

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

SEBASTIÁN CAMILO CHACÓN VARGAS

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

SEBASTIÁN CAMILO CHACÓN VARGAS

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

Director

JORGE ANDRES GARCIA BARBOSA

Codirector

YAMID GONZALO REYES FLOREZ

Grupo de investigación GEAMEC

Semillero de investigación en Tecnologías Avanzadas de Manufactura - TAMA

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

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN:

X

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

X

FIRMA DEL JURADO

X

FIRMA DEL JURADO

Bogotá, 19/11/2019

DEDICATORIA

A mis padres:

Por enseñarme su infinidad de conocimientos y ser lo que soy hoy en día, sé que mis logros son porque ustedes me han inculcado todos los valores y el compromiso conmigo mismo a superarme cada vez incluyendo este logro para mi vida, gracias por el incondicional apoyo y motivación que me brindan cada vez para alcanzar mis metas.

A mis profesores:

A los profesores por tenerme paciencia, apoyarme y ser una guía para forjarme como profesional y como persona ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

A mis amigos:

Gracias a mis amigos por estar en los buenos y malos momentos, por escucharme y darme consejos durante este proceso de aprendizaje, que sin importar los obstáculos se superaron y se cumplió el anhelo de ser un Ingeniero Mecánico.

Para todas las personas que estuvieron y vieron como al transcurrir el tiempo me fui formando como profesional y como persona apoyándome con sus actos y palabras para culminar esta meta que me planteé.

AGRADECIMIENTOS:

Principalmente, quiero darle las gracias a mi padre quien me brindó su incondicional apoyo y sin él esto no hubiera sido posible, a mi familia por estar presente con su amor, soporte, comprensión y dedicación en las diferentes etapas de mi vida y durante este proceso de aprendizaje.

Al Ingeniero Jorge Andrés García Barbosa quien es mi director de tesis y al Ingeniero Yamid Gonzalo Reyes Flórez –codirector- por su paciencia, interés, orientación y aporte de conocimientos en el desarrollo del proyecto.

Al señor Iván Castro Santamaría por autorizar la práctica de metrología en las instalaciones del SENA, al señor Edgar Garzón y al Instructor Nicolás Ardila por su colaboración en dicha gestión.

Al señor Hugo Mora, Gerente General de la Industria Ramfe por su colaboración en la práctica de metrología en sus instalaciones.

A María Fernanda Mogollón que estuvo una gran parte de esta travesía apoyándome y animándome para seguir adelante sin importar las circunstancias.

Y a todas las demás personas quienes colaboraron para el desarrollo de este proyecto, mis más sinceros agradecimientos.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN	1
0. INTRODUCCION.....	2
1. OBJETIVO	3
1.1 GENERAL	3
1.2 ESPECÍFICOS	3
2. DIBUJO PARAMETRIZADO DE UN ENGRANAJE DE DIENTES RECTOS	4
2.1 GEOMETRÍA DEL ENGRANAJE.....	4
2.1.1 Curva de involuta.....	4
2.1.2 Parámetros de diseño del engranaje.....	6
2.1.3 Forma del diente del engranaje en función del número de dientes.....	6
2.1.4 Addendum modificado.....	8
2.2 PARAMETRIZACIÓN.....	8
2.2.1 Aplicativo en Excel®.....	9
2.2.2 Integración con NX®.....	15
2.2.3 Generación del engranaje de dientes rectos en NX®	15
2.2.4 Acelerador de dibujo NX®.....	18
2.2.5 Comparación geométrica de los engranajes del acelerador	21
2.2.6 Comparación geométrica de los engranajes del acelerador con el generado por la aplicación de Excel®.....	23
2.3 CONCLUSIONES DEL DIBUJO PARAMÉTRICO DE UN ENGRANAJE DE DIENTES RECTOS	24
3. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA EL MAQUINADO DE ENGRANAJES CILÍNDRICOS	26
3.1 RECURSOS DISPONIBLES.....	26
3.1.1 Máquina a utilizar	26
3.1.2 Copa de mordazas	27
3.1.3 Herramientas de corte	28

3.1.4	Software NX®	28
3.2	DISEÑO DISPOSITIVO DE SUJECIÓN	29
3.3	PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA	31
3.3.1	Preparación de la materia prima.....	31
3.3.2	Fabricación del dispositivo de sujeción	32
3.3.3	Tallado de los dientes del engranaje	33
3.3.4	Acabado del diente del engranaje	36
3.4	CONCLUSIONES DEL MONTAJE EXPERIMENTAL PARA EL MAQUINADO DE ENGRANAJES CILÍNDRICO.....	37
4.	VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ENGRANAJES	38
4.1	Verificación del montaje tecnológico	38
4.1.1	Montaje cuarto y quinto eje	38
4.1.2	Verificación de concentricidad	40
4.1.3	Compensación de las herramientas	41
4.2	Medición de engranajes y resultados	42
4.2.1	Métodos clásicos de medición	42
4.2.1.1.	Resultados metrología según los métodos clásicos.....	48
4.2.2	Proyector de perfil.....	49
4.2.2.1.	Resultados metrología proyector de perfil	51
4.2.3	Máquina escáner Karl Zeiss.....	52
4.2.3.1.	Resultados metrología Escáner Karl Zeiss.....	54
4.2.4	Máquina Hofler EMZ 1002	54
4.3	CONCLUSIONES DE LA VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ENGRANAJES	59
5.	RECOMENDACIONES	61
6.	BIBLIOGRAFÍA	62
Anexo A	Integración con NX®.....	63
Anexo B	Método de diseño de dibujo.....	68
Anexo C	Activación de acelerador de dibujo de NX®	77

Anexo D	Hojas de proceso mecanizado preparación materia prima.....	81
Anexo E	Hojas de proceso mecanizado preparación dispositivo de sujeción.....	84
Anexo F	Mecanizado trocoidal	89
Anexo G	Hojas de proceso mecanizado desbaste de la geometría.....	93
Anexo H	Hojas de proceso mecanizado acabado flancos y valle de la geometría generada desde Excel®	96
Anexo I	Hojas de proceso mecanizado acabado flancos y valle de la geometría del acelerador de NX®	98
Anexo J	Hojas de proceso mecanizado acabado del engranaje	100
Anexo K	Metrología máquina escáner Cimex S.A. (T-TRACK CS+).....	104
Anexo L	Informe metrología máquina Hofler EMZ 1002 (metrología Industrias RAMFE S.A.S.)	108

ÌNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Curva de involuta en Excel®	5
Figura 2.	Parámetros de diseño del engranaje	6
Figura 3.	Método de dibujo según el número de dientes	7
Figura 4.	Addendum modificado.....	8
Figura 5.	Espesor del engranaje y diámetro del eje	10
Figura 6.	Representación geométrica de la curva de involuta	12
Figura 7.	Representación de los puntos agrupados	14
Figura 8.	Perfil diente del engranaje parametrizado desde Excel®	15
Figura 9.	Engranaje generado a partir del método de diseño uno	16
Figura 10.	Engranaje generado a partir del método de diseño dos	17
Figura 11.	Engranajes generados por los cálculos de Excel®	18
Figura 12.	Selección de método de diseño del acelerador de NX®	19
Figura 13.	Engranaje diseñado por el acelerador de diseño con el método Hobbing	20
Figura 14.	Selección del método de diseño del acelerador de NX®	20
Figura 15.	Engranaje diseñado por el acelerador de diseño con el método Shaping	21
Figura 16.	Superposición de los engranajes generados a partir del acelerador de diseño	22
Figura 17.	Acercamiento del diente, en la sobreposición de los engranajes generados desde el acelerador de NX®	22
Figura 18.	Superposición de los engranajes del acelerador de diseño y el generado desde Excel®	23
Figura 19.	Acercamiento de diente, en la sobreposición de los engranajes generados desde la aplicación de Excel® y el acelerador de dibujo de NX®	24
Figura 20.	Centro de mecanizado Finetech GTX-210	27
Figura 21.	Tipos de mordazas	27
Figura 22.	Herramientas de geometría estándar del laboratorio de manufactura multieje.	28
Figura 23.	Pos procesador NX® (máquina virtual)	29
Figura 24.	Geometría a fabricar y materia prima base	30
Figura 25.	Dispositivo de sujeción manufacturado	31
Figura 26.	Adaptación de la materia prima del engranaje	32
Figura 27.	Dispositivo de sujeción manufacturado	33
Figura 28.	Medidas para la generación del cero de la pieza en cinco ejes	34
Figura 29.	Desbaste sobre material	35
Figura 30.	Acabado del valle y del flanco del engranaje.	36
Figura 31.	Acabado de los dientes de los engranajes.	37
Figura 32.	Comparador de carátula Vertex	39
Figura 33.	Nivelación de los ejes X y Y del dispositivo de cuarto y quinto eje	40
Figura 34.	Concentricidad de la pieza	41
Figura 35.	Compensación de la herramienta.....	42
Figura 36.	Metrología pie de rey digital engranajes con geometría obtenida desde Excel®	43

Figura 37.	Metrología pie de rey digital engranaje con geometría obtenida desde el acelerador de dibujo de NX®	43
Figura 38.	Pie de rey para engranajes	45
Figura 39.	Pie de rey para engranajes	46
Figura 40.	Metrología pie de rey para engranajes.....	47
Figura 41.	Proyector de perfil	49
Figura 42.	Metrología proyectora de perfil	50
Figura 43.	Scanner Karl Zeiss (T-TRACK CS+)	52
Figura 44.	Resultados metrología escáner Karl Zeiss (T-TRACK CS+)	53
Figura 45.	Máquina Hofler EMZ 1002.....	55
Figura 46.	Resultados metrología curva de involuta en la máquina Hofler EMZ1002	56
Figura 47.	Resultados metrología flancos del engranaje en la máquina Hofler EMZ 1002.....	57
Figura 48.	Resultados metrología medición de desviación y centricidad del engranaje en la máquina Hofler EMZ 1002	58
Figura 49.	Barra de menú de NX®	64
Figura 50.	Herramienta de parametrización de NX®	64
Figura 51.	Menú de funciones de NX®	65
Figura 52.	Menú de parametrización de NX® a Excel®	66
Figura 53.	Configuración de la variable de entrada a NX®	67
Figura 54.	Generación de diámetros del engranaje método uno	68
Figura 55.	Generación de la curva de involuta en NX®	69
Figura 56.	Flanco y valle del diente en NX®	70
Figura 57.	Perfil del diente en NX®	71
Figura 58.	Extrusión del diente y juego de cabeza	72
Figura 59.	Generación del engranaje en NX®	72
Figura 60.	Generación de diámetros del engranaje método dos	73
Figura 61.	Generación de la curva de involuta en NX®	74
Figura 62.	Extrusión del diente del engranaje	75
Figura 63.	Generación del engranaje con el método dos	76
Figura 64.	Selección de método de diseño en Excel® según el número de dientes	76
Figura 65.	Configuración computador (panel de control).....	77
Figura 66.	Configuración computador (ajustes del sistema).....	78
Figura 67.	Configuración computador (ajustes avanzados del sistema)	78
Figura 68.	Configuración computador (variables del entorno).....	79
Figura 69.	Configuración variable de entrono para la activación del acelerador de NX®	79
Figura 70.	Mecanizado Trocoidal	89
Figura 71.	Ecuaciones de configuración mecanizado trocoidal NX®	90
Figura 72.	Configuración mecanizado trocoidal NX®	91
Figura 73.	Configuración mecanizado trocoidal NX®	92
Figura 74.	Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta recta	104
Figura 75.	Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta cónica	105
Figura 76.	Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta redonda.....	106

**Figura 77. Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta redonda geometría del
acelerador de dibujo..... 107**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros dimensionales engranaje recto	9
Tabla 2.	Cálculos puntos diámetro eje	10
Tabla 3.	Agrupación de puntos para coordenadas	11
Tabla 4.	Parámetros dimensionales de la curva de involuta	11
Tabla 5.	Cálculos puntos del valle	13
Tabla 6.	Agrupación de puntos para coordenadas	13
Tabla 7.	Resultados metrología pie de rey	44
Tabla 8.	Resultados metrología pie de rey para engranajes	48
Tabla 9.	Resultados metrología proyector de perfil (desviación)	50
Tabla 10.	Resultados metrología escáner Karl Zeiss (T-TRACK CS+)	53
Tabla 11.	Resultados de metrología de calidad según la norma DIN 3960 y DIN 3964 en la máquina Hofler EMZ 1002	58
Tabla 12.	Hoja de procesos preparación de materia prima	81
Tabla 13.	Hoja de procesos dispositivo de sujeción	84
Tabla 14.	Hoja de procesos desbaste de la geometría	93
Tabla 15.	Hoja de procesos acabado flancos y valle de la geometría generado desde Excel®	96
Tabla 16.	Hoja de procesos acabado flancos y valle de la geometría del acelerador de NX®	98
Tabla 17.	Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.1	100
Tabla 18.	Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.2	101
Tabla 19.	Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.3	102
Tabla 20.	Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.4	103

RESUMEN

El proceso de generación de engranajes de dientes rectos basados en la curva de involuta y en los parámetros de la norma DIN 3962, inició con la parametrización del programa NX® a través de una hoja de Excel®. Se aceleró el proceso de dibujo automatizando los cálculos basados en el módulo, en el número de dientes y en el ángulo de presión. Se dibujó un engranaje con la aplicación de acelerador de dibujo de Excel® y un engranaje desde el acelerador de dibujo integrado en el software NX®. Posteriormente se planificó y ejecutó el proceso de manufactura para la obtención de los engranajes, en el centro de mecanizado FINETECH GTX-210 de la Universidad Santo Tomás, haciendo uso de herramientas estándar de punta plana, de punta esférica y de punta cónica. Finalmente se realizó el proceso de metrología con métodos tradicionales, con escáner óptico Karl Zeiss® referencia T-TRACK CS+ del SENA y con la máquina Hofler EMZ 1002 de la empresa RAMFÉ, bajo las normas DIN 3960 y 3964. Para la geometría obtenida por medio del acelerador de dibujo de Excel® se obtuvo una calidad AGMA de grado 8, lo que permitió concluir que el proceso de mecanizado de engranajes de dientes rectos, en centros de mecanizado de propósito general, es viable. Para la geometría obtenida en el acelerador de dibujo de NX®, la calidad de los engranajes disminuyó considerablemente.

0. INTRODUCCIÓN

Los engranajes son componentes mecánicos utilizados para transmitir potencia de un eje a otro en una máquina o mecanismo. Cuando dos engranajes están cinemáticamente acoplados, el mayor se denomina engrane y el menor piñón. Una de las aplicaciones más importantes de los engranajes es la transmisión del movimiento desde el eje de una fuente de energía, como puede ser un motor de combustión interna o un motor eléctrico, hasta otro eje situado a cierta distancia y que ha de realizar un trabajo[1]. Los engranajes cilíndricos de dientes rectos son aquellos donde todas las características geométricas de sus dientes son paralelas al eje que lo soporta, su función principal es transmitir potencia entre ejes paralelos [2].

Los métodos para su fabricación son principalmente: el fresado con herramienta modular, la generación por fresa madre y el brochado con herramienta de forma; todos ellos hacen uso de herramientas o máquinas especializadas para la ejecución del proceso. A manera de ejemplo, el método de fresado tangencial es uno de los más empleados. Utiliza una fresa de disco estandarizada denominada fresa de módulo. Al terminar el proceso de fresado lineal de un diente, la fresa vuelve a su posición inicial y la materia prima es rotada el ángulo apropiado, para el tallado de un nuevo diente [3]. La principal desventaja de este procedimiento es que se necesita una fresa distinta para cada combinación de módulo y número de dientes. Como es muy difícil tener un juego de fresas de módulo para cada caso, además de su precio y rapidez con la que se desgastan, obliga a recurrir a una cierta inexactitud en el tallado, pues se emplea una misma fresa de módulo para ruedas con un número de dientes cercano a aquel para el que está diseñada la fresa[4].

En la actualidad es posible obtener engranajes cilíndricos de dientes rectos mediante las máquinas de control numérico, para lo cual, es necesario conocer a profundidad las características geométricas del componente a manufacturar para reproducirlo inicialmente en un programa CAD [5]. No obstante, se ha reconocido la presencia de fallas geométricas a la hora de manufacturar engranajes cilíndricos de dientes rectos, debido a que algunos aceleradores de dibujo generan la curva de involuta como una aproximación de arcos tangentes.

En el presente trabajo se muestra la comparación de la geometría obtenida, por medio del proceso de fresado de control numérico, en una máquina de propósito general, utilizando herramientas estándar de punta plana, de punta cónica y de punta esférica. Las geometrías CAD fueron obtenidas por medio de un dibujo paramétrico basado en la ecuación de la curva de involuta y de un acelerador de dibujo integrado en el programa NX.

1. OBJETIVO

1.1 GENERAL

Analizar las diferencias geométricas en el proceso de manufactura de un engranaje de dientes rectos generados por el acelerador de diseño de un software CAD y el diseñado por la curva paramétrica.

1.2 ESPECÍFICOS

- Establecer la geometría de un engranaje de dientes rectos por medio de un acelerador de diseño de un software CAD y por medio de las ecuaciones paramétricas.

- Planificar el proceso de manufactura en una máquina de control numérico con herramienta de punta esférica.

- Realizar un montaje experimental para el maquinado de los engranajes cilíndricos de dientes rectos.

- Verificar la geometría de los engranajes cilíndricos de dientes rectos manufacturados por medio de normas DIN 3960 Y DIN 3964.

2. DIBUJO PARAMETRIZADO DE UN ENGRANAJE DE DIENTES RECTOS

Para el estudio de la geometría de los engranajes de dientes rectos se desarrolló un aplicativo en Excel®, el cual contiene todos los cálculos asociados a la geometría del engranaje [5] y funciona como acelerador de diseño al enlazarse con el programa NX®. Los datos de entrada para la aplicación son el módulo (M), el número de dientes (Z) y el ángulo de presión (AP).

Durante el proceso de dibujo, se observó que la morfología del diente del engranaje variaba en función del número de dientes, lo cual explica porque se venden diferentes fresas modulares de acuerdo con el número de dientes a tallar, para la manufactura de engranajes de un mismo módulo. Además, se observó que la morfología del diente del engranaje puede ser alterada por el coeficiente de addendum modificado, con el objeto de darle mayor resistencia mecánica [5].

2.1 GEOMETRÍA DEL ENGRANAJE

Los engranajes de dientes rectos poseen una geometría muy comprensible en su diseño y fabricación que brindan una buena relación de velocidad constante entre ellos, no generan un empuje axial debido a que la superficie de contacto es paralela a su eje axial.

