

Fuente:[12]

6. Cálculo dimensional del engranaje

Se escogieron dos casos de estudio para engranajes tipo estándar, puesto que son comunes; una aplicación para robótica con una potencia requerida de 10 N.m y una turbina hidrocínética con una potencia requerida de 85,8 N.m. Ambos casos con un ángulo entre ejes de 90° y una relación de transmisión de 1:1.

Para el cálculo dimensional se utilizaron las ecuaciones de la norma ISO 23509 y se simuló en el ToolKit de NX 12 para comparar la similitud de entre ambos. Para el cálculo por norma se hizo uso del método 0 para simplificar variables como radio de corte de la herramienta específica [11].

6.1 Dimensiones de los engranajes cónicos

La Tabla 2 y Tabla 3 presenta la comparación de las dimensiones de los engranajes cónicos calculados bajo la norma ISO 23509 (ANEXO A) y las dimensiones obtenidas por el ToolKit de NX.

Tabla 2. Comparativo ISO 23509 y NX parámetros de engranaje para turbina

| Cálculos NX | | Dimensiones engranaje | |
|---------------------------------|--------|---------------------------------|-------|
| Módulo normal medio | 3,47 | Módulo normal medio | 3,48 |
| Diámetro medio de paso | 59,06 | Diámetro medio de paso | 59,09 |
| Diámetro exterior de paso | 74,97 | Diámetro exterior de paso | 75 |
| Diámetro interior de paso | 43,15 | Diámetro interior de paso | 43,18 |
| Addendum exterior | 4,41 | Addendum exterior | 4,65 |
| Dedendum exterior | 5,29 | Dedendum exterior | 5,51 |
| Profundidad exterior del diente | 9,7 | Profundidad exterior del diente | 10,16 |
| Addendum interior | 2,16 | Addendum interior | 2,31 |
| Ángulo de cara | 50,7 | Ángulo de cara | 50,94 |
| Ángulo de raíz | 39,3 | Ángulo de raíz | 39,06 |
| Ángulo addendum | 5,7 | Ángulo addendum | 5,94 |
| Ángulo dedendum | 5,7 | Ángulo dedendum | 5,94 |
| Distancia exterior del cono | 53,011 | Distancia exterior del cono | 53,03 |
| Distancia interior del cono | 30,51 | Distancia interior del cono | 30,53 |
| Distancia media del cono | 41,76 | Distancia media del cono | 41,78 |

Tabla 3. Comparativo ISO 23509 y NX parámetros de engranaje para robótica

| Cálculos NX | | Dimensiones engranajes | |
|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Módulo normal medio | 2,54 | Módulo normal medio | 2,54 |
| Diámetro medio de paso | 30,49 | Diámetro medio de paso | 30,49 |
| Diámetro exterior de paso | 38,7 | Diámetro exterior de paso | 38,7 |
| Diámetro interior de paso | 22,28 | Diámetro interior de paso | 22,28 |
| Addendum exterior | 3,22 | Addendum exterior | 3,4 |
| Dedendum exterior | 3,87 | Dedendum exterior | 4,03 |
| Profundidad exterior del diente | 7,09 | Profundidad exterior del diente | 7,43 |
| Addendum interior | 1,58 | Addendum interior | 1,69 |
| Ángulo de cara | 53,04 | Ángulo de cara | 53,38 |
| Ángulo de raíz | 36,95 | Ángulo de raíz | 36,62 |
| Ángulo addendum | 8,05 | Ángulo addendum | 8,38 |
| Ángulo dedendum | 8,05 | Ángulo dedendum | 8,38 |
| Distancia exterior del cono | 27,36 | Distancia exterior del cono | 27,37 |
| Distancia interior del cono | 15,75 | Distancia interior del cono | 15,76 |
| Distancia media del cono | 21,56 | Distancia media del cono | 21,56 |

Los valores geométricos obtenidos coincidieron con los valores generados por NX, pero se presentó una desviación en los ángulos: Outer Dedendum, Inner Addendum, Tip Angle, Root Angle, Addendum Angle y Dedendum Angle.

La diferencia entre NX y los cálculos realizados por norma pueden ser debido a los factores de diseño que tiene el acelerador de NX, ya que al despejar valores de K_{hap} con los valores obtenidos de NX se obtuvo un valor de 1.689 siendo distinto al 1.25 recomendado por la norma, el valor X_{hm1} se toma como 0 ya que este valor es obtenido mediante la variable C_{ham} , el cual es equivalente a X_{hm1} realizando el respectivo cálculo como se puede observar Ilustración 3.

A continuación, se realizó el proceso de cálculo con el fin de argumentar los valores obtenidos y los generados por NX para verificar que variables hacen diferir los valores de los ángulos.

La *distancia media del cono* se calcula con las variables de (2), obteniendo el mismo valor que NX.

$$R_m = R_e - \frac{b}{2} = 41,783 \text{ [mm]} \quad (2)$$

Seguido de ellos se realiza el cálculo del *módulo medio normal* (3) el cual hace uso del *ángulo de raíz* del engranaje de 45° y de espiral de 0° , la cantidad de dientes mínima que puede tener dependiendo de su ángulo de raíz la cual es de 17, siendo el mismo de NX Figura 11.

$$m_{mn} = \frac{2R_{m2} \sin(\delta_2) \cos(\beta_{m2})}{Z_2} = 3,478 \quad (3)$$

| | |
|--------------|----------|
| Mean Module: | 3.475823 |
|--------------|----------|

Figura 11. Valor del módulo medio normal

Se presentan los valores *medios de addendum* y *dedendum* para el piñón Tabla 4, en la cual se presenta dos coeficientes (k_{hfp} y k_{hap}) que se determinaron en norma como valores fijos para un diseño inicial con valores de 1.25 y 1 respectivamente. También se tuvo una variable (x_{hm1}) la cual se obtuvo haciendo uso de las variables tipo II Ilustración 3 y convirtiéndola en tipo I ya que son equivalentes unas con otras. Se aclara que h_{fm1} , h_{fm2} y h_{am1} , h_{am2} son equivalentes.

Tabla 4. Profundidad del diente

| Punto de cálculo de profundidad de diente | | | | |
|---|----------|--------|-------------------------|-------------|
| Parámetro | Etiqueta | Unidad | Formúla | Valor |
| Addendum medio, piñón | ham1 | mm | ham1 = mmn(khap + xhm1) | 3,475888084 |
| Dedendum medio, piñón | hfm1 | mm | hfm1 = mmn(khfp - xhm1) | 4,344860105 |

Por último, se presenta los ángulos addendum y dedendum (4) obtenidos por el cálculo y los obtenidos por NX Figura 12.

$$\theta_{a2} = \tan^{-1} \left(\frac{h_{fm1}}{R_{m2}} \right) = 5,963 \quad (4)$$

$$\theta_{f2} = \sum \theta_{fs} - \theta_{a2} = 5,936$$

| | |
|-----------------|-----|
| Ángulo addendum | 5,7 |
| Ángulo dedendum | 5,7 |

Figura 12. Valores de ángulo, NX

6.2 Comparación de la involuta geometría del perfil del diente del engranaje cónico

Para verificar el perfil del diente se usó la canónica de diseño de la involuta esférica que describe la curva característica del mismo en la Figura 7 se presenta la construcción de la curva.

Para el proceso de comprobación se usaron las variables independientes R , α_b y β , las cuales varían según el diseño del engranaje y además se tomarán tres puntos de comparación: inicio, final e intermedio del diente.

Se obtuvo un total de 100 puntos por ecuación en zonas comparativas por medio de NX se unen y verifican que las curvas estuviesen superpuestas entre el perfil generado del ToolKit y la ecuación canónica; La distancia entre dichas curvas es de máximo 3 centésimas de milímetro en el caso de estudio de robótica como se puede observar en la Figura 13.

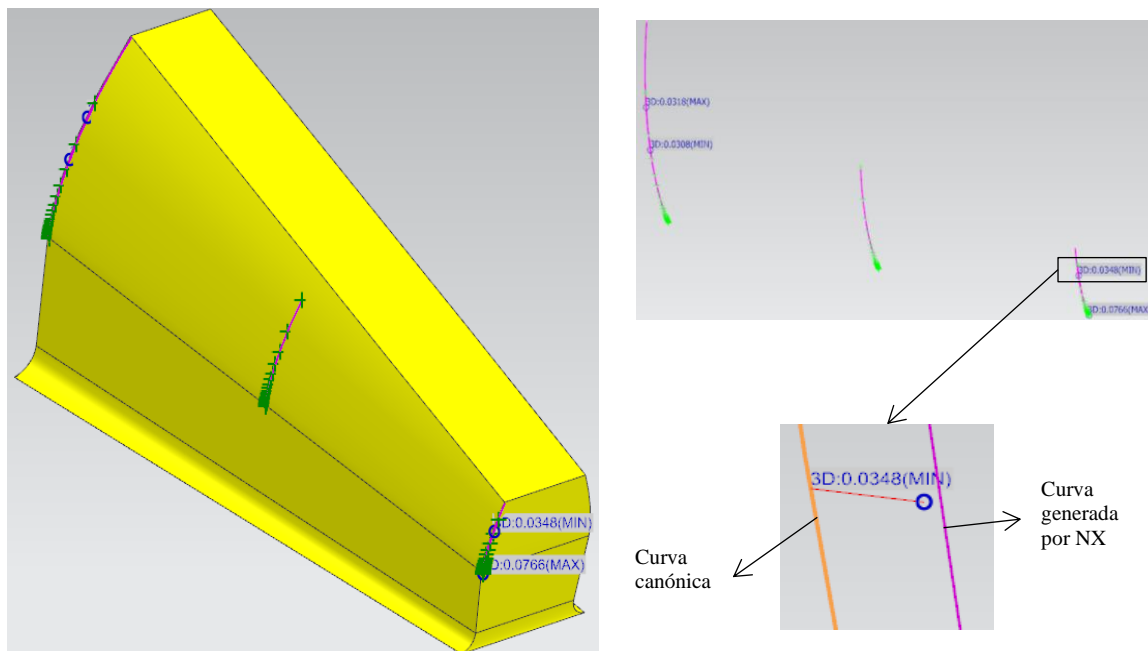


Figura 13. Diferencia entre ToolKit y canónica de robótica

Fuente: Autor

Se decidió generar el proceso de fabricación del engranaje cónico para el caso de robótica que se muestra en la siguiente Figura 14, el cual fue obtenido por el ToolKit de NX

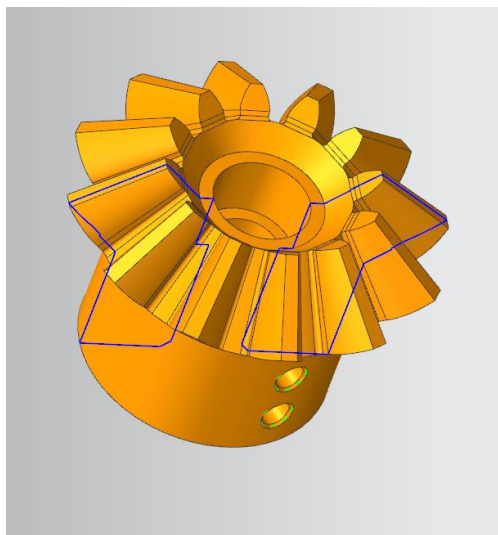


Figura 14. Engranaje cónico recto generado por NX

Fuente: Autor

7. Planificación del proceso de manufactura

7.1 Secuencia de trabajo propuesto para engranaje cónico

En la siguiente Figura 15 se presenta los pasos que se siguieron para la generación de trayectorias para el engranaje cónico recto tipo estándar