Por otro lado, estos engranajes son restringidos en su uso por la limitación de velocidad que pueden generar y en algunos casos se vuelven ruidosos si no se tiene una buena lubricación o si se operan en altas velocidades. En comparación con los otros tipos de engranajes este genera una mayor vibración y su resistencia es menor [2].

Para la manufactura de este tipo de engranajes, se estableció una geometría básica bajo los parámetros de la norma DIN 3960 [5] con un número de dientes de 13, un módulo de 5.5 y un ángulo de presión de 20 grados; bajo estos parámetros se establecieron los cálculos y dimensionamiento geométrico para el proceso de manufactura permitiendo el uso de herramientas estándar (fresas frontales de punta plana y punta esférica) de tamaño rígido.

2.1.1 Curva de involuta

La curva de involuta, es aquella geometría del diente del engranaje que se encarga de hacer contacto entre cada uno de los dientes de un engranaje denominados como par de engranajes, garantizando que la velocidad del eje conducido sea constante, sin la presencia de esta geometría los engranajes no quedan correctos y presentan fallas mecánicas, puesto que no tendrían un correcto funcionamiento ni soportarían los esfuerzos aplicados, para minimizar dichas fallas se establecieron las ecuaciones paramétricas (2-1) (2-2) [6]. Donde r es el radio de desenvolvimiento de la curva de involuta o radio del círculo primitivo, θ es el ángulo de rotación y X y Y los ejes del sistema cartesiano ubicados en el centro de rotación del engranaje, como se observa en la Figura 1.

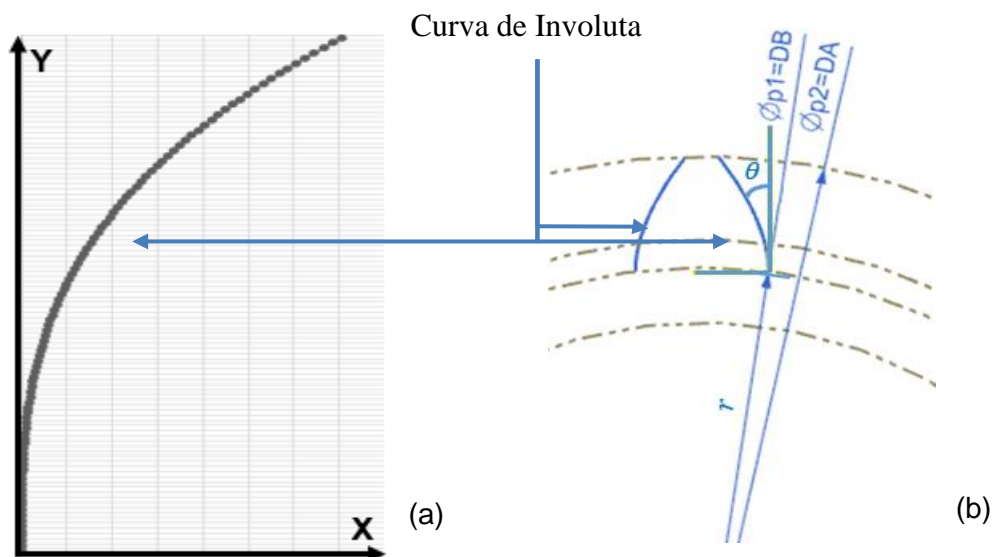
$$X = r(\cos \theta + \theta * \text{sen } \theta) \quad (2-1)$$

$$Y = r(\text{sen } \theta - \theta * \cos \theta) \quad (2-2)$$

Ecuación 1: Ecuaciones paramétricas (Curva de Involuta)

Establecidas las variables, se identificó el funcionamiento de las ecuaciones (2-1) (2-2) en el programa Excel® con un valor de radio ($r = \text{diámetro base (DB)}$) y un ángulo θ empezando en 0 y aumentado los grados de tal forma que la línea de la curva de involuta llega hasta el diámetro externo (DA) como se muestra en la Figura 1 (a). La Figura 1 (b) muestra la curva de involuta obtenida en el programa NX®.

Figura 1. Curva de involuta en Excel®

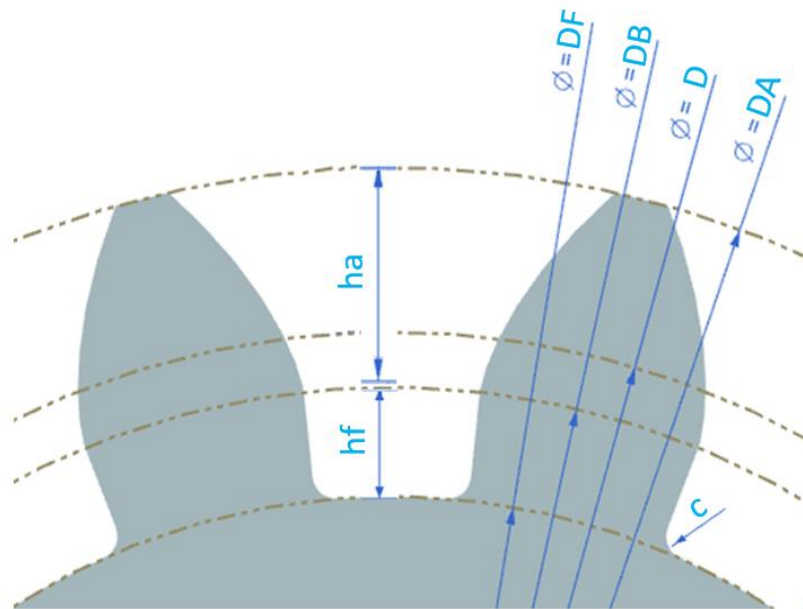


Fuente: Autor

2.1.2 Parámetros de diseño del engranaje

La geometría de los engranajes de dientes rectos están restringidos por diferentes medidas como es el diámetro base (DB) que para este caso de estudio es el más importante, ya que es el punto donde nace la curva de involuta y crece hasta al diámetro externo (DA) cuya función es limitar el dimensionamiento del diente, también se encuentra el diámetro de raíz (DF) donde nace dedendum (hf) o también conocido como flanco, así mismo se tiene el radio de la cabeza (c) que es la diferencia entre el dedendum (hf) y el addendum (ha), por último se tiene el diámetro primitivo que es la generación de contacto tangencial entre los dientes de los engranajes [1]. Todas estas restricciones de diseño se pueden ver en la Figura 2 cuyas medidas finales se obtienen por cálculos.

Figura 2. Parámetros de diseño del engranaje



Fuente: Autor

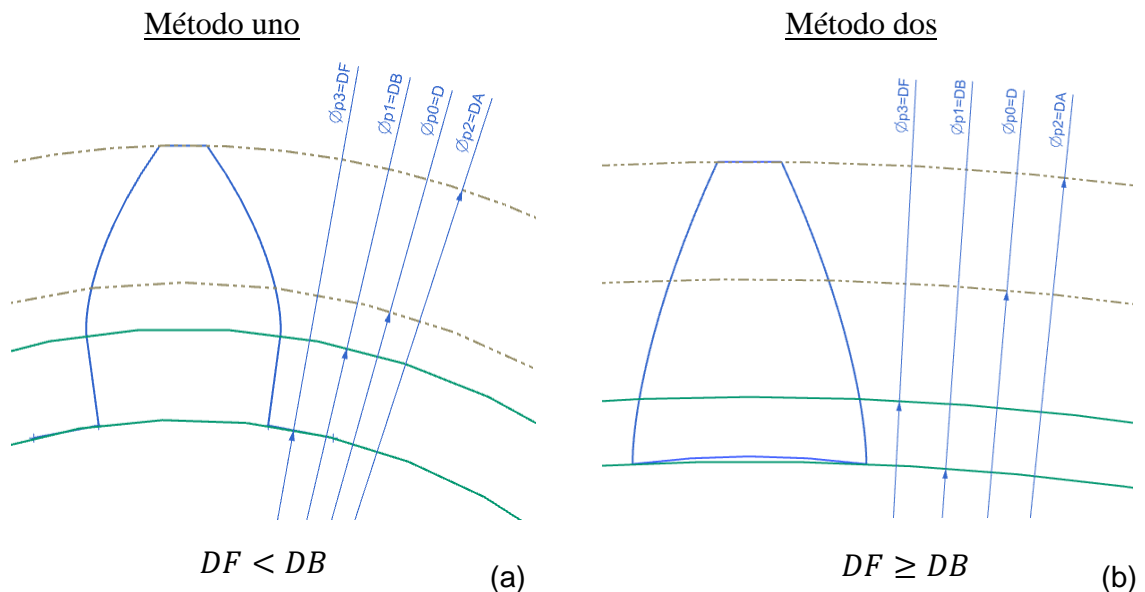
2.1.3 Forma del diente del engranaje en función del número de dientes

Como se mencionó anteriormente, el diseño del engranaje está restringido por ciertos valores acotados como se ve en la Figura 2, pero estas cotas se pueden alterar dependiendo de la cantidad de número de dientes del engranaje en un determinado módulo lo cual categorizó

en dos métodos de dibujo para los engranajes de dientes rectos, generando en cada uno características diferentes con base en la geometría.

1. Método uno: Este método es cuando el diámetro de raíz (DF) es menor que el diámetro base (DB) lo cual genera un método de dibujo con un dedendum (hf) visible como un segmento de recta y un juego de cabeza (c), como un arco tangente entre el diámetro de raíz (DF) y la línea de dedendum (hf) como se ve en la Figura 3(a) donde se utilizó un módulo de 5.5, un ángulo de presión de 20° y un número de dientes de 13.
2. Método dos: Este método es cuando el diámetro de raíz (DF) es mayor o igual al diámetro base (DB) lo cual cambia el dimensionamiento de las cotas con respecto a estas dos, generando una forma de dibujo sin la presencia de un dedendum (hf), lo cual genera un juego de cabeza (c) como un arco tangente entre la curva de involuta y el diámetro de raíz (DF) como se ve en la Figura 3 (b), para este caso se configuró el engranaje con un módulo de 5.5, un ángulo de presión de 20° y un número de dientes de 60.

Figura 3. Método de dibujo según el número de dientes

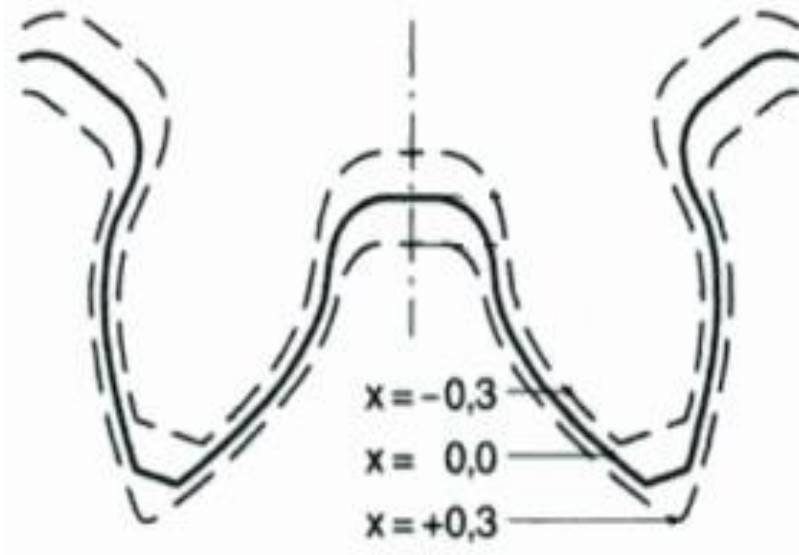


Fuente: Autor

2.1.4 Addendum modificado

El addendum modificado puede ser cambiado sin implicar el método de diseño según la norma DIN 3960, estos valores pueden estar entre -0.3 hasta 0.3, lo cual modifica la longitud del diente [5], la medida del dedendum (h_f) y el juego de cabeza (c) como se ve en la Figura 4; al generar un engranaje con el valor menor del addendum se obtendría un engranaje con una resistencia mucho mayor que los demás ya que la concentración de esfuerzos en el juego de cabeza (c) van a ser menores.

Figura 4. *Addendum modificado*



Fuente: [5]

2.2 PARAMETRIZACIÓN

La parametrización del programa NX® desde Excel® se hizo con el fin de generar un acelerador de dibujo, el cual, al cambiar los valores en Excel® y al actualizar las variables de NX® automáticamente generará los resultados pertinentes para la generación de un engranaje de dientes rectos.

2.2.1 Aplicativo en Excel®

Se generó una hoja de Excel® con la finalidad de utilizarla como aplicativo para el cálculo de la geometría de engranajes de dientes rectos, se dividió en cinco partes diferentes para la construcción de la geometría del engranaje.

- 1) Parámetros (*Parameters*): Es la parte del Excel® que se encarga de establecer las medidas de los diámetros del engranaje, el addendum, el dedendum y el radio del juego de cabeza, lo que determina el dimensionamiento de la pieza; esto es calculado por medio de las ecuaciones mostradas en la Tabla 1 con base en los datos de entrada (el número de dientes, el módulo y el ángulo de presión).

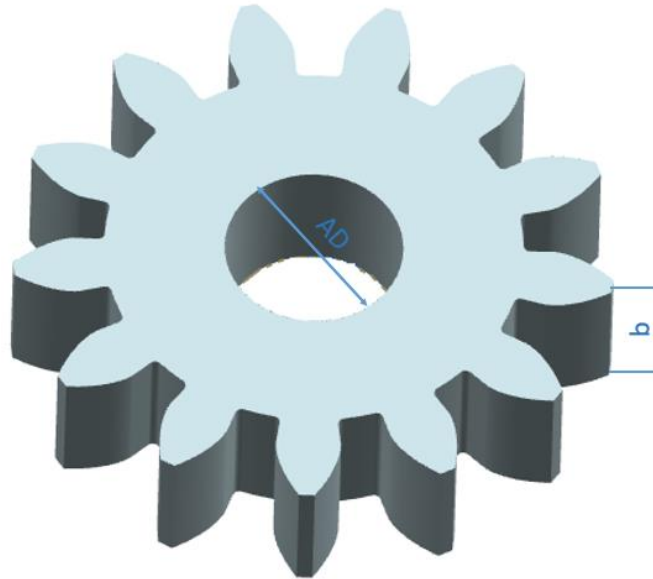
Tabla 1. *Parámetros dimensionales engranaje recto*

SÍMBOLO	GEOMETRÍA	ECUACIÓN
d	PITCH CIRCLE	$= m * z$
h_a	ADDENDUM	$= m$
h_f	DEDENDUM	$= 1.167 * m$
c	FILLET	$= h_f - h_a$
d_a	OUTSIDE OR ADDENDUM CIRCLE	$= (d + 2xm + 2hfp * m)$
d_b	BASE CIRCLE	$= m * z * \cos(ap)$
d_f	ROOT CIRCLE	$= (d + 2xm - 2hfp * m)$
pa	PITCH ANGLE	$= 360/z$

Fuente: [5]

- 2) Ancho del engranaje (*face width*): Al generar un complemento de aplicación como ésta, el ancho del engranaje se parametrizó con base en lo establecido en la norma DIN 3960 [5] como se puede ver en la Figura 5.
- 3) Diámetro del eje (*shaft diameter*): Es la medida para la generación de un agujero por donde pasará el eje para su manufactura y posteriormente para su funcionamiento, representado con las siglas (AD) como se puede ver en la Figura 5.

Figura 5. *Espesor del engranaje y diámetro del eje*



Fuente: Autor

Para poder establecer el agujero del diámetro del eje es necesario generar unos puntos como se ven en la Tabla 2, los cuales servirán como guía para establecer la diferencia entre el diámetro del agujero (AD) y el diámetro de raíz (DF) y posteriormente serán reagrupados para establecerlos en el programa por medio de coordenadas como se ve en la Tabla 3.

Tabla 2. *Cálculos puntos diámetro eje*

SÍMBOLO	GEOMETRÍA	ECUACIÓN
$P1DX$	PUNTO 1 LADO DERECHO EN X	$\left(\frac{AD}{2}\right) * \text{SENO}(ANDTE)$
$P1DY$	PUNTO 1 LADO DERECHO EN Y	$\left(\frac{AD}{2}\right) * \text{COS}(ANDTE)$
$P2IX$	PUNTO 2 LADO DERECHO EN X	$\left(\frac{AD}{2}\right) * \text{SENO}(ANDTE)$
$P2IY$	PUNTO 2 LADO DERECHO EN Y	$\left(\frac{AD}{2}\right) * \text{COS}(ANDTE)$

Fuente: Autor

Tabla 3. Agrupación de puntos para coordenadas

PUNTO	COORDENADA EN X	COORDENADA EN Y
<i>PAD_1_D</i>	<i>P1DX</i>	<i>P1DY</i>
<i>PAD_2_I</i>	<i>P2IX</i>	<i>P2IY</i>

Fuente: Autor

Para la construcción del engranaje en la aplicación de Excel® como función de acelerador de diseño y con los datos anteriores como datos de entrada, se generan diferentes secciones para la generación geométrica del engranaje por medio de filas y a su vez respetando las restricciones del programa NX®.

- 4) Diente (*teeth*): En esta parte de la hoja de Excel® se encuentran los cálculos de la curva de involuta restringida por los resultados de los cálculos de la Tabla 1 y los factores que influyen directamente en ella, para determinar su longitud, posición y forma, se usan las ecuaciones de la Tabla 4 que se encuentran en Excel®, lo cual genera una geometría como la que se muestra en la Figura 6.

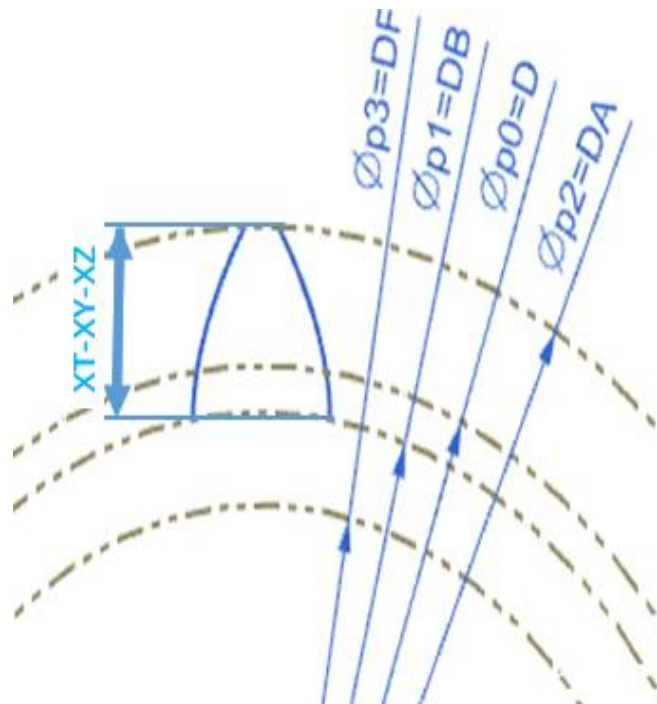
Tabla 4. Parámetros dimensionales de la curva de involuta

SÍMBOLO	GEOMETRÍA	ECUACIÓN
<i>T</i>	PARÁMETRO	1
<i>XT</i>	ECUACIÓN CURVA DE INVOLUTA EN X	$R(\cos(\theta) + \theta * \sin(\theta))$
<i>YT</i>	ECUACIÓN CURVA DE INVOLUTA EN Y	$R(\sin(\theta) - \theta * \cos(\theta))$
<i>ZT</i>	ECUACIÓN CURVA DE INVOLUTA EN Z	0
<i>NOV</i>	NÚMERO DE VUELTAS	1
<i>ANGR</i>	ÁNGULO EN GRADOS	$(HL2R2G * T * NOV)$
<i>ANRA</i>	ÁNGULO EN RADIANES	$\frac{(HL2R2G * \pi)}{180 * T}$
<i>HL2R2G</i>	HIPOTENUSA LARGA A RADIANES Y A GRADOS	$\frac{\sqrt{\left(\frac{DA}{2}\right)^2 - \left(\frac{DB}{2}\right)^2}}{\frac{DB}{2}}$ $\frac{DB}{\pi * 180}$
<i>ANFULL</i>	ÁNGULO COMPLETO	360

<i>ANDTE</i>	ÁNGULO DEL DIENTE	$\left(\frac{ANFULL}{Z * 2}\right)$
<i>HC2R2G</i>	HIPOTENUSA CORTA A RADIANTES Y A GRADOS	$\frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{DB}{2}\right)^2}}{\left(\frac{DB}{2}\right)}$ $\frac{\pi * 180}{\pi * 180}$
<i>ANLNI</i>	ÁNGULO DONDE INICIA LA CURVA DEL DIENTE	$(ANDTE/2) + (HC2R2G - AP)$

Fuente: [6]

Figura 6. Representación geométrica de la curva de involuta



Fuente: Autor

- 5) Flanco (fillet): Este segmento, se encarga de calcular los puntos para el posicionamiento y la generación de los flancos y el valle del diente como se ve en la Figura 7. Los puntos se calcularon con las ecuaciones mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculos puntos del valle

SÍMBOLO	GEOMETRÍA	ECUACIÓN
$P1DX$	PUNTO 1 LADO DERECHO EN X	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{SENO}(ANLNI)$
$P1DY$	PUNTO 1 LADO DERECHO EN Y	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{COS}(ANLNI)$
$P2DX$	PUNTO 2 LADO DERECHO EN X	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{SENO}(ANDTE)$
$P2DY$	PUNTO 2 LADO DERECHO EN Y	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{COS}(ANDTE)$
$P1IX$	PUNTO 1 LADO IZQUIERDO EN X	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{SENO}(ANLNI) * (-1)$
$P1IY$	PUNTO 1 LADO IZQUIERDO EN Y	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{COS}(ANLNI)$
$P2IX$	PUNTO 2 LADO IZQUIERDO EN X	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{SENO}(ANDTE) * (-1)$
$P2IY$	PUNTO 2 LADO IZQUIERDO EN Y	$\left(\frac{DF}{2}\right) * \text{COS}(ANDTE)$

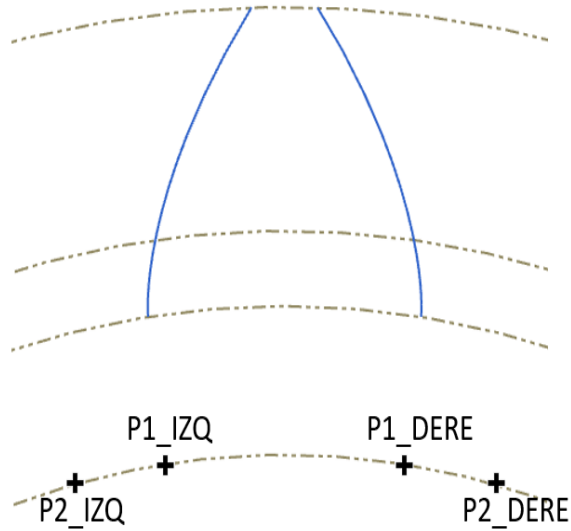
Fuente: [6]

Tabla 6. Agrupación de puntos para coordenadas

PUNTO	COORDENADA EN X	COORDENADA EN Y
$P1_IZQ$	$P1IX$	$P1IY$
$P2_IZQ$	$P2DY$	$P2IY$
$P1_DERE$	$P1DX$	$P1DY$
$P2_DERE$	$P2DX$	$P2DY$

Fuente: Autor

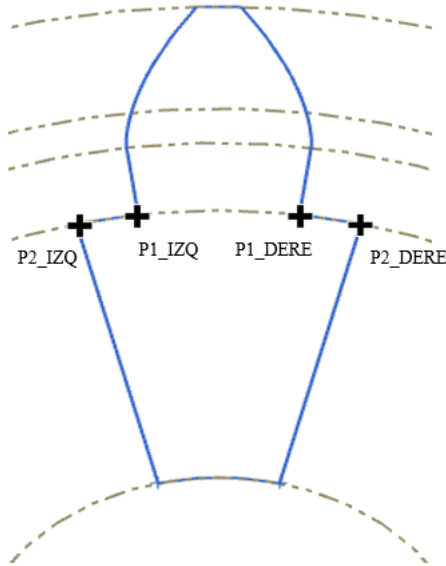
Figura 7. Representación de los puntos agrupados



Fuente: Autor

Después de tener los puntos y las líneas de la curva de involuta como se puede ver en la Figura 7, se unen por medio de líneas rectas los puntos del diámetro del eje a los puntos P2_IZQ Y P2_DERE; posteriormente, se unen los puntos P1_IZQ Y P1_DERE con las líneas de la curva de involuta. Para finalizar, el dibujo del diente del engranaje y cerrar el perfil de la geometría se une por medio de líneas de arco con origen en $X=0$ $Y=0$ P2_IZQ, con P1_IZQ y P2_DERE, con P1_DERE y de esta misma forma se unen los extremos superiores de la curva de involuta que se encuentran en el diámetro externo (DA), obteniendo una geometría del diente del engranaje con las propiedades de la curva de involuta como se ve en la Figura 8.

Figura 8. Perfil diente del engranaje parametrizado desde Excel®



Fuente: Autor

2.2.2 Integración con NX®

Una vez desarrollado el aplicativo en Excel® y funcionando para diferentes configuraciones de número de dientes (Z), módulo (M) y ángulos de presión (AP), se integró con el programa NX®; de tal forma que, al variar los datos en la aplicación, el modelado en el programa NX® se actualizará según los resultados de los cálculos, dando la posibilidad de obtener el engranaje sin la necesidad de dibujar cada engranaje desde el inicio. El detalle de la integración se muestra en el Anexo A.

2.2.3 Generación del engranaje de dientes rectos en NX®

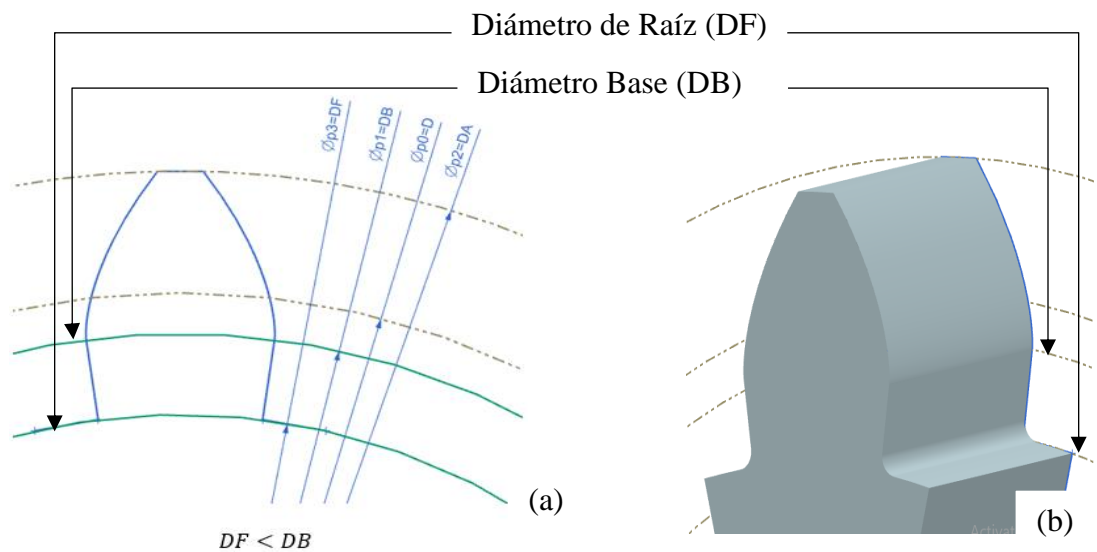
Después de generar la aplicación para la integración de Excel® con NX® (apartado 2.2.2), se obtiene el dibujo del engranaje de dientes rectos de forma automática. Al realizar varias pruebas al aplicativo, se encontró que cuando el diámetro de raíz se hace mayor que el

diámetro de base, la geometría del diente del engranaje varía considerablemente, obligando a la generación de dos métodos de dibujo diferentes.

MÉTODO DE DIBUJO UNO:

El método de diseño de dibujo uno se utiliza cuando el número de dientes del engranaje es reducido, lo que genera en el croquis de dibujo como se ve en la Figura 9 (a) donde el diámetro de raíz (DF) es el diámetro más pequeño, seguido del diámetro base (DB), generando un engranaje conformado por curva de involuta, flancos, valle y radio formado por las dos últimas geometrías como se ve en la Figura 9 (b); el proceso de generación del engranaje se puede consultar en el Anexo B.

Figura 9. Engranaje generado a partir del método de diseño uno



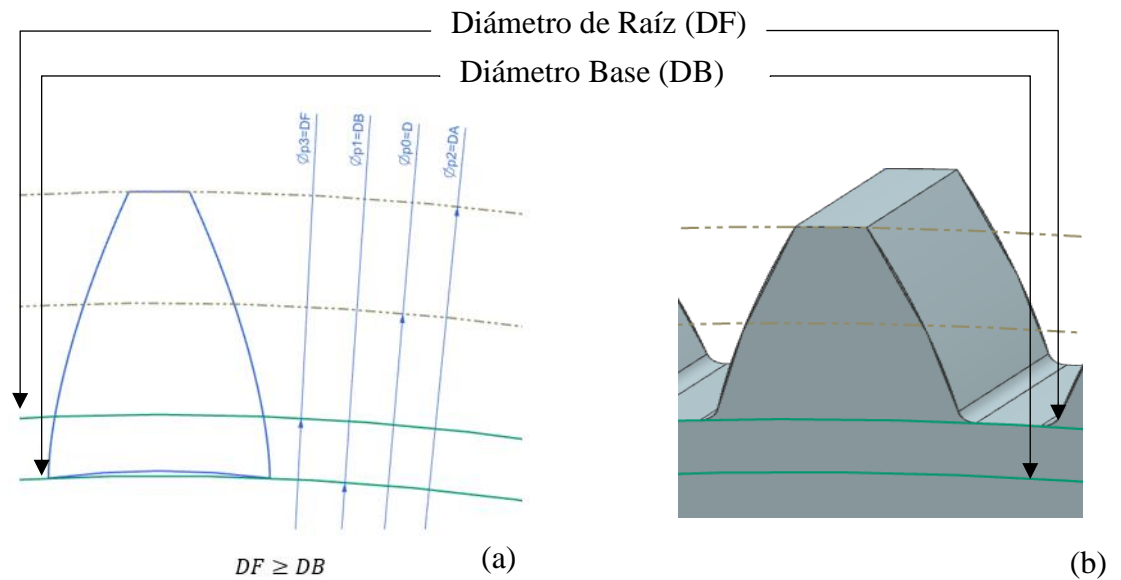
Fuente: Autor

MÉTODO DE DIBUJO DOS:

El método de diseño de dibujo dos se utiliza cuando el número de dientes es grande para un determinado módulo, lo que genera en el croquis una traslación del diámetro base (DB) y diámetro de raíz (DF) como se ve en la Figura 10(a) generando un engranaje conformado por la curva de involuta, valle y un radio formado por estos dos sin la presencia de flancos,

obteniendo un engranaje con propiedades geométricas diferentes al método uno como se ve en la Figura 10(b); el proceso para la generación del engranaje se puede consultar en el Anexo B.

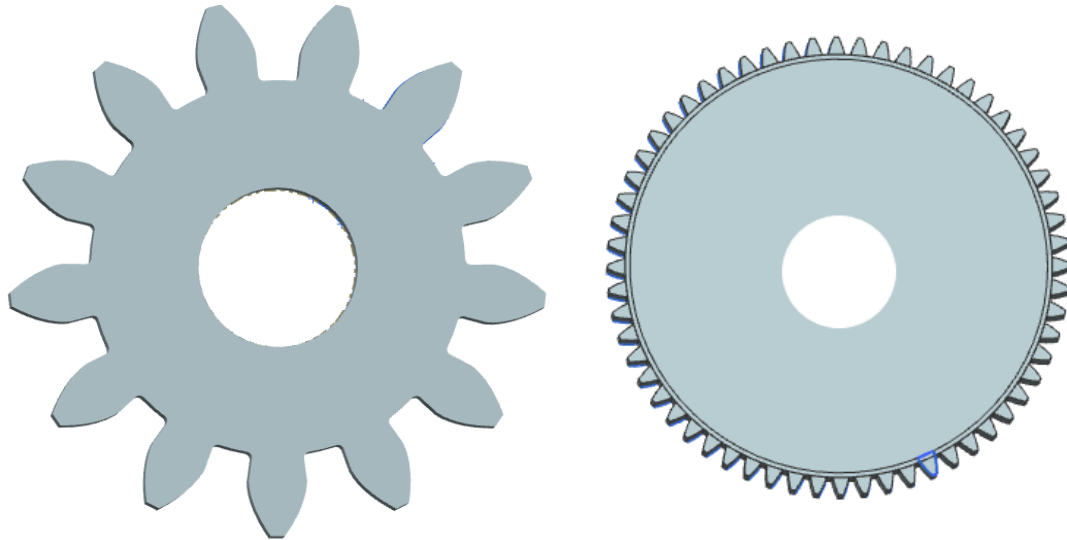
Figura 10. Engranaje generado a partir del método de diseño dos



Fuente: Autor

Al tener la aplicación de Excel® configurado para generar cualquier tipo de engranaje de dientes rectos bajo los parámetros de entrada como son el número de dientes, módulo, ángulo de presión, diámetro del eje y espesor del engranaje se puede obtener cualquier tipo de engranajes como se ve en la Figura 11.

Figura 11. Engranajes generados por los cálculos de Excel®



Fuente: Autor

2.2.4 Acelerador de dibujo NX®

Para poder generar un engranaje por medio del acelerador de diseño del programa NX®, primero se debe habilitar el complemento de aceleradores de diseño. (Ver explicación en el Anexo C).

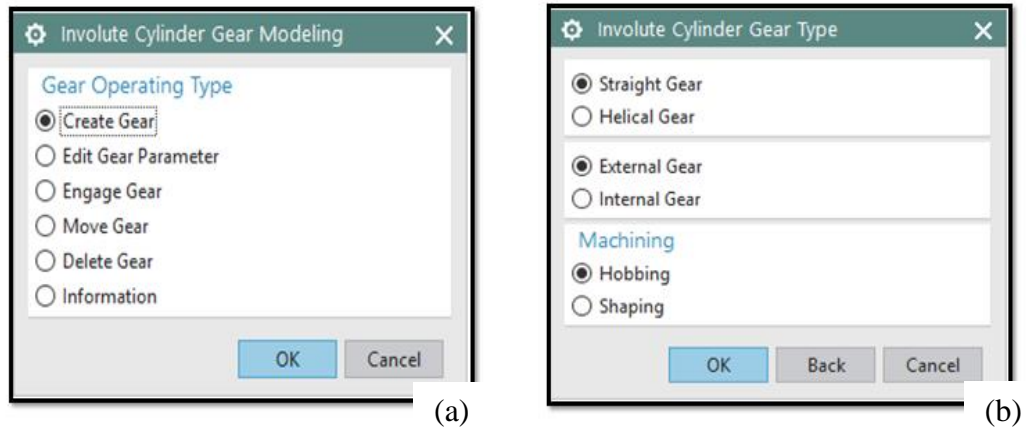
Una vez activada la herramienta complementaria de acelerador de diseño del programa NX®, solo queda generar los engranajes de dientes rectos, con la cualidad que este acelerador genera dos tipos de engranajes según el proceso de manufactura.

METODO 1= HOBGING

- 1) En la parte superior de las herramientas de NX® encontramos la función para crear engranajes. Al activar la función aparece una ventana que permite la creación, como se ve en la Figura 12 (a); en la siguiente ventana que se abre se selecciona el tipo de

engranaje a fabricar, en este caso engranaje de dientes rectos con dientes externos y el proceso de manufactura *Hobbing* (Generación) como se ve en la Figura 12 (b)

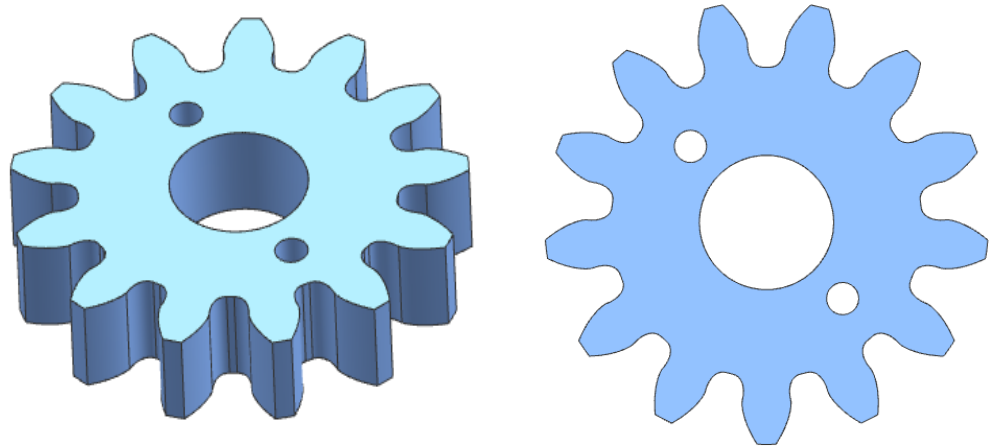
Figura 12. Selección de método de diseño del acelerador de NX®



Fuente: Autor

- 2) El objetivo principal es hacer una comparación geométrica, es por ello que se utilizaron los mismos parámetros usados en el engranaje que se desarrolló por medio del aplicativo de Excel®: Módulo ($M=5.5$ mm), número de dientes ($Z=13$), ancho de cara ($b=15$ mm) y ángulo de presión ($AP=20^\circ$), con un modelado de precisión del engranaje alto, lo que permitirá una mejor calidad en la geometría. Se obtuvo la geometría mostrada en la Figura 13.