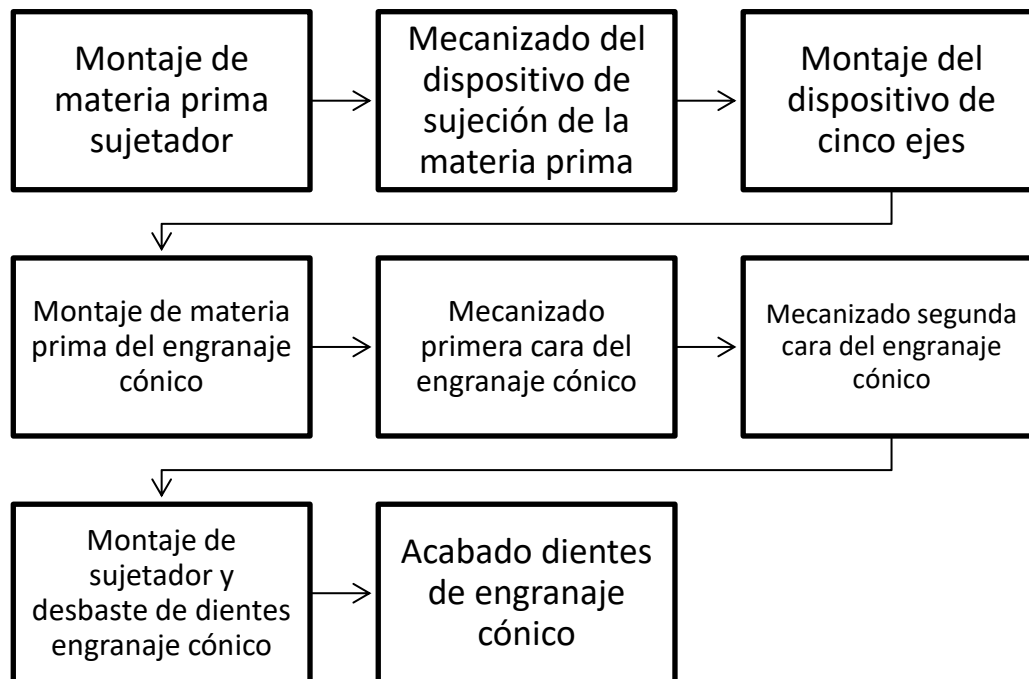


Figura 15. Secuencia de fabricación de engranaje cónico

Fuente: Autor

7.2 Dispositivo de sujeción de la materia prima

Para llevar a cabo el proceso de desbaste del engranaje se propuso un sujetador para montar la pieza a trabajar en el dispositivo de 4 y 5 eje del CNC, se usó el concepto 3-2-1 y obtener así un dispositivo de sujeción que cumpliera con las funciones de anclaje de pieza. Al realizar el estudio conceptual del sujetador se obtuvo como idea el dispositivo observado en la Figura 16.

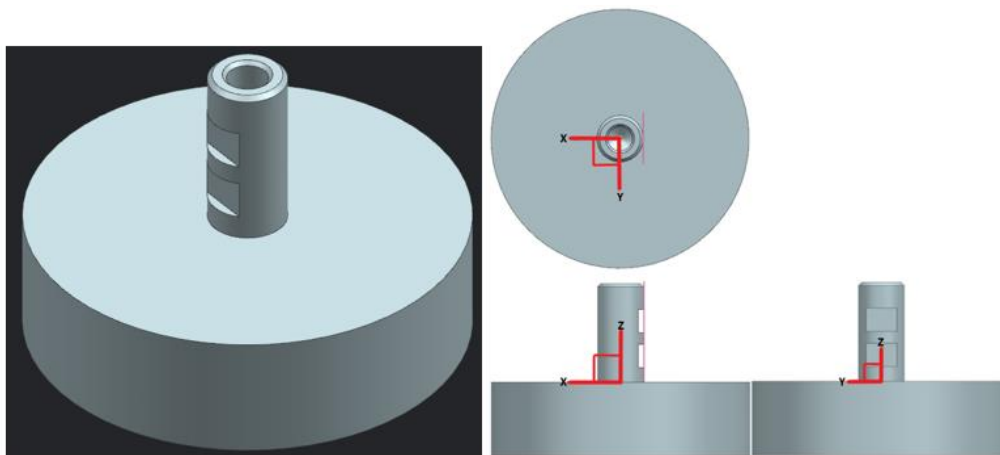


Figura 16. Dispositivo de sujeción de materia prima

Fuente: Autor

7.2.1 Restricción de grados de libertad

En la Figura 16 la vista superior presenta un eje que soportará la materia prima, restringiendo los movimientos de los ejes X e Y en sentido positivo, negativo y sentido de rotación sobre los mismos, siendo así un total de 8 grados de libertad de los 12 posibles.

Por otra parte, la vista lateral y frontal muestra la restricción de movimiento en el sentido negativo del eje Z y así bloquear 9 de 12 grados de libertad.

Por último, usando el método conceptual se aplica distintos tipos de sujeción externa para detener los grados de libertad faltantes. Los elementos de sujeción serán internos con el fin de restringir los movimientos del engranaje, para ello se realizaron dos operaciones en el sujetador, los cuales son: rosca interna en el eje con el fin de roscar y detener el movimiento en el sentido Z positivo y dos muescas en la cara frontal con el fin de interrumpir la rotación sobre el eje Z

7.2.2 Dimensionamiento del sujetador

Se usó materia prima de diámetro de $1\frac{3}{4}$ ", reducción a 8 mm para acoplar el engranaje como se ve en la Figura 17, se realizaron dos refrentados en el cilindro de 8 mm para hacer de tope al

roscar los tornillos al engranaje, los tornillos son M4 X 0,7. Por último, en la parte superior se hizo un agujero roscado M5 X 0,8 para roscar el engranaje.

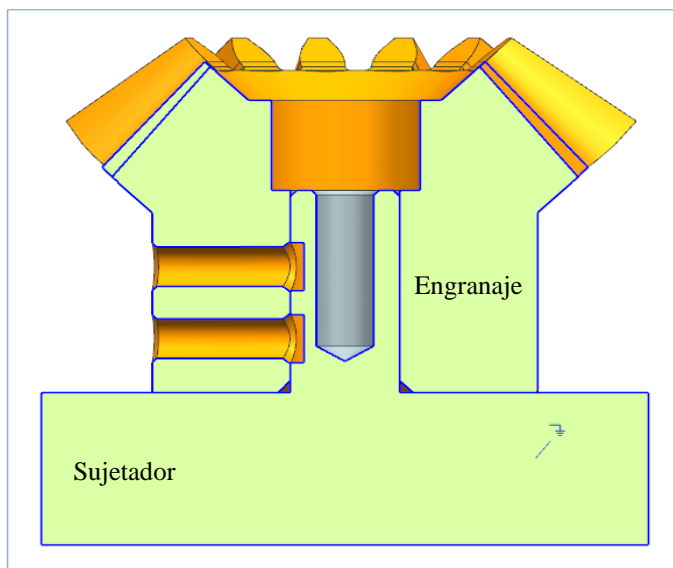


Figura 17. Ensamble del sujetador y engranaje

Fuente: Autor

Por otra parte, se realizaron otros tipos de operaciones. Figura 18, se observa que al interior del engranaje se presenta un agujero de mayor diámetro para que la cabeza del tornillo M5 X 0,8 quede a ras con el engranaje y no interrumpir el proceso de desbaste del perfil del diente.

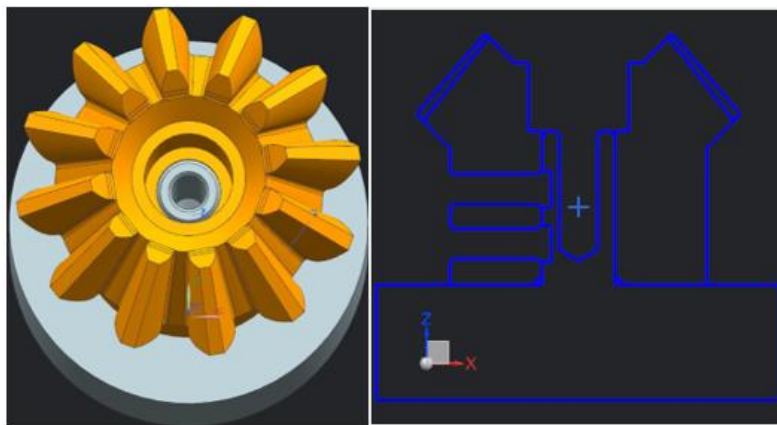


Figura 18. Vista superior inclinada y vista de sección longitudinal

Fuente: Autor

7.3 Componentes del montaje tecnológico

7.3.1 Máquina herramienta

Para la simulación se seleccionó un centro de mecanizado vertical marca FINITECH modelo GTX-210 de control FANUC y dispositivo para 4 y 5 eje Figura 19, se tuvo en cuenta la velocidad máxima del husillo para las herramientas seleccionadas para la manufactura y grados de movilidad del dispositivo Tabla 5 se presenta los valores por catálogo.

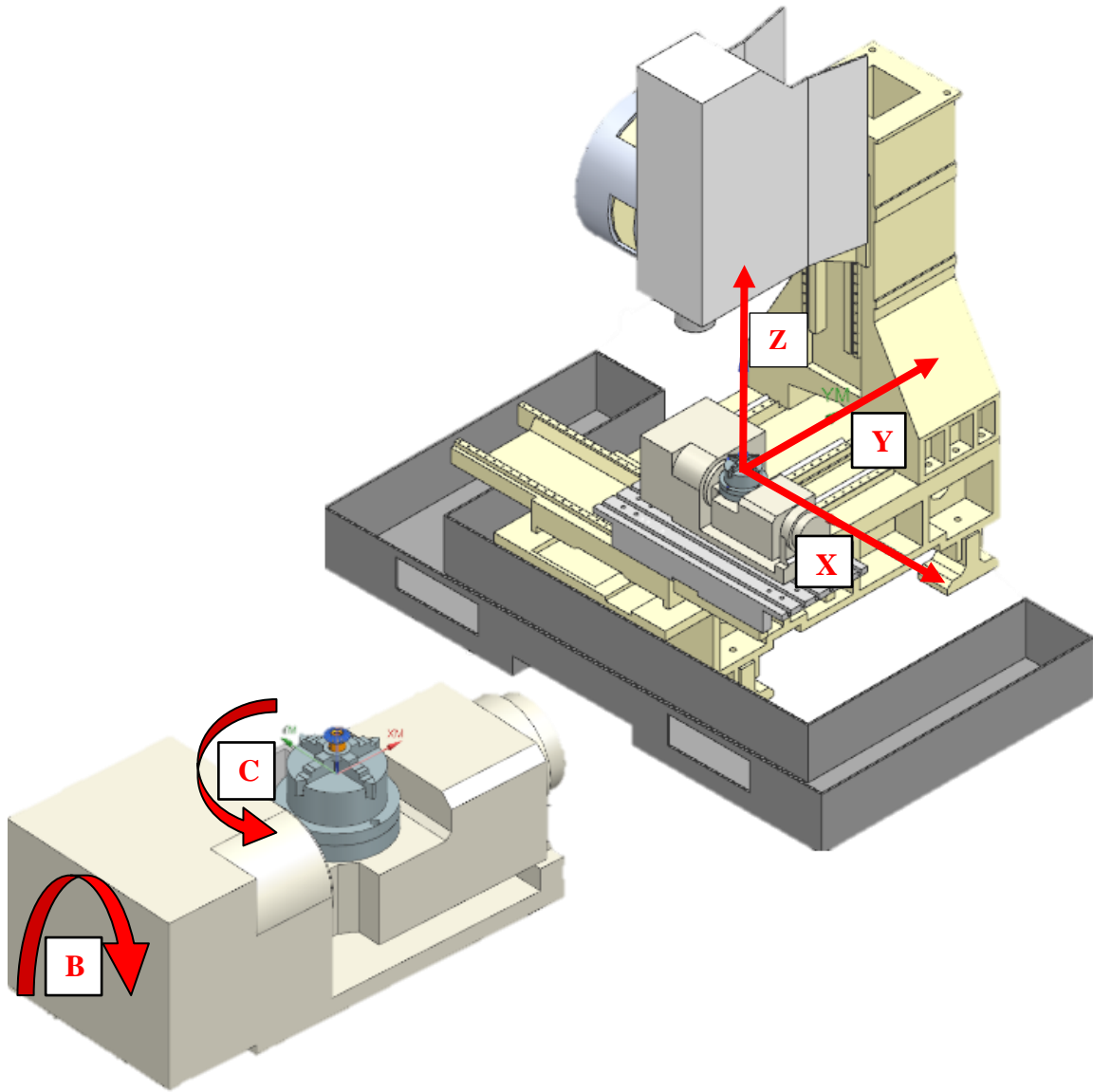


Figura 19. Máquina virtual, FINITECH GTX-210 con dispositivo de 4 y 5 eje.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de GTX-210

| Machine Specification | | GTX-210 |
|----------------------------|----------|--------------------|
| Travel | | |
| X / Y / Z - axis | | 350 / 450 / 410 mm |
| B-Axis tilt range | | "-40° ~ 110° |
| C-Axis rotation angle | | 360° |
| Max. Workpiece size | | ∅ 200 X 160L |
| Spindle nose to work table | | 0 - 410 mm |
| Axes Feed rates | | |
| X / Y / Z - axis | | 36 m/min |
| B / C Specification | | |
| C-axis work table dia. | | ∅ 210 |
| Centering hole dia. | | ∅ 40H7 |
| T slot | Standard | 12H7 mm X 1 |
| | Optional | |
| Work table Max. | B axis | 25 rpm |
| | C axis | 25 rpm |
| Max. Workpiece weight | | 50 ~ 75 kgs |

Fuente: Información obtenida del catálogo virtual de la página FINITECH <http://www.finetech.com.tw/products/detail-1>

7.3.2 Materia prima

Para la simulación se seleccionó un acero de medio carbono AISI/SAE 4140, se utiliza en forma general en la fabricación de piezas de medianas dimensiones que requieren alta resistencia mecánica y tenacidad. Buena maquinabilidad y baja soldabilidad.

| Composición Química | | | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|
| %C | %Mn | %Si | %Cr | %Mo | %P | %S |
| 0,38-0,43 | 0,75-1,00 | 0,15-0,35 | 0,80-1,10 | 0,15-0,25 | ≤ 0,035 | ≤ 0,04 |

Tabla 6. AISI/SAE 4140, composición química

Fuente:

Información obtenida de la página de Aceros Otero http://www.acerosotero.cl/acero_aleado_sae_4140.html

7.3.3 Herramientas de corte

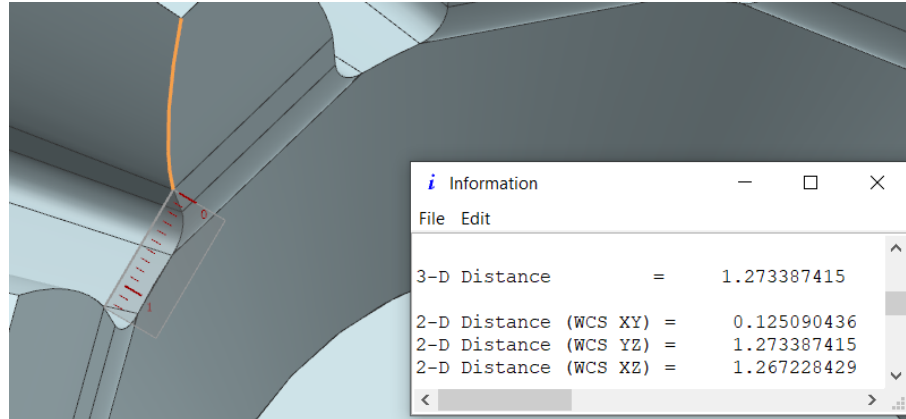


Figura 20. Distancia entre dientes

Fuente: Autor

Para la selección de herramienta se tuvo en cuenta las dimensiones del engranaje con el fin de llevar a cabo los procesos de desbaste y acabado, para el desbaste se usaron herramientas de diámetro de 2 a 3 mm dejando un sobre material de 0.6 mm.

Por otro lado, el acabado se hizo usó de herramientas de 1 a 2 mm, ya que una de las dimensiones a mecanizar tiene un valor de 1,26 mm, el cual es tomado entre las paredes más cercanas al final del diente como se observa en la Figura 20.

Para el desbaste y acabado del perfil se usó herramienta de punta plana y redonda para simular la disponibilidad de la misma en cualquier tipo de empresa metalmecánica que desee realizar dicho proceso, se presentan algunas de las herramientas usadas Figura 21.






| ITEM | MODEL | P | | | | H | M | K | N | | | | S | | |
|----------------------------|---|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------|--------|----------|----------|---------|------|----------|------------------------|
| | | Carbon Steels -HRc20 | Alloy Steels HRc20-30 | Prehardened Steels HRc30-40 | Hardened Steels HRc40-45 HRc45-55 | High Hardened Steels HRc55-70 | Stainless Steels | Cast Iron | Copper | Graphite | Aluminum | Acrylic | CFRP | Titanium | High Temperature Alloy |
| EM810 |  | ○ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ○ | | | ○ | | | | | | |
| EM876 |  | ○ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ○ | | | ○ | | | | | | |
| G907 G928 |  | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ○ | | | | ○ | ⊙ | | | | | |
| G908 G929 |  | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ○ | | | | ○ | ⊙ | | | | | |
| G909 G930 |  | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ○ | | | | ○ | ⊙ | | | | | |

Figura 21. Material recomendado para desbaste de herramientas

Fuente: Información obtenida del catálogo virtual de YU-1 <https://www.yg1usa.com/litera/litera.asp>

7.3.4 Software y máquina virtual

Para generación de trayectorias y posicionamiento de la materia prima se usó una réplica virtual en NX de la GTX-210 de la Universidad Santo Tomás [13] Figura 22, que nos permitió simular desbaste, acabado y verificación de trayectorias para el engranaje Figura 23.

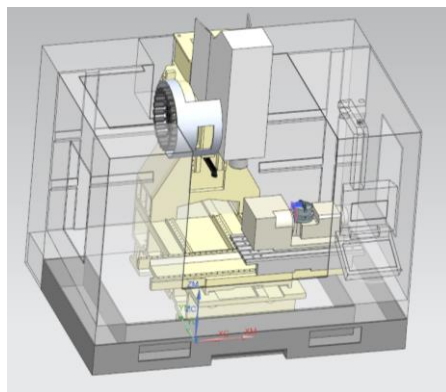


Figura 22. Máquina virtual GTX-210

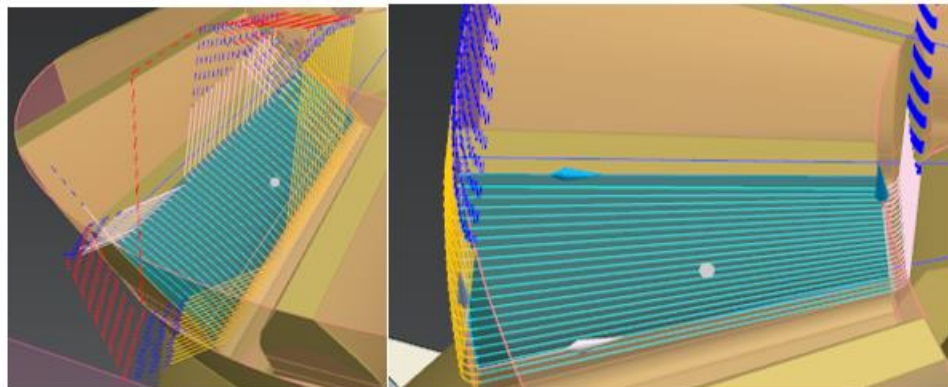


Figura 23. Trayectorias simuladas en máquina virtual

8. Montaje virtual

8.1 Trayectorias generadas para desbaste

Para el desbaste desde cero se tuvieron en cuenta puntos clave como fue la planeación del sujetador, desbaste y acabado de cada una de las caras del engranaje (superior e inferior) se presenta el flujo de proceso Figura 24, para valores más específicos de cada uno de los desbastes revisar (ANEXO B)

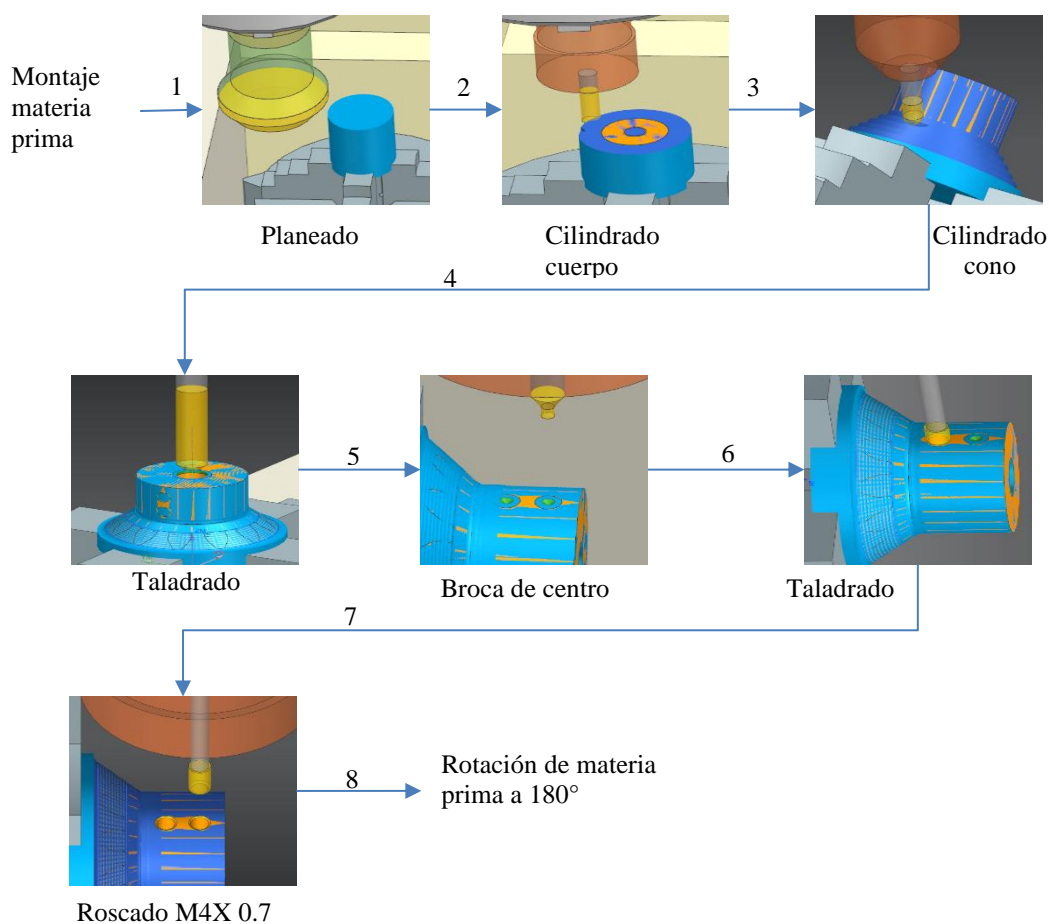


Figura 24. Diagrama de flujo preparación de materia prima, cara superior. Simulado en NX, primera etapa del proceso de desbaste del engranaje cónico, presentando el cono inferior del engranaje cónico y los agujeros roscados para el sujetador.