Figura 13. Engranaje diseñado por el acelerador de diseño con el método Hobbing

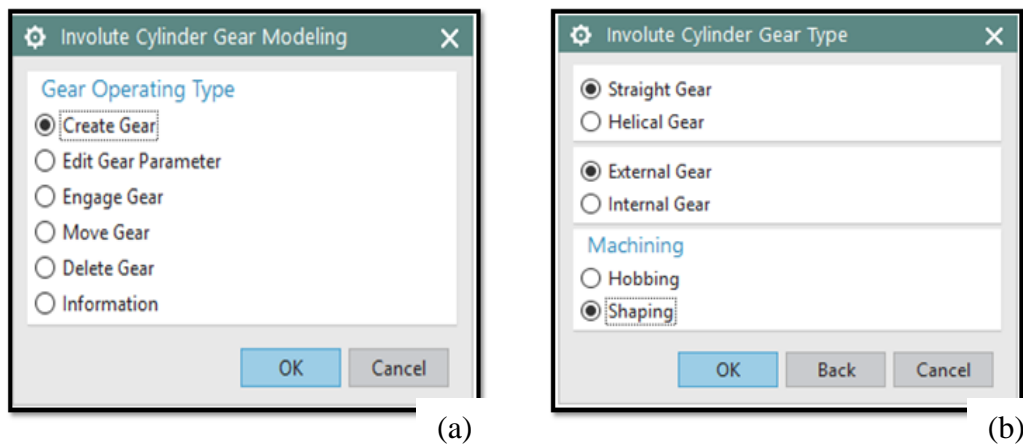


Fuente: Autor

METODO 2= SHAPING

- 1) Repitiendo el procedimiento anterior, se seleccionó para el engranaje a fabricar: dientes rectos, dientes externos y proceso de manufactura *Shaping* (brochado) como se ve en la Figura 14 (b).

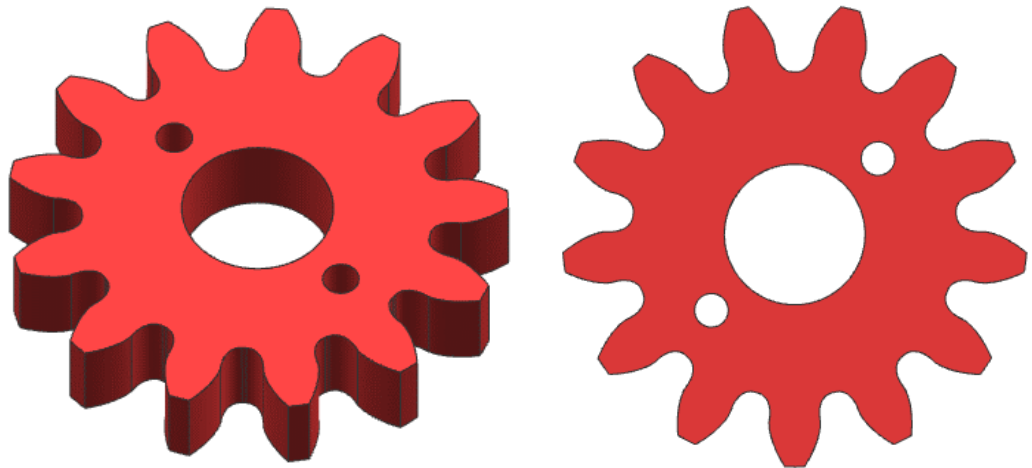
Figura 14. Selección del método de diseño del acelerador de NX®



Fuente: Autor

- 2) Una vez más se utilizaron los mismos parámetros: Módulo ($M=5.5$ mm), número de dientes ($Z=13$), ancho de cara ($b=15$ mm) y ángulo de presión ($AP=20^\circ$). Con un valor de número de dientes de la fresa madre de 39, sin addendum modificado y un modelado de precisión del engranaje alto, lo que permitirá una mayor calidad en la geometría del engranaje, obteniendo un engranaje como el mostrado en la Figura 15.

Figura 15. Engranaje diseñado por el acelerador de diseño con el método Shaping



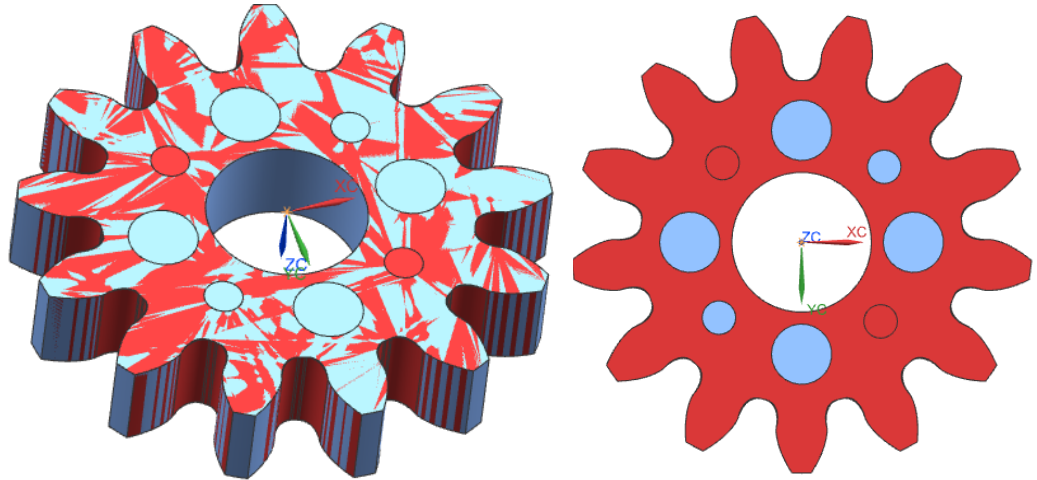
Fuente: Autor

2.2.5 Comparación geométrica de los engranajes del acelerador

Como se pudo ver anteriormente el acelerador de dibujo del programa NX® permite seleccionar dos métodos de fabricación del engranaje, según el tipo de aplicación por el cual se va a manufacturar, razón por la cual se hace una comparación entre los dos engranajes para poder determinar visualmente las diferencias geométricas entre ellas.

Al sobreponer los perfiles de los engranajes de dientes rectos generados por procesos de manufactura diferentes, siendo el de color rojo el generado por *shaping* y el de color azul el generado por *hobbing*, se podría decir que no existe ninguna diferencia como se ve en la Figura 16 ya que los engranajes respetan los límites de los diámetros, la generación y forma de la curva de involuta, los flancos y valles se ven similares.

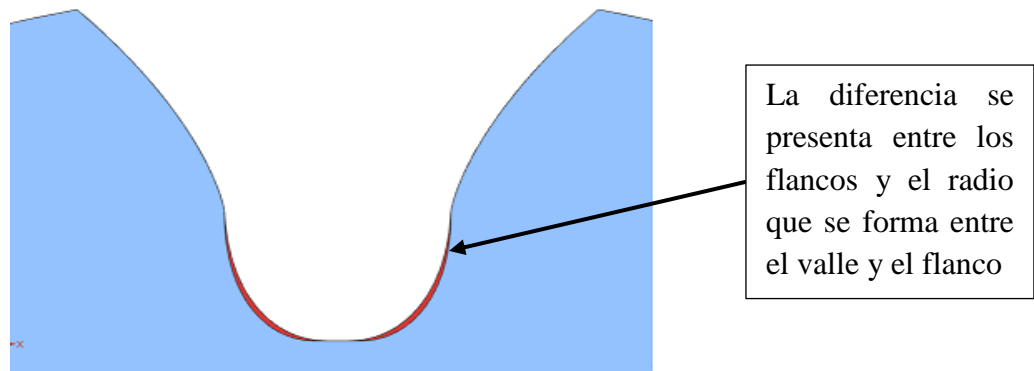
Figura 16. *Superposición de los engranajes generados a partir del acelerador de diseño*



Fuente: Autor

Al hacer un acercamiento al diente del engranaje como se ve en la Figura 17 se aprecia que no existe ningún cambio en el dimensionamiento de los diámetros de la construcción del engranaje, lo que significa que cada uno de los componentes geométricos para la construcción del dibujo del engranaje inician y finalizan en la misma posición que el otro, mientras que en la parte de los flancos cambian de forma significativa para el proceso de funcionamiento y el par de engranajes.

Figura 17. *Acercamiento del diente, en la sobreposición de los engranajes generados desde el acelerador de NX®*



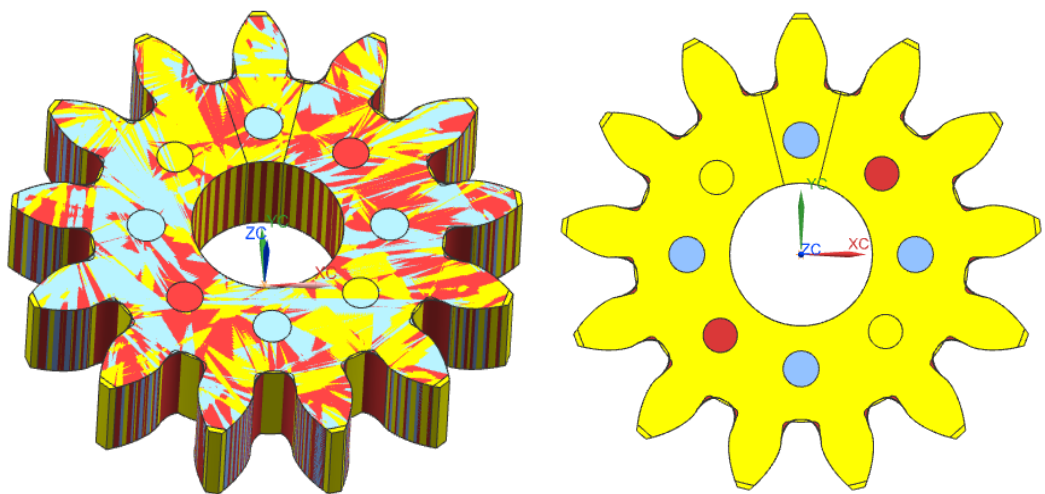
Fuente: Autor

2.2.6 Comparación geométrica de los engranajes del acelerador con el generado por la aplicación de Excel®

Al ver que la comparación geométrica entre los engranajes de dientes rectos generados a partir del acelerador de diseño de NX®, es tan pequeña que se optó por compararlos con el engranaje generado a partir de la aplicación de Excel® para poder determinar desde un inicio las diferencias que se pueden presentar y la selección del método del acelerador de engranaje que se va a mecanizar.

Al sobreponer los perfiles de los engranajes de dientes rectos generados por procesos de manufactura diferentes, siendo el de color rojo el manufacturado por *shaping*, el de color azul el manufacturado por *hobbing* y el de color amarillo generado por la aplicación de Excel®, se ve un cambio notorio con respecto a los límites de los engranajes ya que el engranaje generado desde Excel® es mucho más grande en la dimensión de la longitud del diente del engranaje y del valle como se ve en la Figura 18, mientras que la curva de involuta nacen y siguen la misma trayectoria.

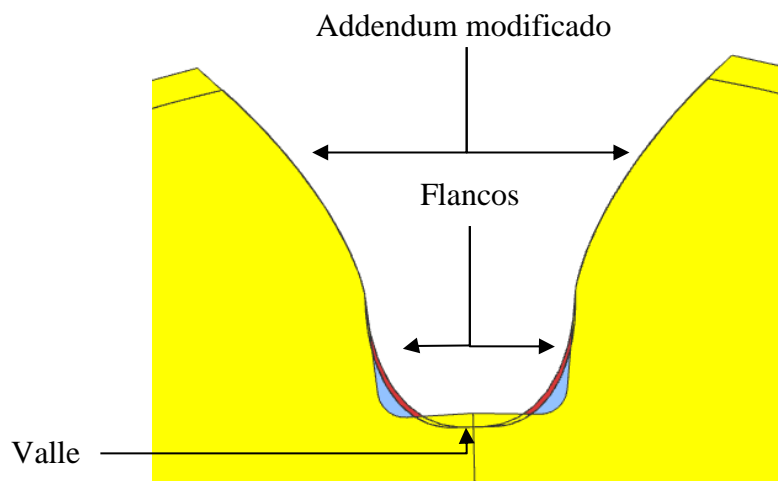
Figura 18. Superposición de los engranajes del acelerador de diseño y el generado desde Excel®



Fuente: Autor

Al hacer un acercamiento al diente del engranaje como se ve en la Figura 19, se observa una gran diferencia en el dimensionamiento de los diámetros de la construcción de los engranajes, lo que significa que cada uno de los componentes geométricos para la construcción del dibujo del engranaje inician y finalizan en partes diferentes, mientras que en la parte de los flancos y el valle cambian de forma significativa para el proceso de funcionamiento y el par de engranajes.

Figura 19. Acercamiento de diente, en la sobreposición de los engranajes generados desde la aplicación de Excel® y el acelerador de dibujo de NX®



Fuente: Autor

A partir de las comparaciones visuales que se obtuvieron, se determinó que el engranaje que se va a mecanizar por su condición geométrica y método de fabricación convencional es el generado por *shaping*.

2.3 CONCLUSIONES DEL DIBUJO PARAMÉTRICO DE UN ENGRANAJE DE DIENTES RECTOS

- ❖ Se estableció la geometría de los engranaje de dientes rectos, bajo la norma DIN 3960 por medio de una hoja de Excel® como acelerador de calculos, la cual se enlazo con el programa NX® para la reproducción de la geometría.

- ❖ Al comparar el CAD del engranaje generado por el aplicativo de Excel®, con el del acelerador de dibujo de NX®, se pudo observar que el programa NX®, diseña el engranaje con la curva de involuta necesaria, pero con un valor de addendum modificado.
- ❖ La geometría del diente del engranaje, cambia en función del número de dientes requerido, independientemente del módulo que se utilice.
- ❖ La aplicación de Excel® diseñada como acelerador de dibujo, en comparación al acelerador de dibujo del programa NX®, permite la modificación del addendum, lo cual produce una geometría diferente en el engranaje.
- ❖ El método de diseño y fabricación de engranajes de dientes rectos puede ser alterado por el addendum modificado. Si se utiliza el de menor valor, la geometría presentara menos concentración de esfuerzos y soporta una mayor carga.
- ❖ Una de las ventajas del aplicativo de Excel®, es que permite salirse de los valores estándar para la generación de engranajes de dientes rectos, alterando el número de dientes, modulo y ángulo de presión; diseñando engranajes según los requerimientos del usuario.

3. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA EL MAQUINADO DE ENGRANAJES CILÍNDRICOS

Para el estudio de la curva paramétrica de un engranaje de dientes rectos fue importante mecanizar tres piezas con la geometría obtenida del aplicativo de Excel®, mientras que la otra pieza fue generada por el acelerador de diseño del programa NX®, realizando el proceso de acabado con tres herramientas diferentes para identificar la eficiencia del acabado y la generación de la curva de involuta a partir de herramientas estándar.

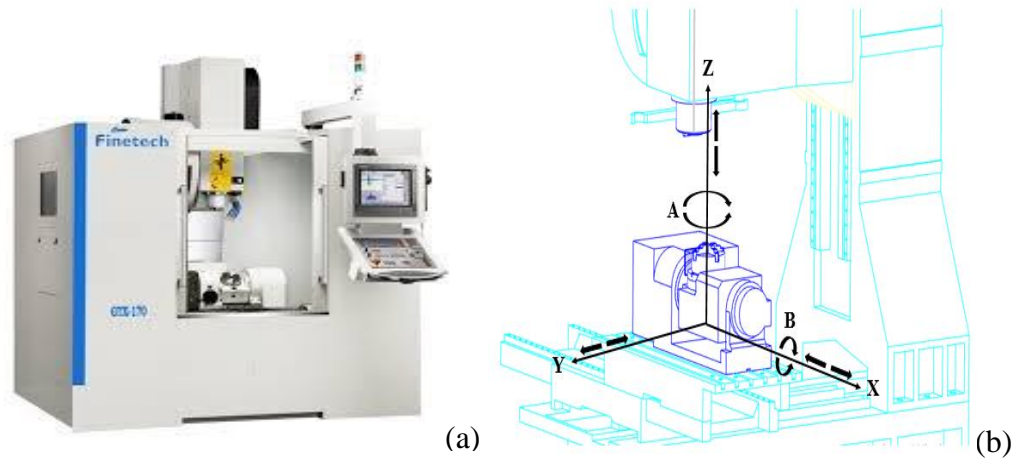
3.1 RECURSOS DISPONIBLES

Para el proceso experimental de la fabricación del engranaje de dientes rectos fue necesario contar con el programa NX® para el modelado de la pieza y configuración del proceso de manufactura por medio de un pos procesador identificando los movimientos, características y principios de la máquina, también fue necesario determinar el tipo de herramientas, métodos de sujeción, y métodos de fabricación que se podrían realizar en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás.

3.1.1 Máquina a utilizar

Para el proceso de manufactura de engranajes rectos, se utilizó el centro de mecanizado vertical Finetech GTX-210, con control Fanuc, de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás (Figura 20 a). La máquina cuenta con un dispositivo adaptable para activar el cuarto y un quinto eje de rotación, que le confiere la capacidad de fabricar piezas de geometría compleja como: engranajes, *impellers*, álabes, levas y cavidades para moldes. En la Figura 20 (b) se muestra la cinemática de la máquina; tres ejes de traslación y dos de rotación. Cabe anotar que el control de la máquina solo puede mover simultáneamente 4 de los 5 ejes (4+1 grados de libertad de movimiento).