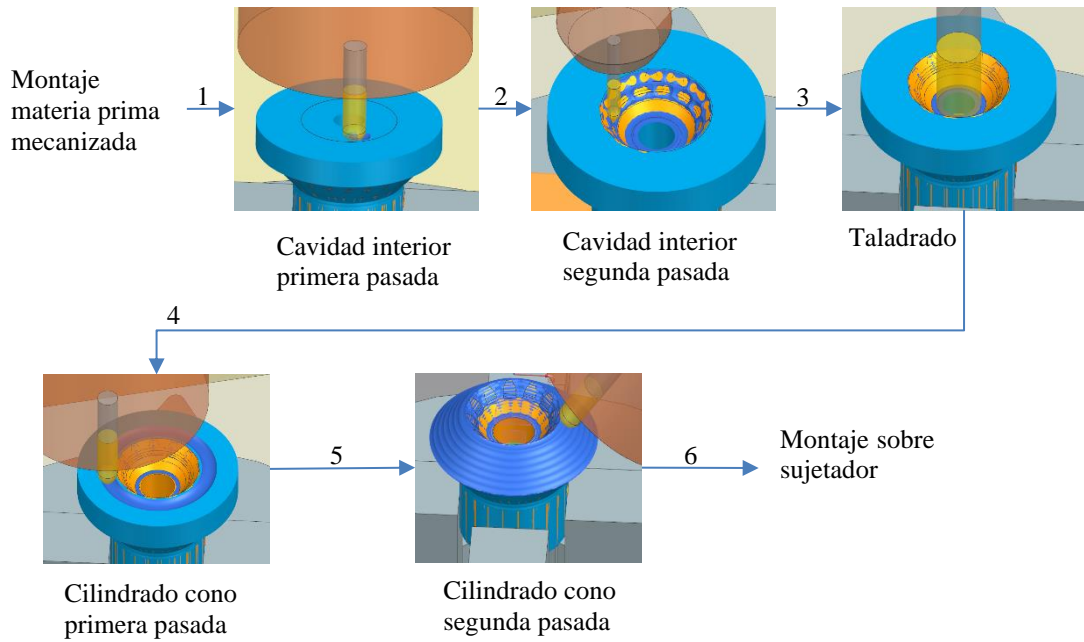


Figura 25. Diagrama de flujo preparación de materia prima, cara superior. Simulado en NX, segunda etapa del proceso de desbaste del engranaje cónico, presentando el cono superior del engranaje.

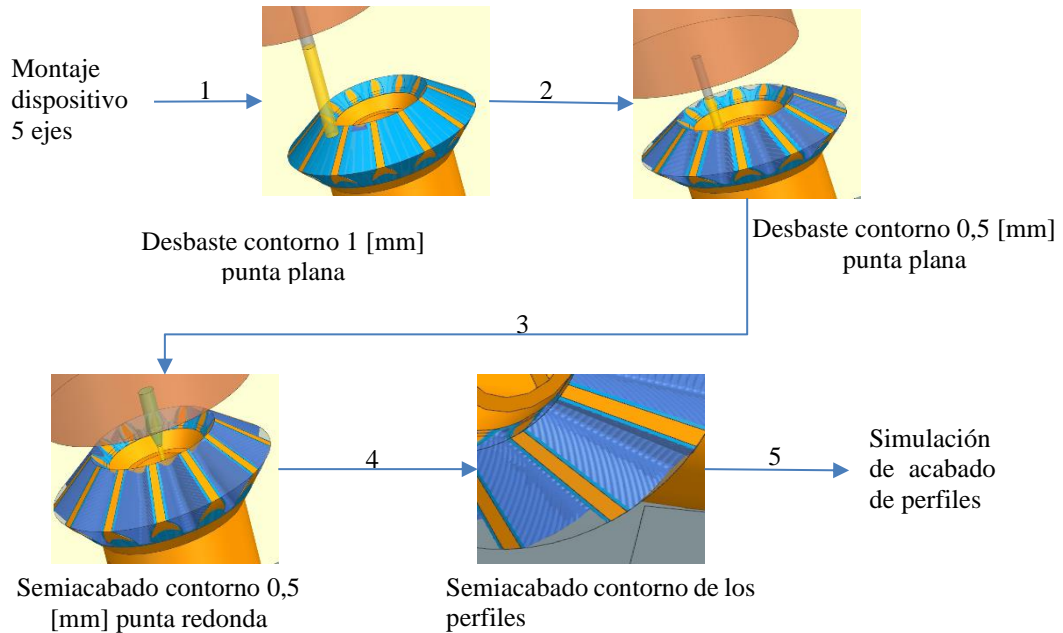


Figura 26. Desbaste contorno dientes. Simulado en NX, tercera etapa del proceso de desbaste del engranaje cónico presentando el desbaste y semi acabado en 3 etapas de los dientes del engranaje, con herramienta esférica.

8.2 Generación trayectoria del perfil

Las trayectorias utilizadas para el acabado del perfil se generaron usando los conos que describen la geometría del engranaje cónico: cono de raíz, superior o de cara y teniendo en cuenta el ápice Figura 27. Para

ellos se proyectaron líneas sobre los conos de raíz y de cara para obtener la distancia entre la parte inferior y superior de los conos, para el acabado se realizaron 15 pasadas sobre el perfil del diente, por lo tanto, dichas distancias se dividieron entre 15 para una distribución pareja Figura 28.

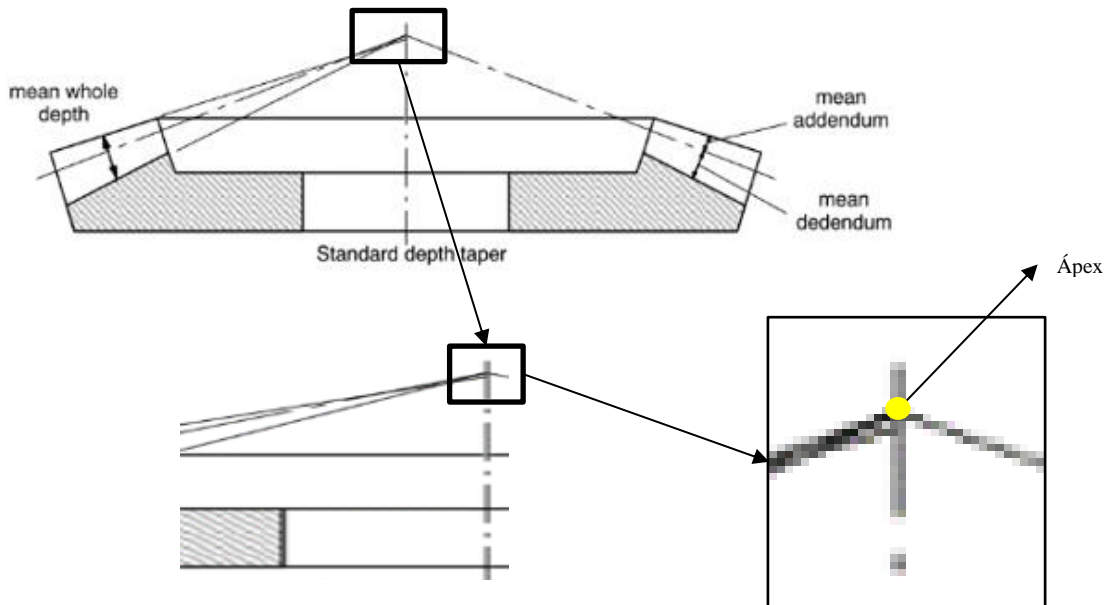


Figura 27. Conos del engranaje cónico, ápex y variación del cono de techo o cara.

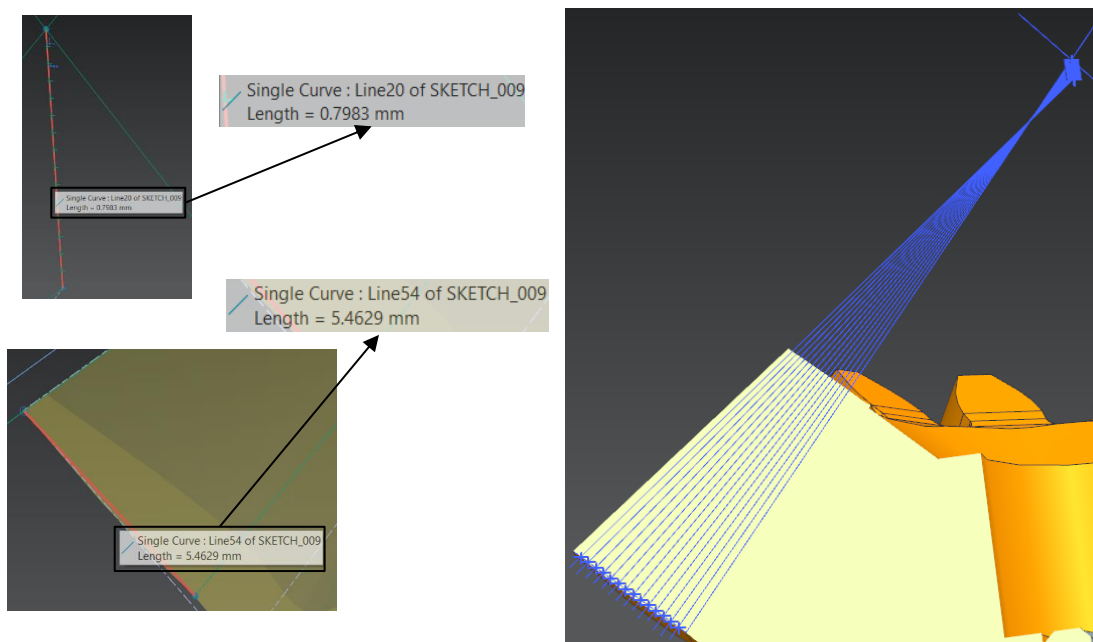


Figura 28. Líneas de construcción para toolpath

Al proyectar las líneas del perfil del se realizaron revoluciones de cada línea para generar conos, los cuales se interceptaban con los perfiles y mediante comando curva de intersección se originan las líneas de traza para el acabado Figura 29.

Para la estrategia de acabado se usó el comando Milling Contour y estrategia Streamline que permite seleccionar las líneas que definen cada uno de los movimientos del toolpath y seleccionar el eje de herramienta para cada pasada Figura 30, en la Figura 31 se muestra el acabado generado.

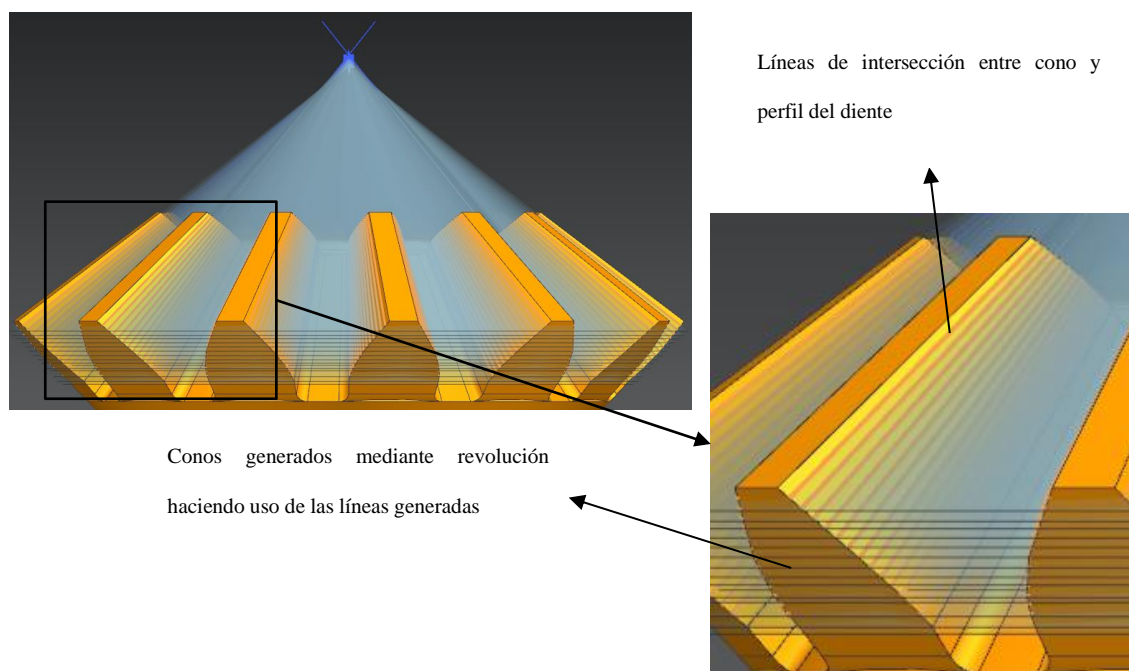


Figura 29. Conos y generación de líneas del toolpath

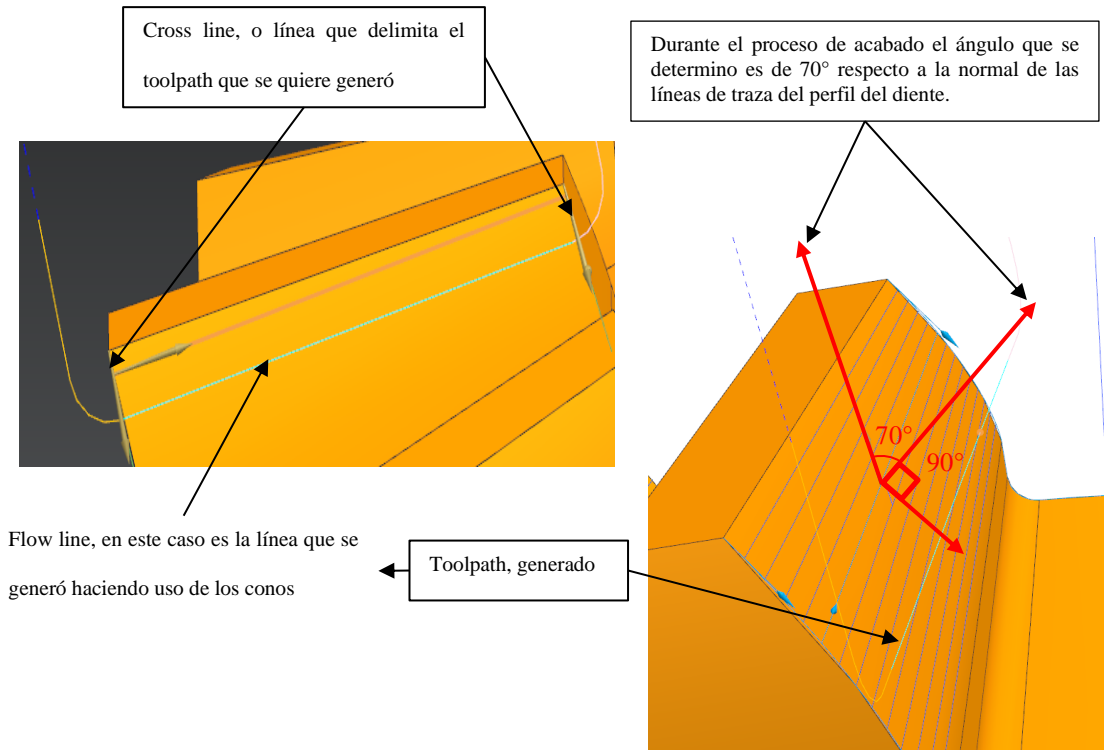


Figura 30. Toolpath generado

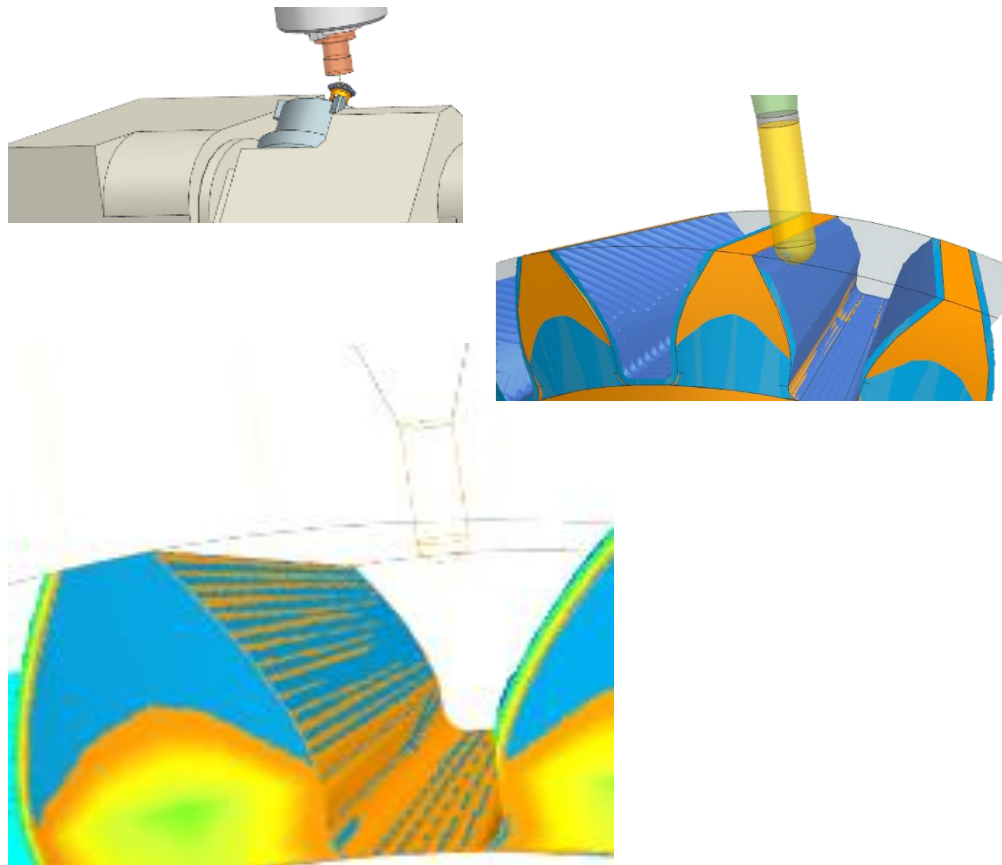


Figura 31. Acabado del perfil

8.3 Comparativo de trayectorias generadas por defecto y basadas en la geometría

Se presenta un comparativo de la estrategia Streamline haciendo uso únicamente del perfil sin definir las líneas de traza para observar las diferencias que pueden existir, realizando dicho comparativo se pudo determinar lo siguiente:

- Streamline generada por perfil
 - Facilidad en la generación de toolpaths que conforman el acabado del diente del perfil, menos iterativo.
 - La generación del toolpath tiene múltiples orientaciones de la herramienta respecto al perfil, cambiando constantemente las condiciones de proceso.
 - La estrategia para acabado del perfil se ejecuta en los tres ejes (X, Y y Z), subutilizando los movimientos rotacionales (A y B).
- Streamline generada por usuario
 - Proceso iterativo donde el usuario debe definir el eje de la herramienta para la generación del toolpath de cada una de las líneas de traza.
 - Se puede seleccionar la inclinación de la herramienta respecto al perfil.
 - Se reduce la cantidad de ejes en movimiento simultáneo y así un error acumulado menor por los movimientos de acabado del perfil.
 - La estrategia permite que la inclinación de la herramienta respecto al perfil sea constante, garantizando homogeneidad en el acabado.

9. Conclusiones

- Se implementó el proceso de mecanizado de un engranaje cónico tipo estándar, haciendo uso de máquina herramienta CNC de propósito general y herramienta comercial.
- Se definieron las características geométricas y dimensionales del engranaje requeridas para el proceso de manufactura.
- Se planeó el proceso de manufactura del engranaje en maquinaria CNC de propósito general y se realizó el montaje virtual del mecanizado y acabado del engranaje.
- Se identificó que la geometría cónica del engranaje facilitó la generación de trayectorias para el acabado superficial del perfil, obteniendo una simplificación de los movimientos simultáneos del mismo, llevándolo de tres o cuatro ejes en paralelo a un proceso de dos o tres ejes en paralelo, generando un menor error acumulado por dichos movimientos en paralelo.
- La simulación del proceso de manufactura del engranaje cónico en máquina de propósito general CNC conlleva costos elevados, tener conocimiento en procesos de manufactura y baja productividad en comparación a una máquina de características específicas, por lo tanto, este tipo de estudio es conveniente para procesos de repuestos, reparación o para aplicaciones específicas de engranajes.

10. Recomendaciones

- La continuación de este tipo de estudios en el cual facilitamos o simplificamos procesos de manufactura complejos ayuda al ámbito empresarial y académico en la generación de conocimientos que deben ser aclarados a profundidad con el fin de disminuir el sesgo tecnológico y de accesibilidad a maquinaria para realizar procesos complejos de manufactura, por ende, su importancia y relevancia a este tipo de investigaciones.
- Proponer la manufactura de un engranaje cónico haciendo uso de la estrategia de acabado propuesta en el trabajo de grado y a modo de investigación obtener mediciones de rugosidad superficial del perfil del engranaje mediante modelos virtuales, para así comparar el engranaje manufacturado y el simulado en el software y obtener la calidad superficial ISO que se lograría haciendo uso de metodologías propuestas por el usuario y las generadas por el software.