Figura 20. Centro de mecanizado Finetech GTX-210

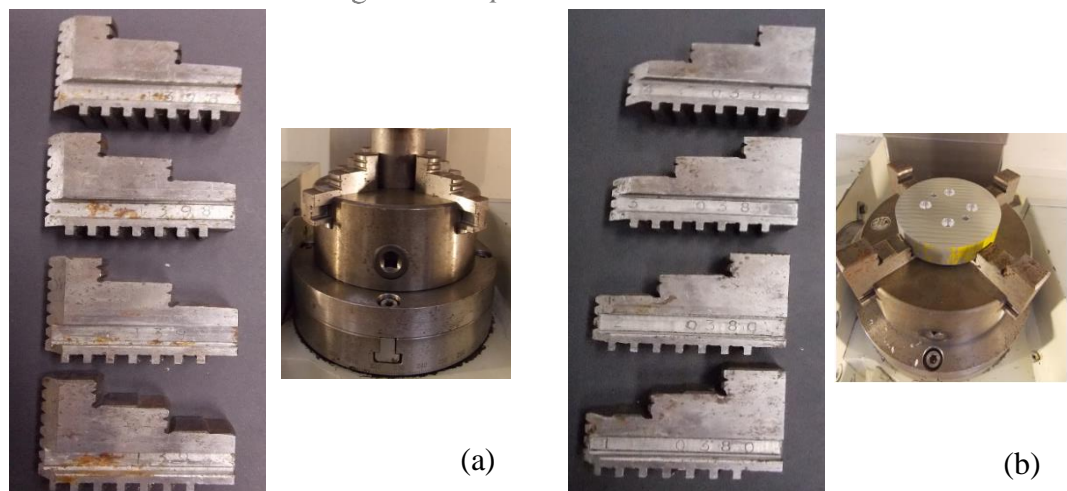


Fuente: Autor

3.1.2 Copa de mordazas

El laboratorio cuenta con una copa autocentrante, con sus respectivos juegos de mordazas para diámetros internos (Figura 21 a) y para diámetros externos (Figura 21 b). Es de 6 pulgadas de diámetro, lo que se convierte en limitante del máximo diámetro de engranaje a fabricar.

Figura 21. Tipos de mordazas



Fuente: Autor

3.1.3 Herramientas de corte

El laboratorio dispone de fresas estándar, de diferentes diámetros, de punta cónica, punta esférica y punta plana. También cuenta con fresas frontales de insertos intercambiables para operaciones de planeado y desbaste. La selección de herramientas para el proceso de manufactura se hizo con respecto al diseño de las piezas y sus características geométricas [7] (Figura 22).

Figura 22. *Herramientas de geometría estándar del laboratorio de manufactura multieje.*

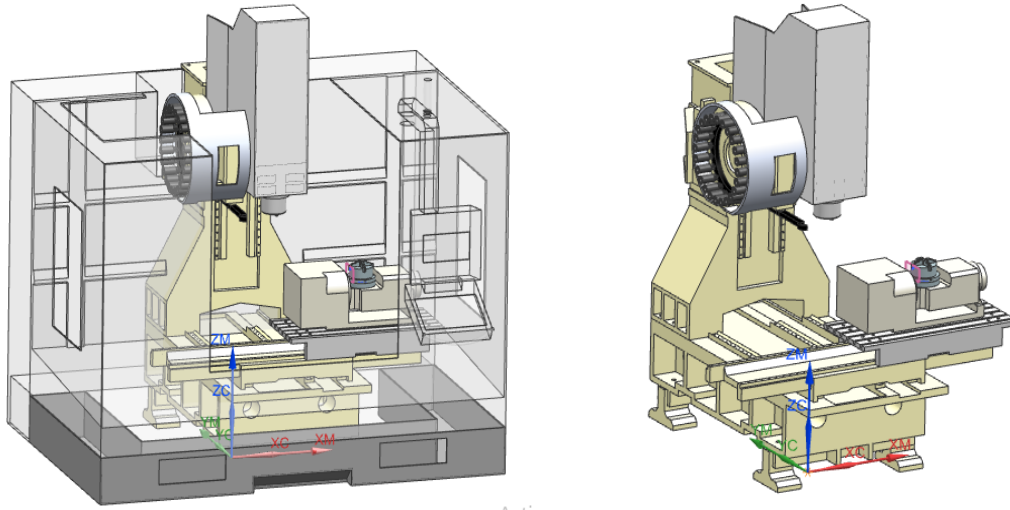


Fuente: Autor

3.1.4 Software NX®

Para el modelado y generación de los engranajes de dientes rectos se utilizó el software NX®, que permite el desarrollo de modelos CAD, tiene capacidad de realizar análisis de ingeniería CAE y también la generación de código NC para máquinas de control numérico con el módulo de manufactura asistida por computador CAM. El módulo CAM cuenta con una máquina virtual, equivalente al centro de mecanizado GTX-210 de laboratorio, que permite validar trayectorias de corte de las herramientas, verificar la geometría obtenida, estimar tiempos de manufactura y detectar posibles colisiones [8].

Figura 23. Pos procesador NX® (máquina virtual)



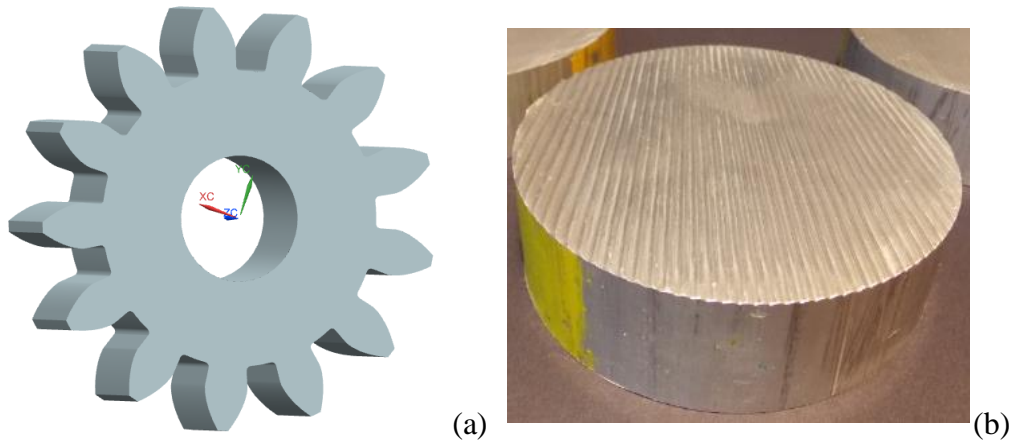
Fuente: [8]

3.2 DISEÑO DISPOSITIVO DE SUJECIÓN

Considerando el engranaje a fabricar de dientes rectos de módulo $M=5.5$, número de dientes $Z=13$, ángulo de presión $AP=20^\circ$ y espesor $b=15\text{mm}$ (Figura 24 (a)), la geometría natural de la materia prima es en forma de disco como se ve en la Figura 24 (b). Debido a que los dientes del engranaje se tallan sobre el diámetro externo del cilindro, es necesario dejar esta área libre para su manufactura.

Es inevitable diseñar un dispositivo que sujete la materia prima permitiendo el tallado de los dientes del engranaje en la superficie del cilindro y a su vez suprima los 12 grados de libertad de movimiento [9], garantizando la rigidez del montaje. Teniendo en cuenta que los engranajes son elementos utilizados para la transmisión de movimiento y usualmente van montados sobre un eje, se pensó en utilizar este mismo agujero para la sujeción de la materia prima.

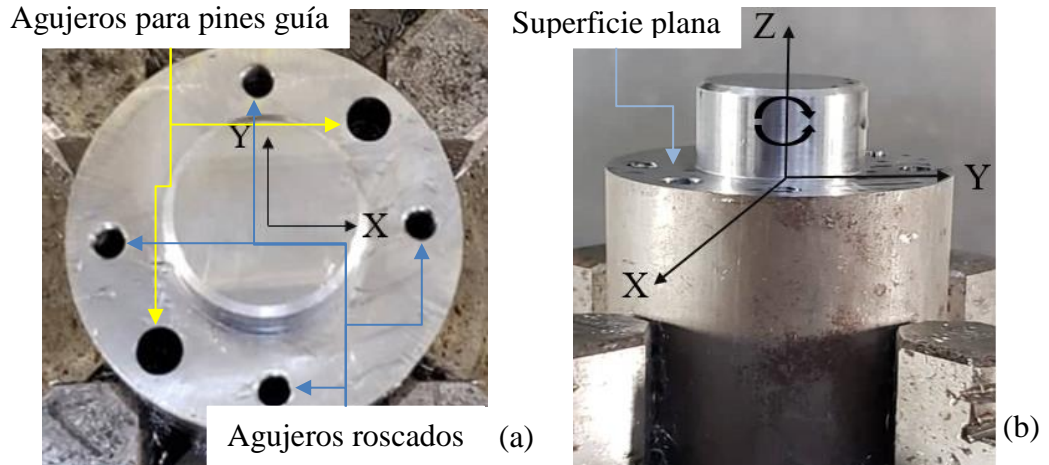
Figura 24. Geometría a fabricar y materia prima base



Fuente: Autor

1. Eje del dispositivo: El eje del dispositivo se diseñó de tal forma que al montar la materia prima del engranaje (Figura 24 b), este restringe los grados de libertad de traslación en los ejes X y Y como se ve en la Figura 25 (a) considerando un ajuste deslizante entre las dos piezas.
2. Agujeros roscados: Por medio de cuatro tornillos brístol se eliminó el desplazamiento de traslación en el eje Z como se ve en la Figura 25 (b).
3. Agujeros para pines guía: Para evitar la rotación alrededor del eje Z, usualmente estos componentes de transmisión de potencia utilizan una chaveta. Debido a que el laboratorio no cuenta con la máquina y herramientas necesarias para esto, se realizaron dos agujeros rimados para la instalación de dos pines guía, reemplazando la función de los chaveteros (Figura 25 (b)). Los pines también limitan el desplazamiento en la dirección de los ejes X y Y.
4. Superficie plana: La presencia de la superficie plana ayuda a fijar y limitar la traslación en el eje $-Z$ y a suprimir la rotación alrededor de los ejes X y Y (Figura 25 (b)).

Figura 25. *Dispositivo de sujeción manufacturado*



Fuente: Autor

3.3 PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA

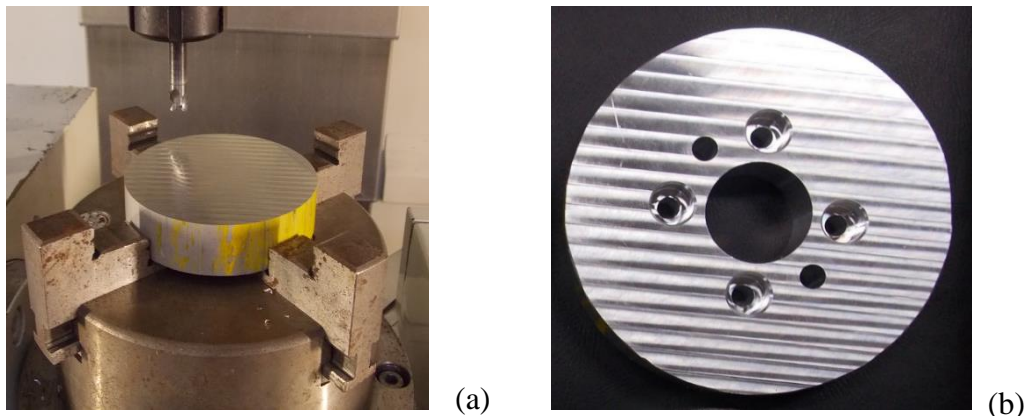
Para el proceso de manufactura del engranaje de dientes rectos se inició preparando la materia prima, con las características apropiadas para fijarlo en el dispositivo diseñado. Posteriormente se manufacturó el dispositivo de sujeción dejándolo en su posición inicial, para no perder la concentricidad y ubicación de la pieza [10], lo que permitió ensamblar las dos piezas y generar el proceso de manufactura de los dientes del engranaje en el diámetro externo.

3.3.1 Preparación de la materia prima

La preparación de la materia prima fue la primera fase de manufactura para el maquinado de un engranaje de dientes rectos en el centro de mecanizado de la Universidad Santo Tomás. En esta fase se prepararon tres piezas para manufacturar engranajes generados a partir de la aplicación de Excel® y una pieza para manufacturar un engranaje generado a partir del acelerador de diseño de NX®

El alistamiento de la materia prima del engranaje se realizó en duraluminio ya que es un material de fácil maquinado [3]. Se inició con un planeado en la cara como se ve en la Figura 26 (a), posteriormente se maquinaron los respectivos agujeros de sujeción donde el agujero del eje tenía la tolerancia adecuada para el ensamble con el dispositivo. Por último, se giró la pieza y se realizaron planeados consecutivos hasta lograr el espesor de 15mm como se ilustra en la Figura 26(b) (el Anexo D muestra la hoja de procesos completa).

Figura 26. Adaptación de la materia prima del engranaje



Fuente: Autor

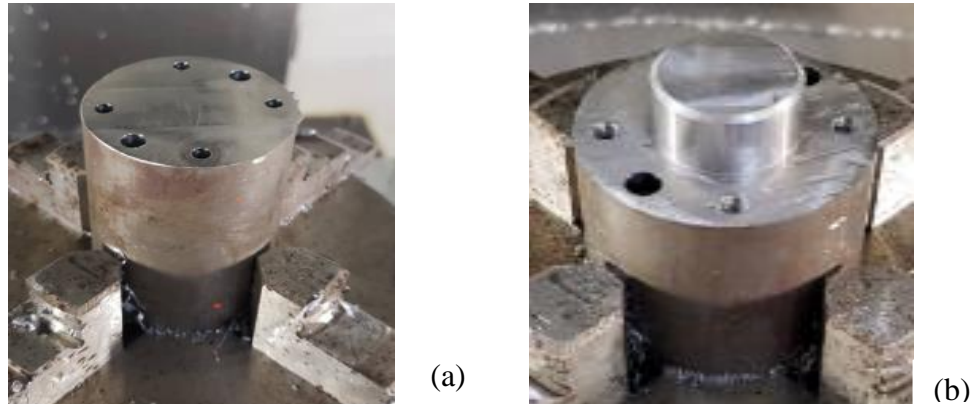
3.3.2 Fabricación del dispositivo de sujeción

La segunda fase del proceso de manufactura fue mecanizar el dispositivo de sujeción en acero 1045 [3], siendo este un metal más duro y resistente al desgaste que el material del elemento a fabricar. Una vez terminado el mecanizado del dispositivo de sujeción, se conservó en su posición para evitar perder el cero de la pieza y dañar la concentricidad con respecto al eje de rotación de la copa [11].

El proceso de mecanizado del dispositivo de sujeción inicio con un planeado en las dos caras para poder orientar, apoyar y localizar la pieza, garantizando un apoyo firme con respecto al plato y a las mordazas; lo siguiente fue generar los agujeros para la sujeción de la materia prima del engranaje como se ve en la Figura 27 (a), posteriormente se realizó un desbaste para generar un eje con su respectivo Abellán y finalmente se dió un acabado para llegar a un ajuste de transición k7 como se ve en la Figura 27 (b), ya que este ajuste es un compromiso

entre el juego y la interferencia, genera una mayor precisión en el ensamble de los componentes [1] (el Anexo E muestra la hoja de procesos completa).

Figura 27. *Dispositivo de sujeción manufacturado*



Fuente: Autor

3.3.3 Tallado de los dientes del engranaje

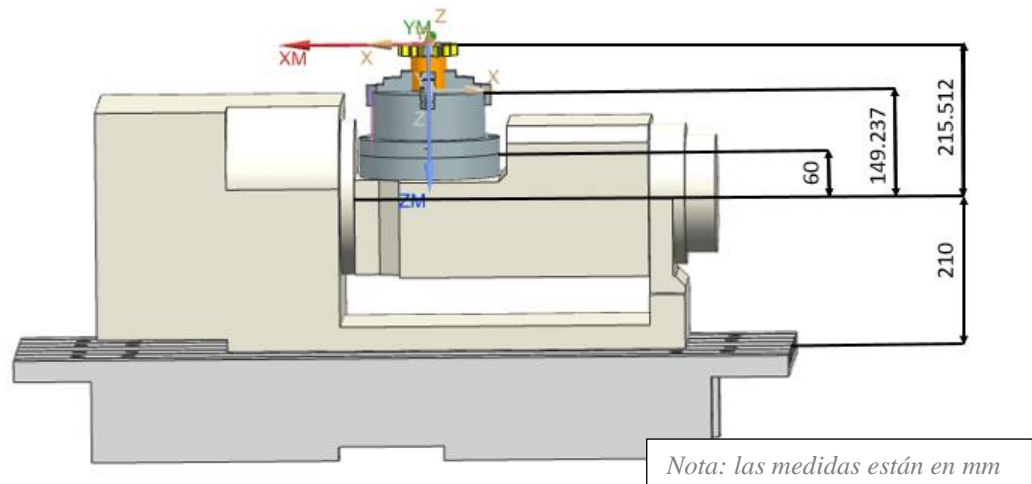
Para el tallado de los dientes del engranaje es fundamental el uso de los cinco ejes de la máquina, ya que la materia prima tiene que trasladarse y rotar garantizando el posicionamiento que permitió el tallado de la geometría.

3.3.3.1 Cero de la pieza

Para el proceso de manufactura del engranaje de dientes rectos fue importante establecer el cero de la pieza, ya que al rotar el quinto eje el cero se traslada a otro plano, lo que podría ocasionar una colisión; para evitar la posible colisión se miró el catálogo de la máquina identificando el cero en el eje X a 210 mm de altura con respecto a la mesa de la máquina y a su vez es el centro del diámetro de giro del quinto eje con respecto al dispositivo de acoplamiento como se ve en la Figura 28, para el eje Y se encuentra en el centro del plato con origen en la intersección con el eje X.

Una vez identificados los ceros de los ejes, se obtuvieron las siguientes coordenadas de posicionamiento de cero en el centro de mecanizado $X=584.322$ mm $Y=-303.641$ mm $Z=-325.512$ mm; mientras que para la programación de manufactura en el programa NX® fue necesario sumar la altura del husillo, plato, mordazas, altura del dispositivo, iniciando desde el eje X como se ve en la Figura 28, donde se obtuvo un valor de 215.512 mm para ubicar el ensamble de las piezas facultando la generación de los códigos para el proceso de manufactura. En maquinado multieje es fundamental que el montaje virtual del centro de mecanizado corresponda al de la máquina real [8].