11. Referencias

- [1] M. C. Rojas, “Piñones ‘Diente por diente y vuelta por vuelta,’” *Met. Actual*, vol. 9, pp. 44–50, 2008.
- [2] H. Stadtfeld, “CONIFLEX Plus Straight Bevel Gear Manufacturing,” p. 14, 2006.
- [3] H. Muller and J. Thomas, “Face-off: Face Milling vs. Face Hobbing,” *Gear Solutions*, no. September, 2007.
- [4] DANE, “Encuesta de Formación de Capital Humano,” Bogotá, Colombia, 2014. [Online]. Available: <http://www.dane.gov.co/>.
- [5] R. L. Mott, “ENGRANAJES CÓNICOS,” in *Diseño de Elementos de Máquinas*, PEARSON, 2006, pp. 622–623.
- [6] S. P. Radzevich, *Dudley’s Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, Second Edition*. 2012.
- [7] A. G. M. Association, “Design Manual for Bevel Gears.” p. 102, 2003.
- [8] R. C. Creese, “INTRODUCTION TO MANUFACTURING PROCESSES AND MATERIALS,” New York, 1999.
- [9] S. C. Service, “INTERNATIONAL STANDARD,” *Communication*, vol. 2006, pp. 1–8, 2003.
- [10] H. Ligata, A. Axle, H. H. Zhang, and W. Lafayette, “Geometry Definition and Contact Analysis of Spherical Involute Straight Bevel Gears,” 2011.
- [11] S. R. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería Y Tecnología*. 2008.
- [12] Gleason, “Bevel Gear Cutting Solutions,” *The Gleason Works*, pp. 1–8, 2011.
- [13] Y. Reyes, “Desarrollo De Procedimiento Para La Generación, Simulación Y Verificación De Maquinado En Centro De Mecanizado CNC Multiejes Técnica 4+1 Y Su Aplicación En Montaje Experimental,” 2014.

12. ANEXOS

Tabla de ilustraciones de los anexos

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Gráfico para determinar diámetro exterior haciendo uso de potencia y relación de dientes. | 46 |
| Ilustración 2. Valores generados para el proceso de cálculo de la geometría | 47 |
| Ilustración 3. Tipo de variables según variables a disposición | 48 |
| Ilustración 4. Valores del Kd según ISO | 49 |
| Ilustración 5. Valores del Kt según ISO | 49 |
| Ilustración 6. Resultados obtenidos para el valor Cham | 50 |
| Ilustración 7. Fórmulas para cálculos de ángulos addendum y dedendum | 51 |
| Ilustración 8. Valores Hfm2 Hfm1 | 51 |
| Ilustración 9. Ángulos dedendum y addendum sin tener en cuenta valores del cono | 52 |
| Ilustración 10. Valores dimensionales iniciales | 52 |

ANEXO A

Parámetros de cono de paso

Para iniciar el proceso de cálculo se solicita únicamente la potencia (P), la cual nos ayuda a obtener valores de referencia para dar inicio al cálculo. Según norma, la relación de dientes se le conocerá como Teeth Ratio (u) valor a tener en cuenta para la selección del d_e (diámetro exterior del engranaje) el cual se obtiene de la Ilustración

1.

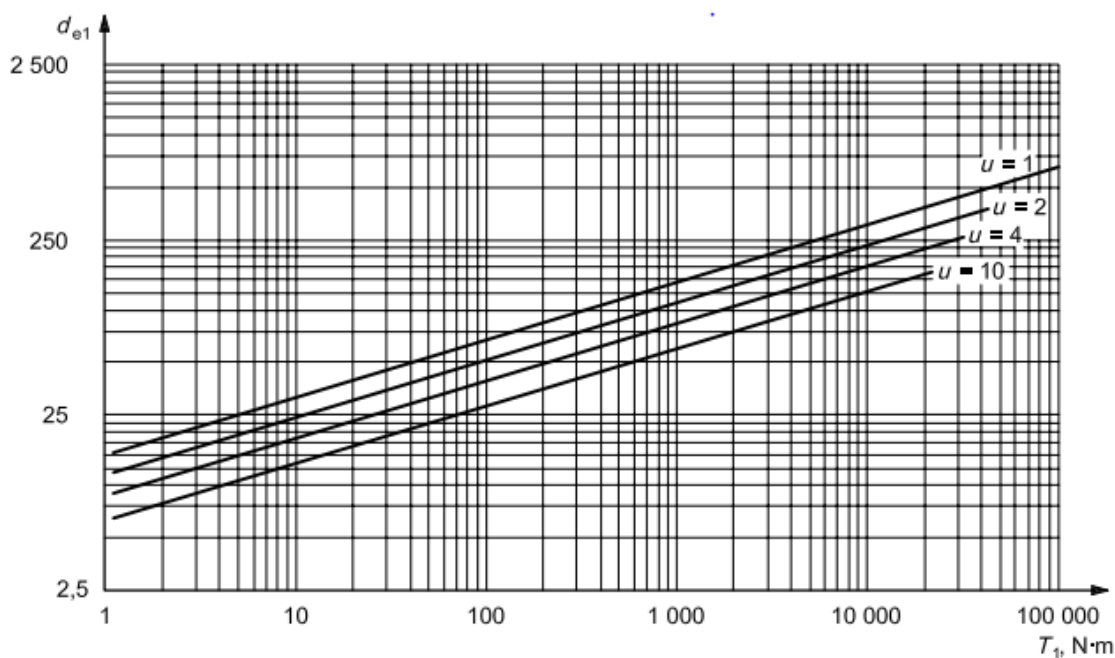


Ilustración 1. Gráfico para determinar diámetro exterior haciendo uso de potencia y relación de dientes

En la siguiente Ilustración 2 se presentan los cálculos realizados para la obtención de los valores del cono de paso, las fórmulas son las mismas presentadas por la Norma ISO 23509

| Pitch Cone Parameters | | | | |
|-----------------------|------------|--------|---|-------------|
| Parámetro | Etiqueta | Unidad | Formúla | Valor |
| Gear Ratio | u | - | $Z1/Z2$ | 1 |
| Pinion Pitch Angle | δ_1 | ° | $\delta_1 = \text{atan}[\sin(\Sigma)/\cos(\Sigma)+u]$ | 45 |
| Wheel Pitch Angle | δ_2 | ° | $\delta_2 = \Sigma - \delta_1$ | 45 |
| Outer Cone Distane | Re | mm | $Re = de/2\sin(\delta_1)$ | 27,36503243 |
| Mean Cone Distance | Rm | mm | $Rm = Re - b/2$ | 21,56003243 |
| Face Width Factor | Cbe | - | - | 0,5 |
| Pinion face width | be1 | mm | $be1 = cbe*b2$ | 5,805 |

Ilustración 2. Valores generados para el proceso de cálculo de la geometría

Parámetros para dimensiones del engranaje

Para el cálculo de dimensiones del engranaje se hace uso de las siguientes ecuaciones que dividen en tipo I o tipo II como se observa en Ilustración 3 y son recíprocas entre ellas.

| Data type I | | Data type II | |
|----------------------------------|---|---------------------|-------------------------------|
| Symbol | Description | Symbol | Description |
| α_{dD} | nominal design pressure angle – drive side ^a | | |
| α_{dC} | nominal design pressure angle – coast side ^a | | |
| f_{allm} | influence factor of limit pressure angle ^a | | |
| x_{hm1} | profile shift coefficient | c_{ham} | mean addendum factor of wheel |
| k_{hap} | basic crown gear addendum factor | k_d | depth factor |
| k_{hfp} | basic crown gear dedendum factor | k_c | clearance factor |
| x_{smn} | thickness modification coefficient | k_t | thickness factor or |
| | | \overline{w}_{m2} | wheel mean slot width |
| $j_{mn}, j_{m2}, j_{en}, j_{e2}$ | backlash (choice of four) | | |
| θ_{a2} | addendum angle of wheel | | |
| θ_{f2} | dedendum angle of wheel | | |

^a Generally drive and coast side pressure angles are balanced in initial design. However, some applications may be optimized with unbalanced pressure angles, see Annex C for guidance.

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

Ilustración 3. Tipo de variables según variables a disposición

Se usan datos de tipo II y no tipo I ya que se debe tener valores previos al cálculo, por ejemplo, en el caso de x_{hm1} la norma hace referencia a la cláusula 8 la cual no se indica en ninguna parte del documento por dicha razón se trabajar con el tipo II.

El valor seleccionado para los ángulos de presión normal para los distintos lados (conducido y conductor) tiene un valor de 25°, el valor f_{im} en este caso será 0, ya que el engranaje no es de tipo hipoidal.

Los valores de k_d y k_c se determinan de la siguiente manera: k_d se determina de Ilustración 4, el valor k_c según recomendación norma para un diseño inicial es debe de seleccionar un valor de 0.125, este puede variar dependiendo del diseño. Los valores del k_t se obtiene de la Ilustración 5.

| 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 |

Ilustración 4. Valores del K_d según ISO

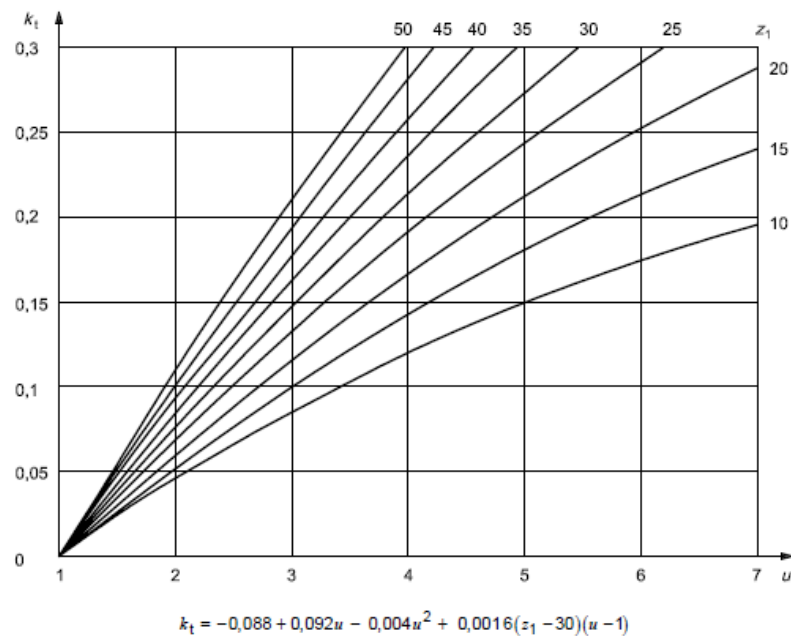


Figure C.1 — Thickness factor, k_t

Ilustración 5. Valores del K_t según ISO

Cálculo del factor medio de addendum

Para el factor c_{ham} es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

$$n = a \sin(\sin \varphi \cos \delta_2)$$

$$u_a = \sqrt{\frac{\cos \delta_1 \tan \delta_2 \cos n}{\cos \delta_2}}$$

| Type of gear | Mean addendum factor | Number of pinion teeth |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Straight bevel | $0,210 + 0,290/u_g^2$ | 12 or more |
| Spiral bevel and hypoid | $0,210 + 0,290/u_g^2$ | 12 or more |
| | $0,210 + 0,280/u_g^2$ | 11 |
| | $0,175 + 0,280/u_g^2$ | 10 |
| | $0,145 + 0,235/u_g^2$ | 9 |
| | $0,130 + 0,195/u_g^2$ | 8 |
| | $0,110 + 0,160/u_g^2$ | 7 |
| | $0,100 + 0,115/u_g^2$ | 6 |
| Zerol bevel | $0,210 + 0,290/u_g^2$ | 13 or more |

Para el caso en específico dieron los siguientes valores:

| Cálculo Cham | | | | |
|----------------------|-----------|--------|--|-------|
| Párametro | Etiqueta | Unidad | Formúla | Valor |
| Wheel offset angle | ρ | - | $\rho = a^* \sin(\sin(\zeta_m) \cos(\delta_2))$ | 0 |
| Equivalent ratio | u_a | - | $u_a = \sqrt{(\cos(\delta_1) \tan(\delta_2) \cos(\rho)) / (\cos(\delta_2))}$ | 1 |
| Mean addendum factor | C_{ham} | - | $c_{ham} = 0,210 + 0,290/u_a^2$ | 0,5 |

Ilustración 6. Resultados obtenidos para el valor Cham

Cálculo de ángulos addendum y dedendum

Para el caso específico se utilizarán las fórmulas de tipo standard, las cuales se pueden observar en la Ilustración 7.

| 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) |

| 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 | $\Sigma \theta_{fC} = \left(\frac{90m_{et}}{R_{e2} \tan \alpha_n \cos \beta_m}\right) \left(1 - \frac{R_{m2} \sin \beta_{m2}}{r_{o0}}\right)$ (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) |

Ilustración 7. Fórmulas para cálculos de ángulos addendum y dedendum

Para hacer uso de las ecuaciones para el cálculo de los ángulos se deben de calcular factores tales como valor medio para dedendum para piñón, rueda y distancia de cono media (h_{fm1} , h_{fm2} y R_{m2}), los cuales se presentan en la Ilustración 8 a excepción de R_{m2} , que se encuentra en la Ilustración 2.

| Tooth Depth Calculation Point | | | | |
|-------------------------------|----------|--------|------------------------------------|-------------|
| Parámetro | Etiqueta | Unidad | Formúla | Valor |
| Mean dedendum, Wheel | hfm2 | mm | $h_{fm2} = mmn(kh_{fp} + x_{hm1})$ | 3,176092737 |
| Mean addendum, Pinion | ham1 | mm | $h_{am2} = mmn(kh_{ap} + x_{hm1})$ | 2,540874189 |

Ilustración 8. Valores Hfm2 Hfm1

Y los valores correspondientes a los ángulos de dedendum y addendum son:

| Cálculo θ_{a2} , θ_{f2} y $\sum\theta_f$ | | | | |
|--|-------------------|--------|---|-------------|
| Parámetro | Etiqueta | Unidad | Formúla | Valor |
| Angle | θ_{a2} | ° | $\theta_{a2} = \arctan(h_{fm1}/R_{m2})$ | 8,380191745 |
| Angle | θ_{f2} | ° | $\theta_{f2} = \sum\theta_{fs} - \theta_{a2}$ | 8,380191745 |
| Sum of dedendum angle | $\sum\theta_{fs}$ | ° | $\sum\theta_{fs} = \arctan(h_{fm1}/R_{m2}) + \arctan(h_{fm2}/R_{m2})$ | 16,76038349 |

Ilustración 9. Ángulos dedendum y addendum sin tener en cuenta valores del cono

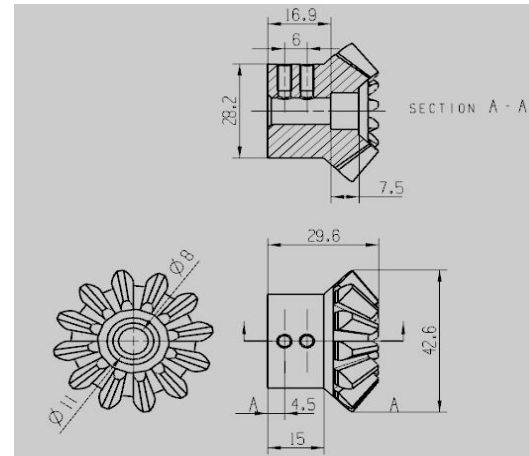
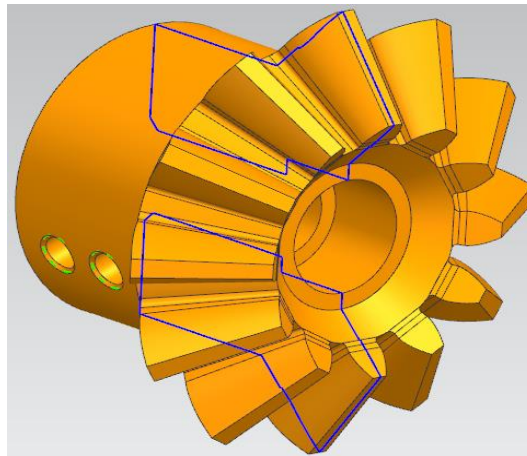
Los parámetros finales que se obtuvieron se presentan en la Ilustración 10, los cuales serán usados para determinar las dimensiones del engranaje.

| Datos de entrada para cálculo de dimensiones del engranaje | | | | | |
|--|---------------|--|-----------------------------|---------------|------------|
| Tipo I | | Tipo II | | | |
| Valor | Símbolo | Descripción | | Símbolo | Valor |
| 25 | α_{dD} | Ángulo de presión nominal de diseño - Dirigido | | α_{dD} | 25 |
| 25 | α_{dC} | Ángulo de presión nominal de diseño - Llevado | | α_{dC} | 25 |
| 0 | f_{alim} | Factor de límite de ángulo de presión | | f_{alim} | 0 |
| 0 | x_{hm1} | Coefficiente de cambio de perfil | Factor medio addendum rueda | c_{ham} | 0,5 |
| 1 | k_{hap} | Factor addendum | Factor de profundidad | k_d | 2 |
| 1,25 | k_{hfp} | Factor dedendum | Factor de holgura | k_c | 0,125 |
| 0 | x_{smn} | Coefficiente de modificación espesor | Factor de espesor | k_t | 0 |
| 0 | j | Retroceso (Backlash) | | j | 0 |
| 8,380191745 | θ_{a2} | Ángulo addendum | | θ_{a2} | 8,38019175 |
| 8,380191745 | θ_{f2} | Ángulo dedendum | | θ_{f2} | 8,38019175 |

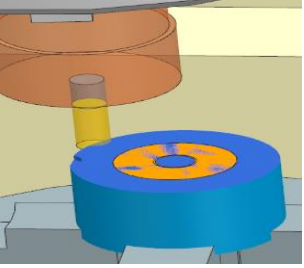
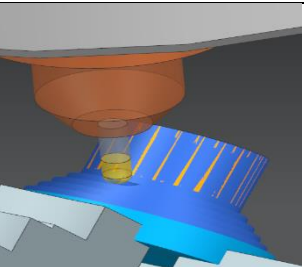
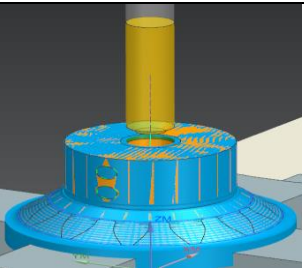
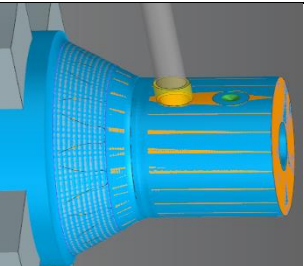
Ilustración 10. Valores dimensionales iniciales

ANEXO B

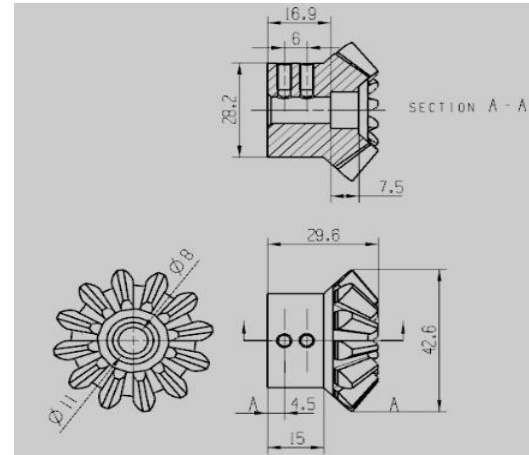
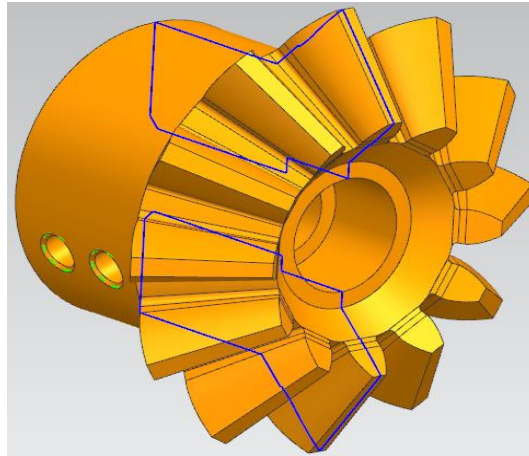
| | | | | |
|------------------|---------------------------------------|-------------|-----------|----------------------|
| TRABAJO DE GRADO | ENGRANAJE CÓNICO RECTO, CARA INFERIOR | | | Fecha: 2/11/20 |
| | | | | Número de piezas: 1 |
| ESCALA 1:1 | Material | Dimensiones | Reviso 1: | |
| | Acero AISI/SAE 4140 | | Reviso 2: | |
| | | | Realizo: | Juan David Vergara R |

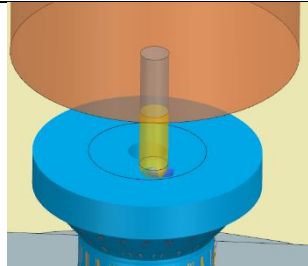
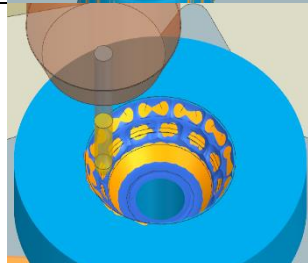