Figura 28. Medidas para la generación del cero de la pieza en cinco ejes

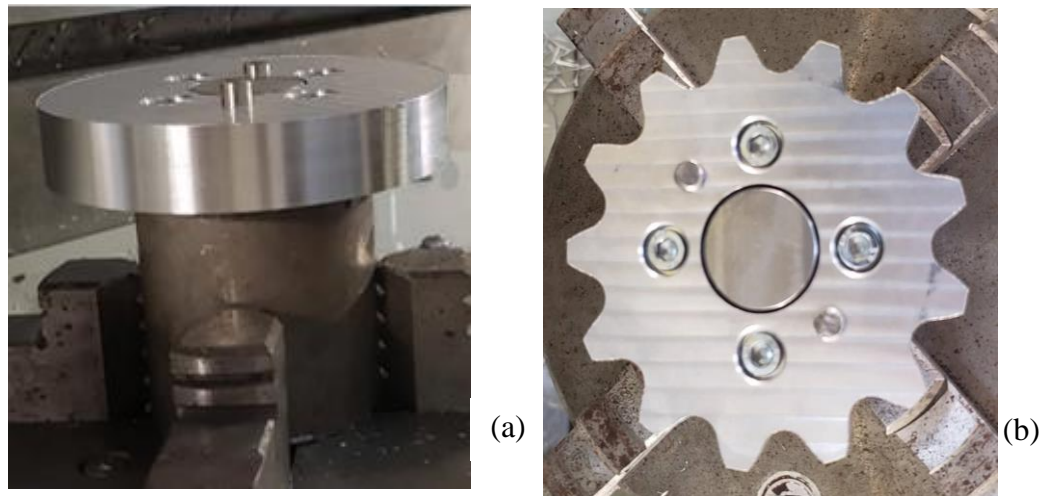


Fuente: Autor

3.3.3.2 Desbaste de la geometría

La tercera fase del proceso de manufactura para la generación del engranaje fue hacer un ensamble entre la materia prima y el dispositivo de sujeción, por medio de tornillos bristol y pines guía garantizando así un posicionamiento y sujeción segura en la máquina (Figura 29 (a)). Después de tener las piezas ensambladas se realizó el proceso de desbaste y acabado diametral de la pieza [10] lo cual garantizó la medida del diámetro externo del engranaje. Seguidamente se realizó el desbaste del sobre material que se encontraba entre los dientes, los flancos y el valle, estos desbastes se generaron por medio de una trayectoria de la herramienta de mecanizado trocoidal [12], como se explica en el Anexo F. Se obtuvo la pieza mostrada en la Figura 29 (b) (ver Anexo G para la hoja de procesos).

Figura 29. *Desbaste sobre material*

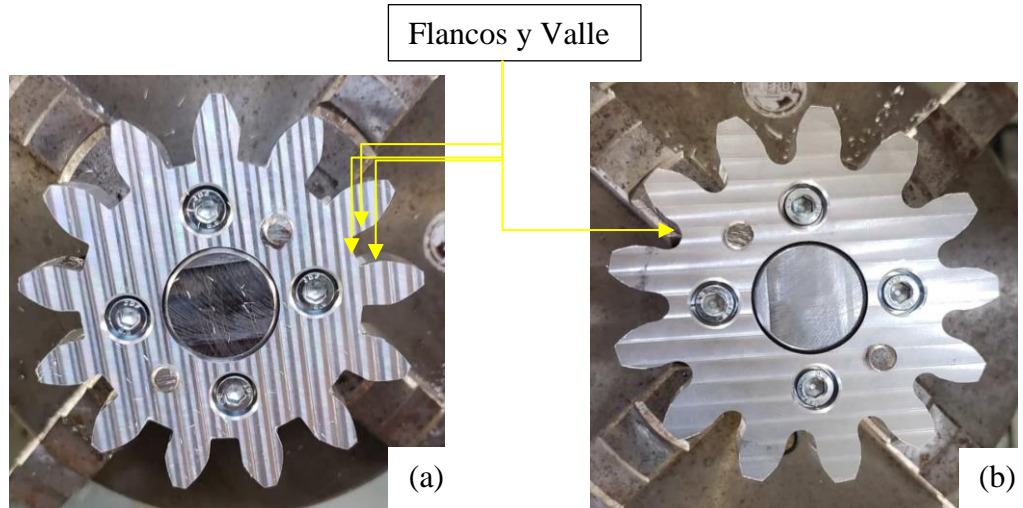


Fuente: Autor

3.3.3.3 Acabado del flanco y del valle del engranaje

Para generar el acabado del valle y de los flancos fue necesario rotar la pieza tanto en el cuarto como en el quinto eje, lo que permitió generar un acabado de forma concordante en todas las superficies [13], garantizando un mejor acabado. En el caso del engranaje generado por el aplicativo de Excel® se realizó un proceso de manufactura de acabado en cada flanco y el valle (Figura 30 (a)) (Anexo H para la hoja de procesos), mientras que para el engranaje generado por el acelerador de dibujo de NX® se generó un solo proceso de manufactura de acabado para las tres partes, ya que la geometría de la pieza y la herramienta permitieron lograr el acabado deseado por la pieza, como se puede observar la Figura 30 (b) (Anexo I para la hoja de procesos). Lo anterior no influye en el proceso de obtención de la curva de involuta.

Figura 30. Acabado del valle y del flanco del engranaje.



Fuente: Autor

3.3.4 Acabado del diente del engranaje

Para el acabado de los dientes del engranaje fue importante rotar la pieza en el cuarto y quinto eje generando un acabado concordante y funcional a la superficie de contacto del movimiento [10]. En el proceso de acabado de los dientes en los tres engranajes generados con la ayuda de la hoja de Excel®, se utilizaron herramientas de punta plana, punta esférica y punta cónica, con los mismos parámetros de corte (Figura 31). El acabado de los dientes del engranaje [6] obtenido por medio del acelerador de diseño, se realizó con herramienta de punta plana. El Anexo J muestra la hoja de proceso del acabado de los diferentes engranajes (1.1-1.2-1.3 y 1.4).

Figura 31. *Acabado de los dientes de los engranajes.*



Fuente: Autor

3.4 CONCLUSIONES DEL MONTAJE EXPERIMENTAL PARA EL MAQUINADO DE ENGRANAJES CILÍNDRICO

- ❖ Se planifico y ejecuto un montaje experimental con herramienta estándar para el maquinado de engranajes cilíndricos de dientes rectos, en el centro de mecanizado FINETECH GTX-210 de la Universidad Santo Tomás.
- ❖ Cuando se mecaniza, en un centro de mecanizado de tres ejes, es fundamental tener el cero de la pieza de forma precisa, evitando fallas de excentricidad en las piezas
- ❖ Al mecanizar piezas en un centro de mecanizado de cinco ejes, es importante establecer el cero del eje Z, ya que este se traslada a otro plano y puede llegar a ocasionar una colisión
- ❖ Es conveniente establecer la longitud de voladizo de la herramienta, ya que se pueden presentar vibraciones y deflexiones de la herramienta, afectan el acabado de la pieza

4. VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ENGRANAJES

Una vez terminado el proceso de manufactura de los engranajes con herramientas estándar y los mismos parámetros de desbaste y acabado, se realizó la metrología del perfil del diente con el fin de determinar si el proceso de manufactura en un centro de mecanizado multipropósito con herramienta de geometría convencional, es óptimo para la generación de piezas complejas como ésta.

4.1 Verificación del montaje tecnológico

Para el proceso de mecanizado de los engranajes de dientes rectos fue necesario tener en cuenta las principales fuentes de error que se pudieran presentar en el centro de mecanizado GTX-210 de la Universidad Santo Tomás [11]; se consideraron las limitantes de los dispositivos de medición para los casos de adaptación del mecanismo de cuarto y quinto eje, concentricidad de la pieza, compensación de la herramienta y obtención de la posición del cero de pieza.

4.1.1 Montaje cuarto y quinto eje

Para el montaje del cuarto y quinto eje en la mesa del centro de mecanizado es necesario el uso de un elemento de medición para la nivelación de los ejes X y Y del dispositivo. Se midieron los desplazamientos de los ejes con un comparador de carátula Vertex con una precisión de 0.01mm (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a)). Se ubicó en el eje Z por medio de un imán de neodimio con el objetivo de tener el comparador de carátula fijo y adaptable para la medición de los diferentes ejes como se ve en Figura 32 (b).

Figura 32. Comparador de carátula Vertex



(a)



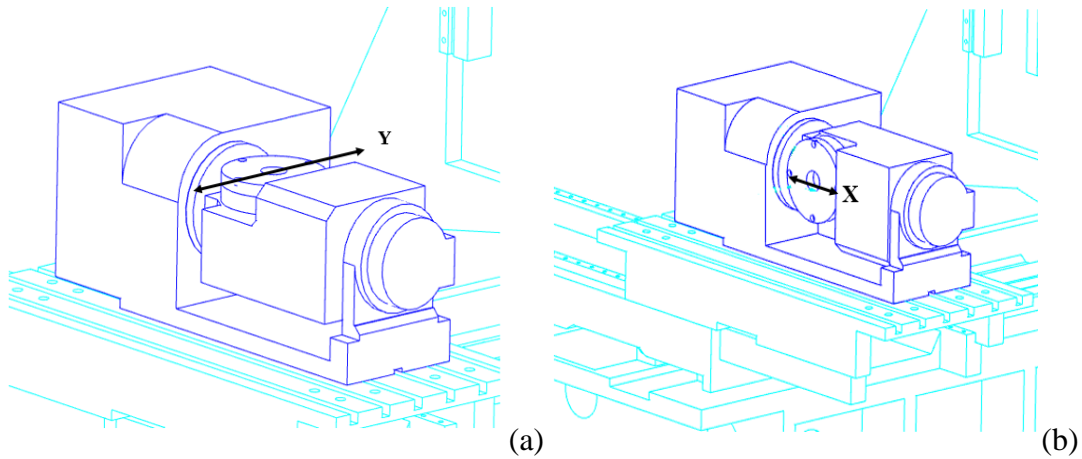
(b)

Fuente: Autor

Se puso en contacto la punta del comparador de carátula con el plato giratorio del cuarto y quinto eje, de tal forma que siempre pasara por la superficie plana del plato. Se procedió a medir la nivelación de los ejes por medio del siguiente protocolo, teniendo presente la limitación de precisión del comparador de carátula lo cual generó unos resultados para cada eje con una incertidumbre de error de una centésima.

- 1) Eje Y: Para el caso del eje Y fue necesario ubicar el plato de forma horizontal dejando el cuarto y quinto eje en posición cero como se ve en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a), donde posteriormente se movió la mesa sobre el Y, obteniendo así la nivelación del eje y corrigiéndolo al mover el quinto eje 0.077°
- 2) Eje X: Para alinear el eje X, se giró el quinto eje 90° dejando el plato de forma vertical como se ve en la Figura 33 (b) y posteriormente se desplazó el comparador de carátula sobre el eje X estableciendo una desalineación de 0.065 mm por cada 100 milímetros de recorrido. La alineación se hizo al rotar el dispositivo alrededor del eje Z de la máquina. Finalmente se atornillo a la mesa, anclando así el eje X. La incertidumbre de medición para este eje también está en función de la precisión del comparador de carátula de 0.01mm.

Figura 33. Nivelación de los ejes X y Y del dispositivo de cuarto y quinto eje

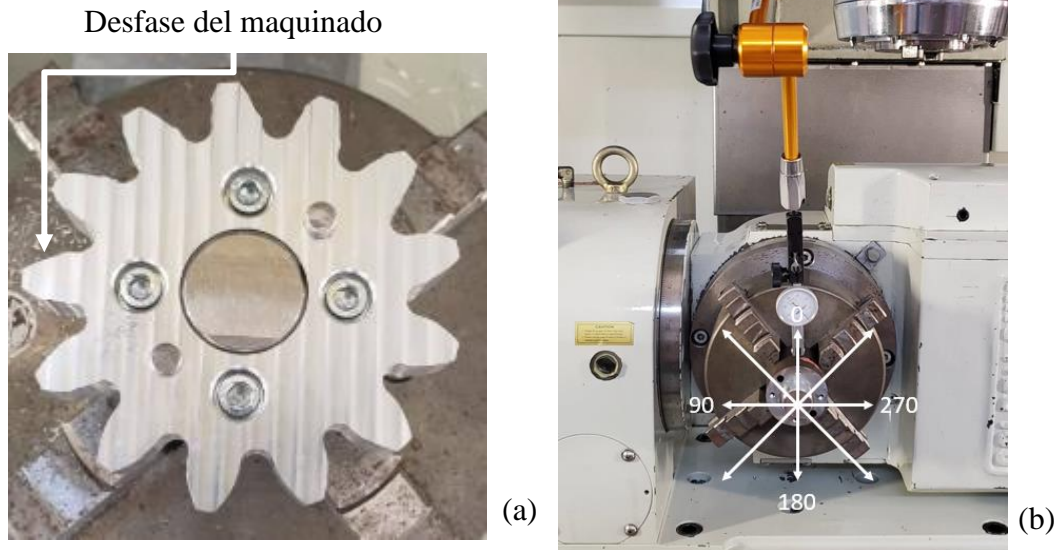


4.1.2 Verificación de concentricidad

La concentricidad de los ejes X y Y, con respecto al eje de rotación del plato del cuarto y quinto eje, es un aspecto importante, ya que de este aspecto depende la concentricidad de los dientes del engranaje con respecto a su centro de giro (Figura 34 (a)).

Para la medición de concentricidad de los ejes X y Y se puso el comparador de carátula sobre el eje del dispositivo de sujeción rotando el cuarto eje cada 45° como se ve en la Figura 34 (b), identificando la descompensación de los ejes; se establecieron las siguientes coordenadas para el eje X=584.322 mm y para el eje Y=-303.641mm con una centésima de milímetro de error de acuerdo a la precisión del comparador de carátula.

Figura 34. *Concentricidad de la pieza*



Fuente: Autor

4.1.3 Compensación de las herramientas

La compensación de las diferentes herramientas para el proceso de manufactura se realizó por el método de comparación con respecto a la herramienta del pocket uno (Herramienta patrón - Nine9) [14], donde se estableció la longitud de voladizo de la herramienta con respecto a la misma por medio de un comparador carátula plano de marca Perfect, con una precisión de 0.01mm, como se ve en la Figura 35.

Figura 35. *Compensación de la herramienta*



Fuente: Autor

4.2 Medición de engranajes y resultados

La medición de los engranajes, es el aspecto culminativo del proceso de manufactura con herramienta estándar. Finalmente se hicieron diferentes pruebas de metrología para determinar si el proceso, la herramienta y el método de fabricación son adecuados para la generación de engranajes de dientes rectos con la curva de involuta.

4.2.1 Métodos clásicos de medición

Para la metrología de los engranajes manufacturados se utilizaron dos métodos: Clásicos analíticos y de medición directa sobre la geometría obtenida[11], los cuales son:

- 1) Pie de rey digital: Se utilizó un pie de rey digital marca Starrett con una precisión de 0.01mm para medir el espacio entre un diente a otro tomando como punto de referencia el inicio de la curva de involuta en el diámetro base (DB), la profundidad

y el ancho del diente, para los engranajes manufacturados con la geometría obtenida por el acelerador de dibujo de Excel® como se ve en la Figura 36 y en la Figura 37, se observa la metrología de la misma forma para el engranaje producido por el acelerador de diseño de NX®.

Figura 36. Metrología pie de rey digital engranajes con geometría obtenida desde Excel®



Fuente: Autor

Figura 37. Metrología pie de rey digital engranaje con geometría obtenida desde el acelerador de dibujo de NX®

Acabado con herramienta de punta redonda



Fuente: Autor

Tabla 7. Resultados metrología pie de rey

		Engranajes con geometría obtenida de Excel® acabado con herramienta						Engranaje acelerador NX®	
Medidas (mm)	Teóricas cálculo	Punta recta		Punta cónica		Punta redonda		Acabado con herramienta punta redonda	
		Med	Des	Med	Des	Med	Des	Med	Des
Ancho del diente	8.207	9.27	1.063	9.17	0.963	9.29	1.083	9.34	1.133
Alto del diente	11.918	12.14	0.222	12.03	0.112	12.16	0.242	11.4	0.458
Separación de dientes	7.03	7.03	0	7.04	0.01	7.05	0.02	7.08	0.05

Fuente: Autor

Según los resultados de la Tabla 7, se pudo concluir que la herramienta de menor desviación dimensional es la punta cónica, seguido por la herramienta punta recta y por último la herramienta punta redonda.

- 2) Pie de rey para engranajes: El pie de rey para engranajes es un dispositivo de metrología con una precisión de 0.02 mm utilizado para medir el ancho y el alto de los dientes (Figura 38), donde se calcularon las medidas por medio de las ecuaciones (4-1) (4-2) [15]. Donde m es el módulo del engranaje, z es el número de dientes, α es el ángulo de presión, x es el coeficiente de addendum modificado, da es el diámetro externo y d es el diámetro primitivo.

Figura 38. Pie de rey para engranajes



Fuente: Autor

$$\text{Longitud del diente} = \tilde{h} = \frac{mz}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi}{2z} + \frac{2x \tan \alpha}{z} \right) \right\} + \frac{da-d}{2} \quad (4-1)$$

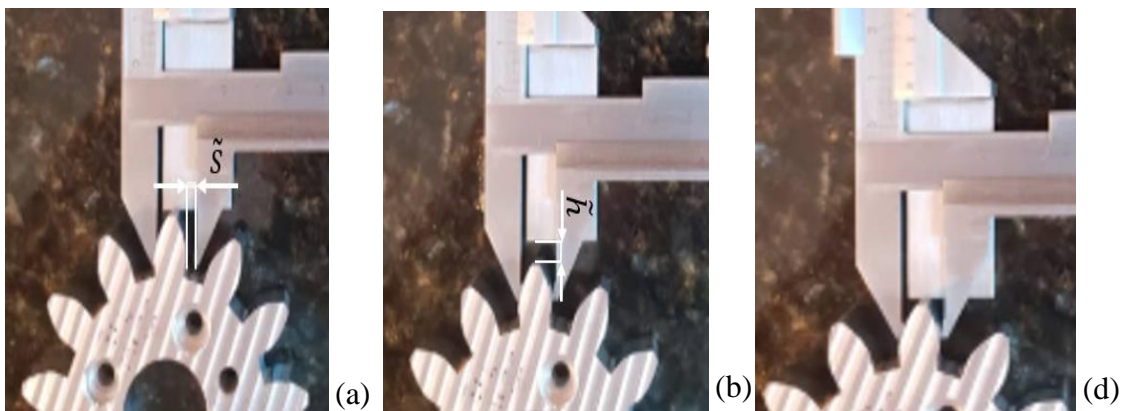
$$\text{Ancho del diente} = \tilde{s} = mz \sin \left(\frac{\pi}{2z} + \frac{2x \tan \alpha}{z} \right) \quad (4-2)$$

Una vez calculadas las medidas, se obtuvo que el ancho es de 8.62 mm y el alto es de 6.68 mm que debería tener el diente del engranaje, posteriormente se fijaron las medidas en el pie de rey (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) para medir el diente con base en los resultados; en el proceso de metrología se pueden presentar los siguientes casos.

- 1) Desbaste excesivo en el diente: Cuando se retira más material en los dientes durante el proceso de manufactura, en el pie de rey se observará un vacío en el espacio de la cota \tilde{s} como se ve en la Figura 39 (a).

- 2) Sobre material en el diente: Es la ocasión donde se deja un exceso de material en el diente, presentando en la metrología la interferencia del diente con el espacio de la cota \tilde{s} lo que no dejará entrar de forma adecuada el diente como se ve en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b).
- 3) Longitud del diente: En el proceso de metrología de la longitud del diente se pueden presentar los siguientes casos:
 - 3.1) Longitud corta del diente: Cuando la longitud del diente es corta se presentará un espacio en la cota \tilde{h} como se observa en la Figura 39 (b).
 - 3.2) Longitud larga del diente: Si la longitud del diente es larga se mostrará un vacío en la cota \tilde{s} como se ve en la Figura 39 (a).
- 4) Caso idóneo: Es el caso ideal al cual se espera llegar en todos los procesos de manufactura y se da cuando en la metrología del engranaje el ancho \tilde{s} y el alto \tilde{h} del diente no presentan ningún vacío ni interferencia de espacio con respecto al diente como se ve en la Figura 39 (d).

Figura 39. Pie de rey para engranajes



Fuente: Autor

En la Tabla 8 se pueden encontrar los resultados de la metrología realizada con el pie de rey para engranajes, identificando la desviación dimensional, determinando que la herramienta

más precisa es la herramienta punta cónica, seguido por la punta recta y por último la herramienta punta redonda. En la Figura 40 se puede comprobar la práctica realizada.

Figura 40. Metrología pie de rey para engranajes

Acabado con herramienta de punta recta (Excel®)



Acabado con herramienta de punta redonda (Excel®)



Acabado con herramienta de punta cónica (Excel®)



Acabado con herramienta de punta redonda (NX®)



Fuente: Autor

Tabla 8. Resultados metrología pie de rey para engranajes

		Engranajes con geometría obtenida de Excel®						Engranaje acelerador NX®	
Teórica		Acabado con herramienta de punta recta		Acabado con herramienta de punta cónica		Acabado con herramienta de punta redonda		Acabado con herramienta de punta redonda	
		Medi	Desv	Medi	Desv	Medi	Desv	Medi	Desv
\tilde{s}	8.68mm	9.31	0.63	9.22	0.54	9.35	0.67	9.43	0.75
\tilde{h}	6.68mm	8.35	1.67	8.21	1.53	8.39	1.71	8.14	1.46

Fuente: Autor

4.2.1.1. Resultados metrología según los métodos clásicos

La metrología de engranajes por medio de los métodos clásicos deja una incertidumbre, ya que estos resultados están condicionados al conocimiento y proceso que realiza la persona; para este método de metrología se realizaron dos pruebas donde cada una tenía un procedimiento diferente de obtención de resultados.

Para la metrología del pie de rey y pie de rey para engranajes, en los resultados de la Tabla 7 y Tabla 8 se puede identificar que el proceso de acabado generado por herramientas con diferente geometría afecta el dimensionamiento de la pieza, lo que puede llegar a causar una pérdida económica y/o funcional según el caso; esto se pudo determinar por la desviación que se ve con respecto a las medidas conseguidas de forma teórica.

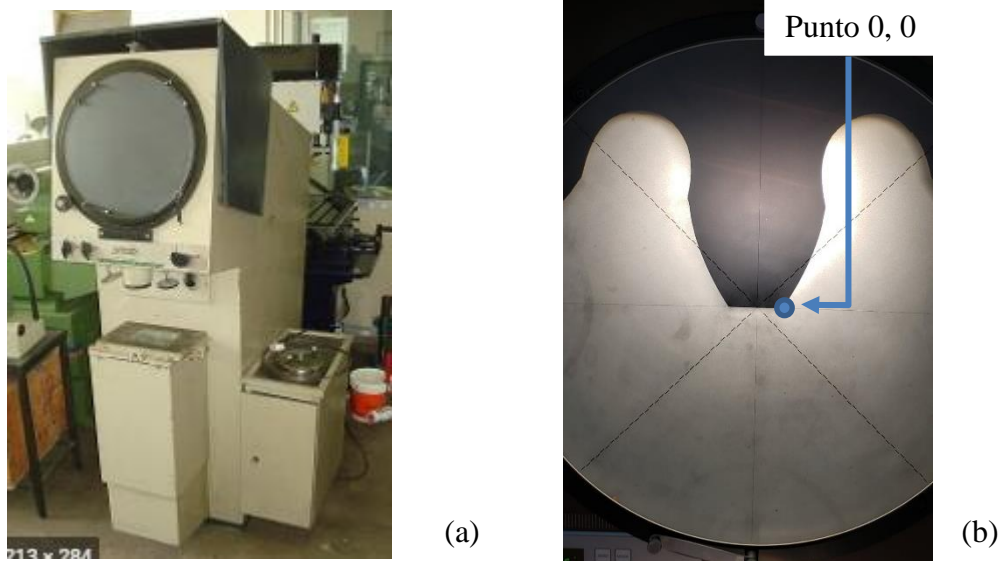
La herramienta de menor desviación dimensional para el proceso de manufactura y acabado del engranaje de dientes rectos es la de punta cónica, teniendo una desviación total del pie de rey de 1.085 mm y del pie de rey para engranajes de 2.07 mm con respecto a las medidas teóricas, seguida de 1.285 mm y 2.3 mm para la de punta recta y por último la herramienta de punta redonda con un resultado de 1.345 mm y 2.38 mm para los engranajes manufacturados con la geometría obtenida por el aplicativo de acelerador de dibujo de Excel®, mientras que para la geometría generada por el acelerador de dibujo de NX® es de 1.668 mm y 2.21 mm siendo estos resultados más altos que los demás por la diferencia geométrica causada por la modificación del addendum.

Al establecer las desviaciones generadas por cada herramienta, en futuras ocasiones se puede prevenir desbastando el sobre material que genera cada una y luego si generar el acabado necesario.

4.2.2 Proyector de perfil

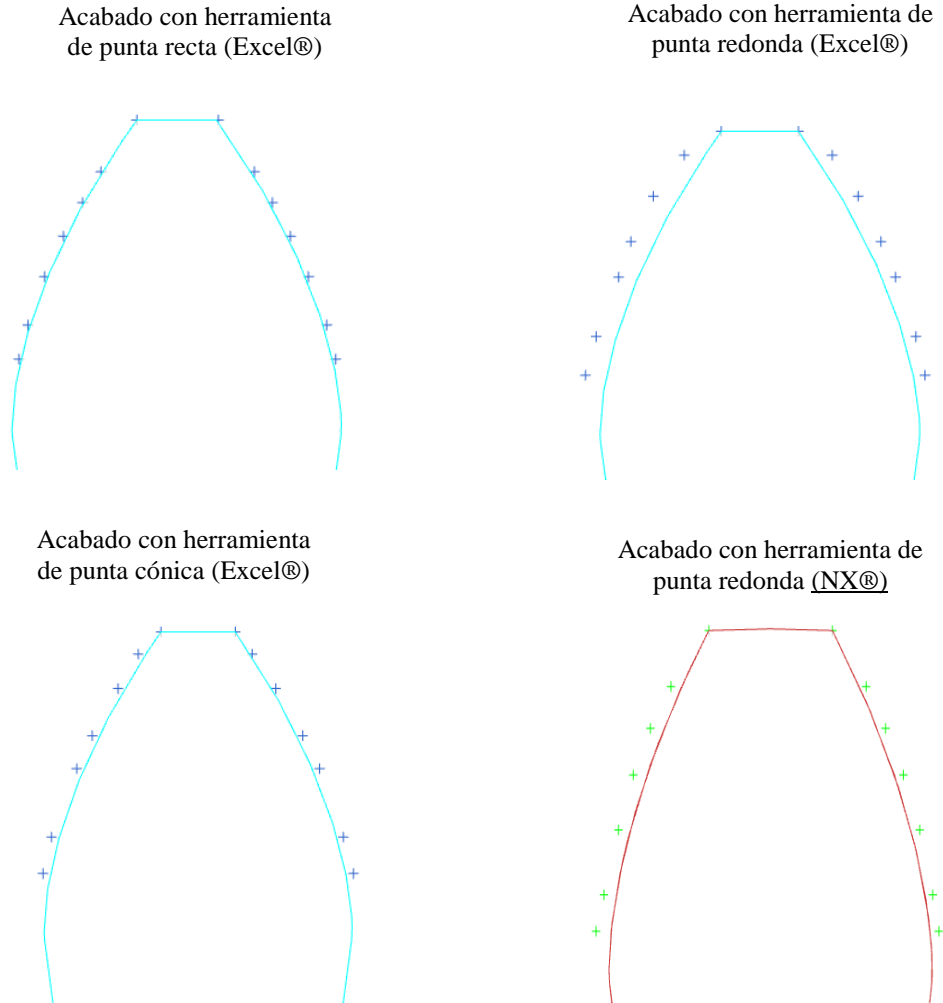
En esta ocasión se hizo un estudio metrológico de la curva de involuta por medio del proyector de perfiles Mitutoyo (Ref. PH350) con precisión de 0.001 mm de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(a)), donde se proyectó el perfil del diente estableciendo las coordenadas de cero en la parte superior el diente (Figura 41(b)), seguidamente se movió el engranaje en el eje X y Y para determinar la posición del punto de la curva de involuta como se ve en la Figura 42 para cada engranaje manufacturado; una vez establecido los puntos se midió la desviación que tenían con respecto a la curva de involuta del engranaje generado por el programa NX® como se ve en la Tabla 9.

Figura 41. *Proyector de perfil*



Fuente: Autor

Figura 42. *Metrología proyectora de perfil*



Fuente: Autor

Tabla 9. *Resultados metrología proyector de perfil (desviación)*

	Engranajes con geometría obtenida desde Excel®			Engranaje acelerador NX®
Puntos	Acabado con herramienta de punta recta	Acabado con herramienta de punta cónica	Acabado con herramienta de punta redonda	Acabado con herramienta de punta redonda
0	0	0	0	0

1	0.094	0.142	0.093	0.103
2	0.099	0.149	0.105	0.114
3	0.15	0.157	0.113	0.122
4	0.138	0.105	0.142	0.132
5	0.144	0.11	0.148	0.135
6	0.131	0.098	0.163	0.14
Desviación total	0.756	0.758	0.764	0.746

4.2.2.1. Resultados metrología proyector de perfil

La metrología del proyector de perfil está ligada a los errores humanos y al posicionamiento de la pieza en la máquina, ya que no se cuenta con un dispositivo de sujeción para las piezas en ésta, por otro lado, se tiene el limitante de desplazamiento de la mesa lo que obligó a generar el cero de la pieza en la parte superior del diente y no en el centro del diámetro del agujero del eje como debería ser.

Como se puede ver en la Figura 42, este método de metrología muestra la desviación dimensional y la desviación de posicionamiento de la curva de involuta por medio de coordenadas, las cuales se compararon con el CAD en el programa NX® de forma directa, lo que permitió determinar la desviación de los puntos según la Tabla 9.

La desviación de las herramientas para el caso del proyector de perfil depende de forma puntual del acabado generado por cada una de ellas, ya que si el acabado tiene muchas pasadas, puede generar en la metrología una desviación grande causada por los picos Rt de la rugosidad los cuales no se pueden identificar de forma fácil.

Teniendo presente todos los aspectos que se pueden generar con este método de metrología permitió identificar que la herramienta con mejor posicionamiento de la curva de involuta es la herramienta punta recta con una desviación total de 0.756 mm, seguido con la de punta cónica con una desviación de 0.758 mm y por último la de punta redonda con una desviación total de 0.764 mm y 0.746 mm para el engranaje generado por el acelerador de dibujo de NX®.

4.2.3 Máquina escáner Karl Zeiss

Se utilizó un escáner Karl Zeiss de referencia T-TRACK CS+ con una precisión de 0.02 mm, ubicado en los laboratorios del SENA (Figura 43), con el propósito de identificar las diferencias geométricas en las piezas mecanizadas con respecto al CAD como se ve en la Figura 44, teniendo presente una tolerancia AGMA grado 6 de 0.069 mm (en el Anexo K se encuentran los resultados de la prueba de escáner de forma detallada).

Al analizar los resultados de las medidas principales de la metrología por escáner en la Tabla 10, la desviación de las piezas manufacturadas con respecto al CAD del engranaje, los resultados obtenidos de la práctica de manufactura no fueron los esperados ya que los engranajes se encuentran por fuera del rango de tolerancia siendo más preciso el engranaje con acabado de punta recta, seguido el engranaje con acabado punta cónica y por último el engranaje con acabado punta redonda. (En el Anexo K se podrá ver de forma detallada los resultados).

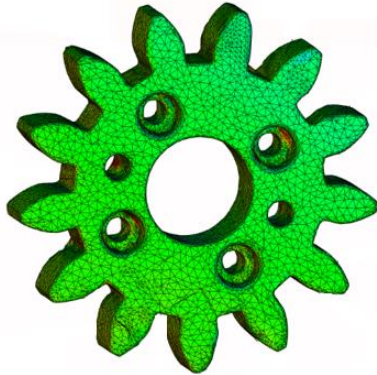
Figura 43. Scanner Karl Zeiss (T-TRACK CS+)



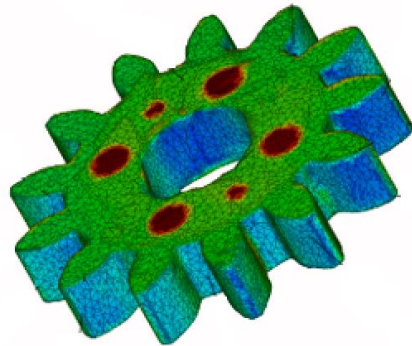
Fuente: Autor

Figura 44. Resultados metrología escáner Karl Zeiss (T-TRACK CS+)

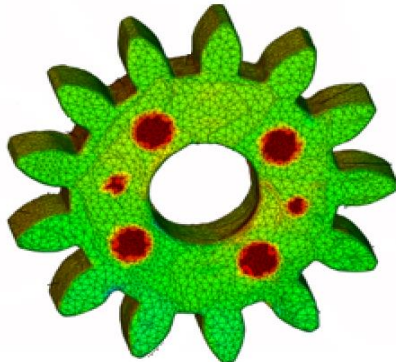
Acabado con herramienta de punta recta (Excel®)



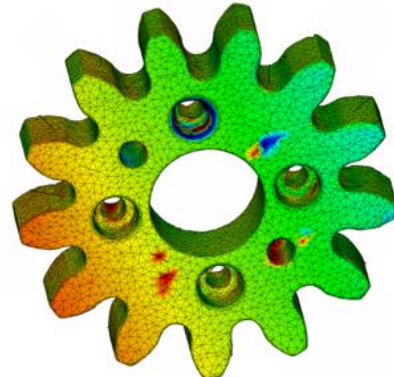
Acabado con herramienta de punta redonda (Excel®)



Acabado con herramienta de punta cónica (Excel®)



Acabado con herramienta de punta redonda (NX®)



Fuente: Autor

Tabla 10. Resultados metrología escáner Karl Zeiss (T-TRACK CS+)

	Engranajes con geometría obtenida desde Excel®						Engranaje acelerador NX®	
	Acabado con herramienta de punta recta		Acabado con herramienta de punta cónica		Acabado con herramienta de punta redonda		Acabado con herramienta de punta redonda	
	Mas Critico	Menos Critico	Mas Critico	Menos Critico	Mas Critico	Menos Critico	Mas Critico	Menos Critico
Involuta	0.068	-0.289	0.602	-0.134	0.828	0.731	0.441	-0.266

Flanco	0.500	0.068	0.592	0.502	0.9797	-0.673	0.639	0.112
Valle	0.510	0.140	0.587		0.927	-0.603	-	-

Fuente: Autor

4.2.3.1. Resultados metrología Escáner Karl Zeiss

La metrología realizada por el escáner de marca Karl Zeiss de referencia T-TRACK CS+ con una precisión de 0.02 mm cuenta con un software encargado de la medición cuyo método es más confiable que otros; inicialmente cuenta con un dispositivo de sujeción y traslación para el monitoreo de la pieza, así mismo el proceso de escáner se hace de forma sencilla lo que genera un menor grado de error en las mediciones y por último el software se encarga de calcular de forma automática las desviaciones por medio de una malla poligonal.

Según los resultados de la Tabla 10 se puede observar que este método de metrología no realiza las mediciones de forma puntual, sino que las hace sobre toda la superficie de la pieza, lo que permite producir una desviación general con respecto al CAD que se generó en el programa NX® al sobreponerlos, lo que permitió identificar que el engranaje con mejor exactitud de la curva de involuta es el engranaje con acabado punta recta, seguido por el engranaje con acabado punta cónica y por último el engranaje con punta redonda y en ese mismo orden los engranajes con respecto a las demás medidas.