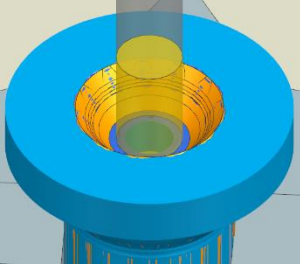
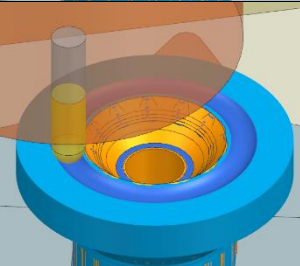
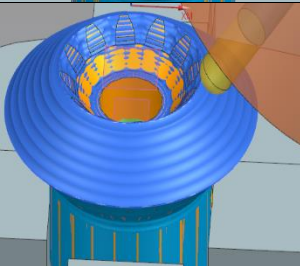
| # Op. | Descripción | Croquis | Pocket | \emptyset [mm] | Vc [m/min] | RPM | Fz [mm/t] | Z [t] | ap [mm] | ae [mm] | F [mm/min] | Kc [MPa] | Pc [kW] |
|-------|-------------|---------|--------|------------------|------------|------|-----------|-------|---------|---------|------------|----------|---------|
| 1 | Refrentado | | 1 | 63 | 633 | 3200 | 0.013 | 6 | 3 | 15 | 250 | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---|---|------------|----|------|-------|---|-----|-----|-----|--|--|
| 2 | Forma Cuerpo |  | 3 | 6 | 46 | 2493 | 0.009 | 4 | 4 | 0.2 | 90 | | |
| 3 | Cono posterior |  | 2 | 5 | 48 | 3100 | 0.024 | 2 | 0.2 | 1 | 150 | | |
| 5 | Taladrado central |  | 6 | 8 | 62 | 2500 | 0.016 | 6 | 33 | - | 200 | | |
| 6 | Roscado lateral |  | 5 | M4X0. 7 | 4 | 318 | 6 | - | - | - | - | | |

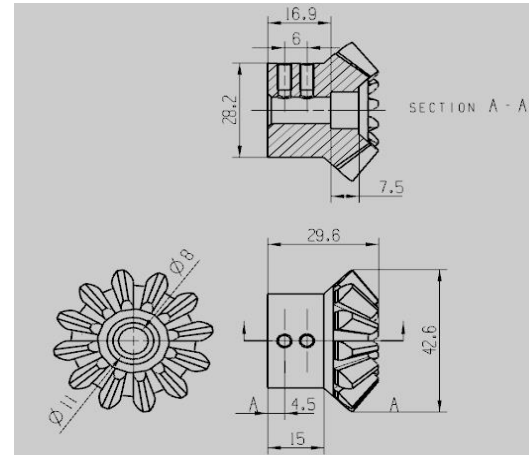
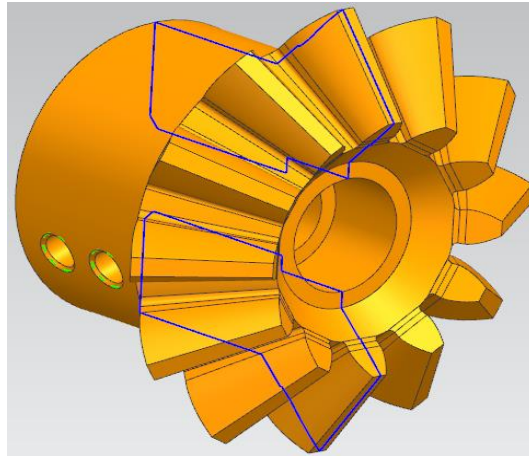
| | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|-------------|-----------|----------------------|--|
| TRABAJO DE GRADO | ENGRANAJE CÓNICO RECTO, CARA SUPERIOR | | | Fecha: 2/11/20 | |
| | | | | Número de piezas: 1 | |
| ESCALA 1:1 | Material | Dimensiones | Reviso 1: | | |
| | Acero AISI/SAE 4140 | | Reviso 2: | | |
| | | | Realizo: | Juan David Vergara R | |

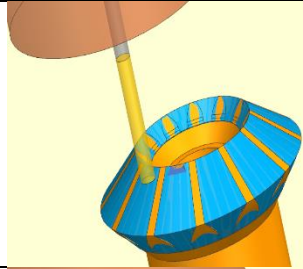
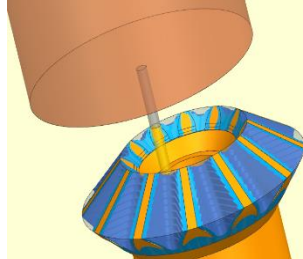


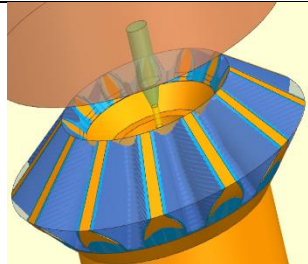
| # Op. | Descripción | Croquis | Pocket | \varnothing [mm] | Vc [m/min] | RPM | Fz [mm/t] | Z [t] | ap [mm] | ae [mm] | F [mm/min] | Kc [MPa] | Pc [kW] |
|-------|--------------|---|--------|--------------------|------------|------|-----------|-------|---------|---------|------------|----------|---------|
| 1 | Cavidad |  | 1 | 6 | 50 | 2653 | 0.030 | 2 | 0.2 | 1.2 | 160 | | |
| 2 | Forma Cuerpo |  | 3 | 3 | 35 | 3714 | 0.016 | 2 | 0.2 | 0.6 | 125 | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|---|---|----|-----|------|-------|---|-----|-----|-----|--|--|
| 3 | Taladrado central |  | 2 | 11 | 103 | 3000 | 0.027 | 3 | 19 | - | 250 | | |
| 4 | Cono superior_1 |  | 1 | 6 | 50 | 2653 | 0.030 | 2 | 0.2 | 1.2 | 160 | | |
| 5 | Cono superior_1 |  | 1 | 6 | 50 | 2653 | 0.030 | 2 | 0.2 | 1.2 | 160 | | |

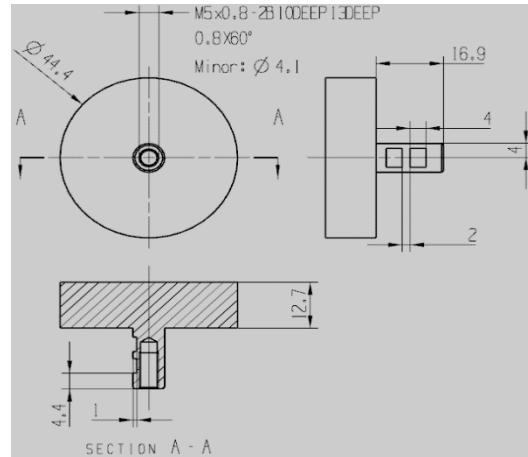
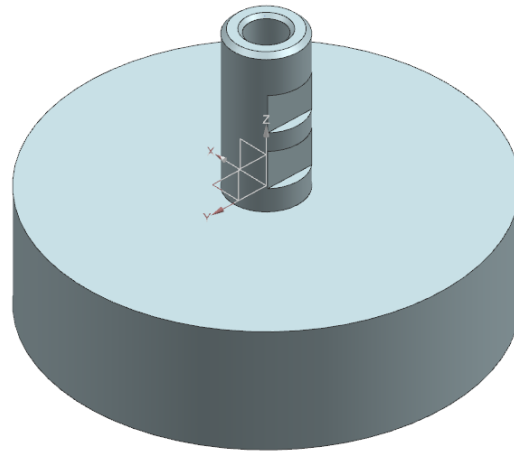
| | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-------------|-----------|----------------------|---------------------|--|
| TRABAJO DE GRADO | ENGRANAJE CÓNICO RECTO, DIENTES | | | | Fecha: 2/11/20 | |
| | | | | | Número de piezas: 1 | |
| ESCALA 1:1 | Material | Dimensiones | Reviso 1: | | | |
| | Acero AISI/SAE 4140 | | Reviso 2: | | | |
| | | | Realizo: | Juan David Vergara R | | |

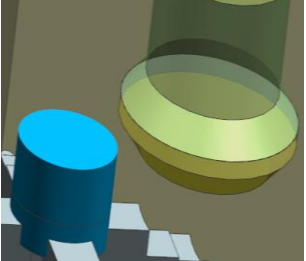
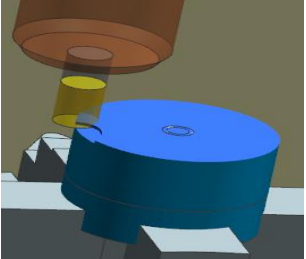


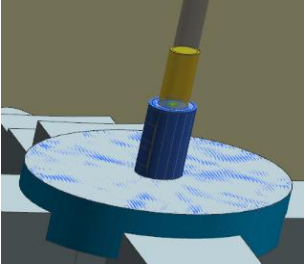
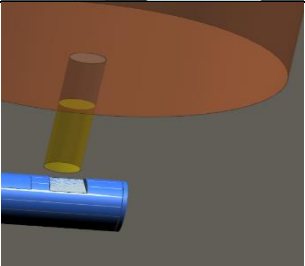
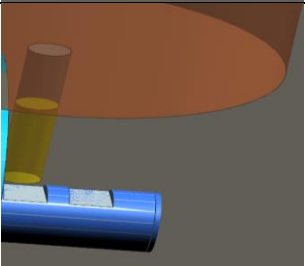
| # Op. | Descripción | Croquis | Pocket | Ø [mm] | Vc [m/min] | RPM | Fz [mm/t] | Z [t] | ap [mm] | ae [mm] | F [mm/min] | Kc [MPa] | Pc [kW] |
|-------|---------------------------|---|--------|--------|------------|------|-----------|-------|---------|---------|------------|----------|---------|
| 1 | Desbaste burdo de dientes |  | 2 | 3 | 30 | 3183 | 0.094 | 2 | 1 | 3 | 60 | | |
| 2 | Desbaste burdo de diente |  | 1 | 2 | 30 | 4775 | 0.007 | 2 | 1 | 3 | 70 | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---|---|---|----|------|-------|---|-----|------|-----|--|--|
| 3 | Desbaste burdo de diente |  | 3 | 1 | 14 | 4680 | 0.015 | 2 | 0.2 | 0.25 | 145 | | |
|---|--------------------------------|---|---|---|----|------|-------|---|-----|------|-----|--|--|

| | | | | | |
|------------------|---------------------|-------------|-----------|----------------------|--|
| TRABAJO DE GRADO | Sujetador | | | Fecha: 2/11/20 | |
| | | | | Número de piezas: 1 | |
| ESCALA 1:1 | Material | Dimensiones | Reviso 1: | | |
| | Acero AISI/SAE 4140 | | Reviso 2: | | |
| | | | Realizo: | Juan David Vergara R | |



| # Op. | Descripción | Croquis | Pocket | Ø [mm] | Vc [m/min] | RPM | Fz [mm/t] | Z [t] | ap [mm] | ae [mm] | F [mm/min] | Kc [MPa] | Pc [kW] |
|-------|-------------|---|--------|--------|------------|------|-----------|-------|---------|---------|------------|----------|---------|
| 1 | Refrentado |  | 1 | 60 | 633 | 3200 | 0.013 | 6 | 3 | 15 | 250 | | |
| 2 | Desbaste |  | 5 | 12,7 | 199 | 5000 | 0.008 | 6 | 1 | 3.8 | 199 | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|---|---|---|----|------|--------|----|---|---|-----|--|--|
| 3 | Taladrado |  | 2 | 5 | 43 | 2800 | 0.044 | 10 | 3 | - | - | | |
| 4 | Refrentado_1 |  | 4 | 4 | 34 | 2750 | 0.0109 | 4 | 1 | - | 120 | | |
| 5 | Refrentado_2 |  | 4 | 4 | 34 | 2750 | 0.0109 | 4 | 1 | - | 120 | | |