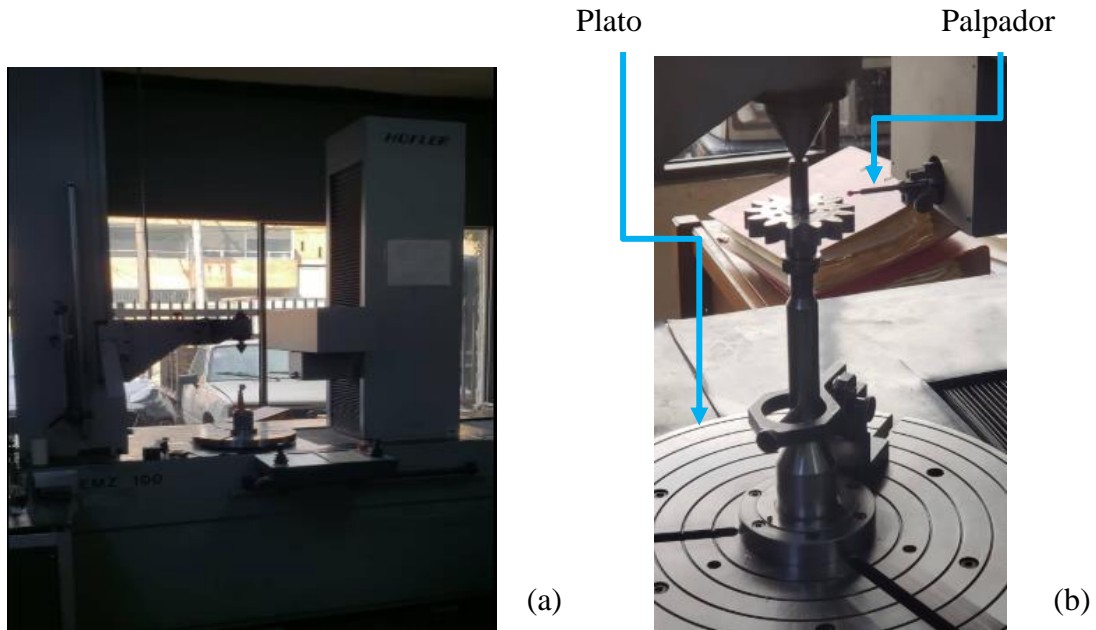
A pesar de que este método es confiable, es importante recalcar que para realizar el estudio de metrología es necesario aplicar un polvo a los materiales que generan demasiada refracción, ya que no permiten la absorción de las ondas que genera el dispositivo; al aplicar este polvillo se obtiene un pequeño error en la medición de las piezas.

4.2.4 Máquina Hofler EMZ 1002

Se utilizó una máquina Hofler EMZ 1002 con una precisión de 0.001mm bajo los parámetros de la norma DIN 3960 Y 3964, siendo una máquina exclusiva para la metrología de engranajes en la empresa Ramfe (Figura 45(a)); para el proceso de medición fue necesario la fabricación de una camisa para la sujeción del engranaje, donde posteriormente se puso sobre un eje y se acopló a la mesa de la máquina, una vez montado y sujetado el eje con la pieza se puso un palpador de acuerdo al módulo del engranaje [16], posteriormente se

configuro la máquina de acuerdo con las medidas del diámetro externo, longitud del diente y el flanco los cuales sirvieron para acotar el desplazamiento del palpador (Figura 45 (b)).

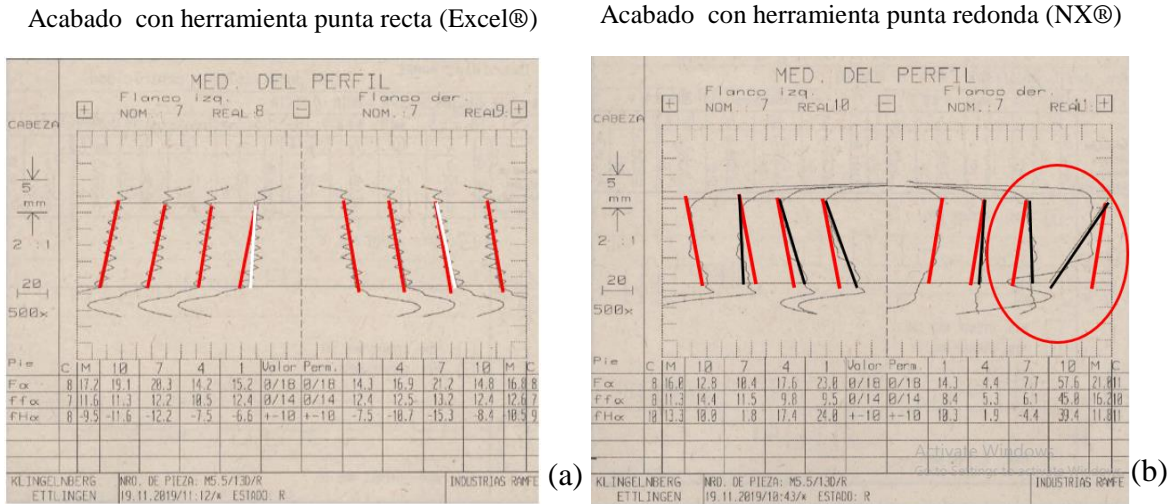
Figura 45. Máquina Hofler EMZ 1002



Fuente: Autor

El proceso de metrología se realizó en cuatro dientes aleatorios y equidistantes a 90° donde se midió la curva de involuta, acabado, flancos, desviación y centricidad de la pieza para poder determinar la calidad del engranaje y definir si el engranaje es o no funcional. (En el Anexo L se podrá ver el informe completo realizado por la empresa Ramfe)

Figura 46. Resultados metrología curva de involuta en la máquina Hofler EMZ1002

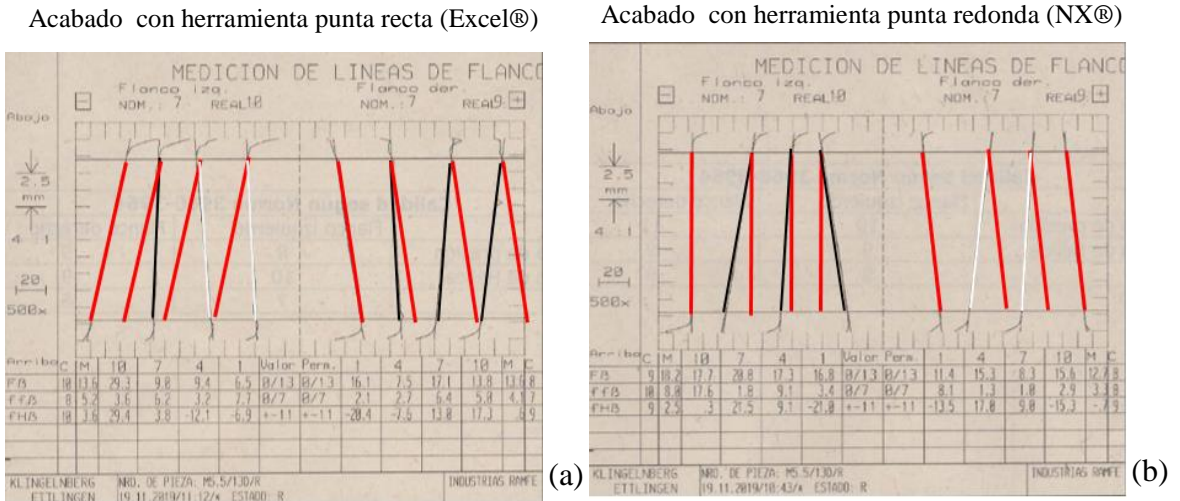


Fuente: Autor

En la Figura 46 (a), se ve el resultado de la metrología de la curva de involuta generada por la herramienta punta recta y el aplicativo de Excel®, donde se ve una variación del flanco izquierdo en el cuarto diente, mientras que en el flanco derecho hay una mínima desviación en el tercer diente. Mientras que la Figura 46 (b), muestra los resultados de medición de la curva de involuta generada por el acelerador de dibujo de NX® y un acabado con la herramienta punta redonda, determinando que la desviación de los dos flancos es desproporcional y sin ningún patrón en los cuatro dientes.

Al analizar los cuatro resultados de la metrología de la curva de involuta, se pudo identificar que el acabado es admisible empezando con la herramienta de punta redonda, seguido por la punta cónica y por último la herramienta de punta recta. Pero con respecto al posicionamiento de la curva de involuta la mejor herramienta es la de punta recta, seguido por la punta cónica y por último la punta redonda.

Figura 47. Resultados metrología flancos del engranaje en la máquina Hofler EMZ 1002



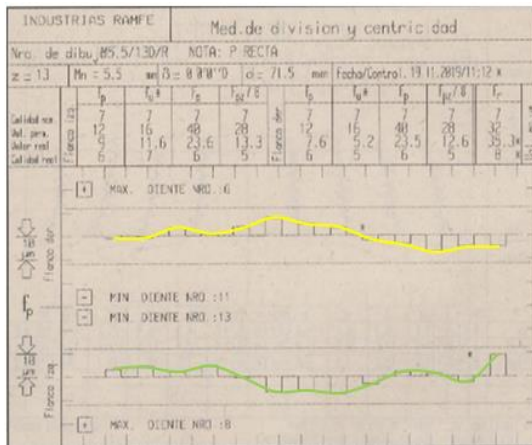
Fuente: Autor

Como se mencionó anteriormente, el proceso de acabado de los flancos y el valle de los engranajes manufacturados por la geometría del aplicativo de Excel®, se hicieron con una misma herramienta, donde se identificó que todas las piezas tienen desviación en los dos flancos. La Figura 47 (a) muestra un patrón en el tercer y cuarto diente del flanco izquierdo y en el flanco derecho se ve una desviación en la misma dirección, pero con un ángulo mayor.

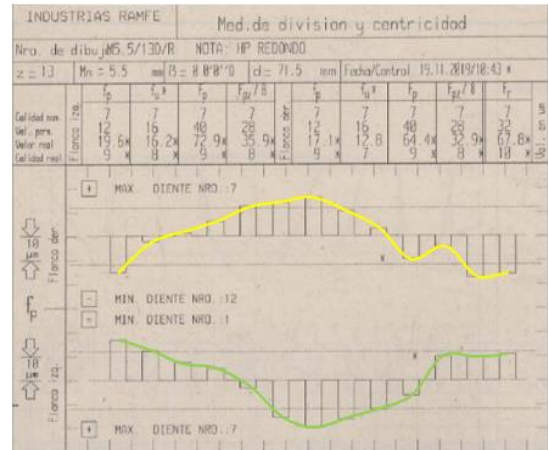
Los resultados del engranaje manufacturado por la geometría del acelerador de dibujo de NX®, se ven en la Figura 47 (b) donde el perfil izquierdo tiene una desviación de posición y ángulo en cada flanco, pero en el flanco derecho se ve un patrón de desviación en el primer y cuarto diente y uno diferente pero igual en el segundo y tercer diente.

Figura 48. Resultados metrología medición de desviación y centricidad del engranaje en la máquina Hofler EMZ 1002

Acabado con herramienta punta recta (Excel®)



Acabado con herramienta punta redonda (NX®)



Fuente: Autor

La Figura 48 muestra la menor y mayor desviación de centricidad, causada por la suma de errores generados por la limitación de los instrumentos de medición de la Universidad Santo Tomas, ya que estos quedaron desfasadas en micras, lo que afectara el funcionamiento de los engranajes.

Tabla 11. Resultados de metrología de calidad según la norma DIN 3960 y DIN 3964 en la máquina Hofler EMZ 1002

Engranaje con geometría del aplicativo de Excel® acabado punta recta		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	8	9
Ángulo de hélice	10	9
Paso	7	6
Engranaje con geometría del aplicativo de Excel® acabado punta cónica		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	4	6
Ángulo de hélice	9	9

Paso	6	7
Engranaje con geometría del aplicativo de Excel® acabado punta redonda		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	10	11
Ángulo de hélice	9	9
Paso	9	9
Engranaje con geometría del 0 acelerador de dibujo de NX® acabado punta redonda		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	5	5
Ángulo de hélice	10	9
Paso	6	6

La norma DIN determina que los engranajes por encima de la calidad de 7 son engranajes con poca calidad para aplicaciones de muy baja precisión según los resultados de la Tabla 11, la manufactura de las piezas están por encima de la medida nominal, con una mayor calidad el engranaje manufacturado por la herramienta punta cónica, seguido de la punta recta y por último la punta redonda.

4.3 CONCLUSIONES DE LA VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ENGRANAJES

- ❖ Se verifico la geometría de los engranajes de dientes rectos, con métodos convencionales y máquinas de metrología especializadas.
- ❖ Al comparar los resultados de la metrología de los engranajes, se recomienda el aplicativo de Excel® por su facilidad en la alteración de la geometría del engranaje por el addendum modificado y los factores de generación de la curva de involuta.
- ❖ La fabricación de engranajes de dientes rectos en máquinas de propósito general con herramienta de geometría estándar es viable.

- ❖ En el caso de manufacturar engranajes de dientes rectos en el centro de mecanizado de la Universidad Santo Tomás, se puede llegar alcanzar una calidad de AGMA de grado 8, siendo estos engranajes funcionales, para aplicaciones de baja precisión.
- ❖ Si se tuvieran equipos de medición con una mayor precisión, para la obtención del cero, concentricidad de las piezas y compensación de la herramienta se podrían manufacturar engranajes más precisos alcanzando una calidad AGMA de grado 6.
- ❖ Es necesario utilizar maquinas especializadas para la metrología de engranajes, puesto que los métodos convencionales no posibilitan generar un informe completo sobre la calidad del mismo.
- ❖ Las máquinas de propósito general permiten manufacturar engranajes con herramienta estándar con costos más altos, pero es apropiado para proyectos de investigación, repuestos, prototipos y engranajes de personalización en masa (Industria 4.0), pero no se recomienda para producciones en serie.
- ❖ Para la fabricación de engranajes de dientes rectos con herramienta de punta redonda se sugiere verificar la geometría de la esfera, ya que se presentaron desviaciones geométricas y dimensionales de la curva de involuta.
- ❖ Se sugiere utilizar la herramienta punta cónica para la obtención de la curva involuta, por su rigidez y posibilidad de generar un mayor número de módulos de engranajes.

5. RECOMENDACIONES

- ❖ Medir la excentricidad de la herramienta una vez montada en el portaherramientas antes del proceso de mecanizado, para considerarla en el proceso de generación de trayectorias.

- ❖ Mejorar los métodos y equipos para determinar el cero de pieza de la materia prima y la compensación de altura de las herramientas.

- ❖ Implementar la manufactura de engranajes de dientes rectos, con herramienta estándar, para empresas que cuenten con tecnología de control numérico en máquinas de cuatro ejes y la presencia de un software CAD CAM.

- ❖ Realizar un estudio sobre el impacto de las variables de proceso de fresado, en el acabado de la superficie del diente del engranaje, así como un estudio de la viabilidad de realizar el proceso de rectificado.

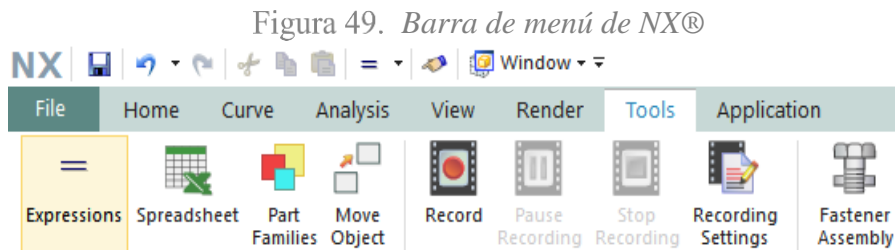
6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Norton, *Design of machinery*, Tercera. New York: Tata McGraw-Hill, 2005.
- [2] N. K. Richard G, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Novena edi. Mexico: Mc Graw Hill, 2008.
- [3] S. Kalpakjian, S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y tecnología de materiales*. Mexico: PEARSON, 2014.
- [4] J. Martinez, *Implementación de operaciones tecnológicas, para la generación de engranajes rectos, en centro de maquinado multieje CNC*. Bogotá Colombia: Universidad Santo Tomas, 2016.
- [5] BOSH, *Manual de la técnica del automóvil*. Alemania, 2005.
- [6] D. W, *Manual de Engranajes*. Massachussetts, 1980.
- [7] SANDVIK, Ed., *Productividad en el mecanizado*. 1985.
- [8] 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 YAMID,” Santo Tomás, 2014.
- [9] E. Cordoba, *Dispositivos de sujeción para maquinas herramientas CNC*. Bogotá Colombia, 1991.
- [10] Micheleti.G.E, *Mecanizado por arranque de viruta*, 1980th ed. Barcelona: Blume, 1980.
- [11] E. Cordoba, *Inspección de calidad de engranajes cilindricos en ambiente industrial automatizado*, Primera. Bogotá Colombia: UNIBIBLOS, 2004.
- [12] Sandvik, “Métodos de recorte y fresado trocoidal.” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [13] R. Timings, *Tecnología de la fabricación*. alfa omega, 2005.
- [14] H. Cherrez, “COMPENSACION DE HERRAMIENTAS EN DIÁMETRO Y ALTURA,” Ecuador, 2016, p. 8.
- [15] R. P. Nobuo S, *Metrology Handbook*, Seagunda e., no. 1. Estados Unidos, 2015.

- [16] R. Mitutoyo, “Centro Metrológico de México,” *CMM*, 2007. [Online]. Available: <https://www.cmm.com.mx/cmms/palpadores.htm>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [17] Prismacim, “El mecanizado trocoidal Vs. el mecanizado tradicional -.” [Online]. Available: <https://prismacim.com/mecanizado-trocoidal-vs-mecanizado-tradicional/>. [Accessed: 15-Nov-2019].

Después de tener la hoja de Excel® finalizada se une al programa NX® como una función de acelerador de dibujo del mismo programa; para poder enlazar el documento de cálculo de engranajes de dientes rectos en el programa NX® se hacen los siguientes pasos:

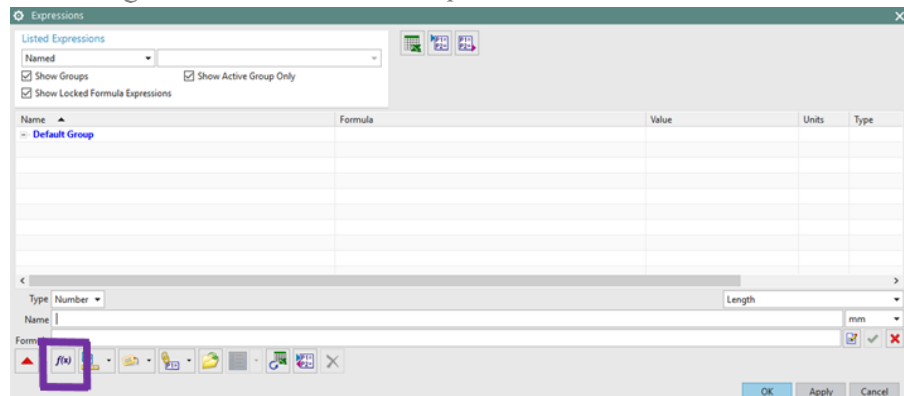
- 1) Abrir el programa, crear el archivo con el nombre y la carpeta para guardar todos los avances.
- 2) En la parte superior del programa NX® en la barra de herramientas, se selecciona la opción de tools y posteriormente la herramienta de expressions como se ve en la Figura 49.



Fuente: Autor

- 3) Automáticamente se despliega una ventana y se va a la opción de functions que está en la parte inferior izquierda y se da clic (Figura 50).

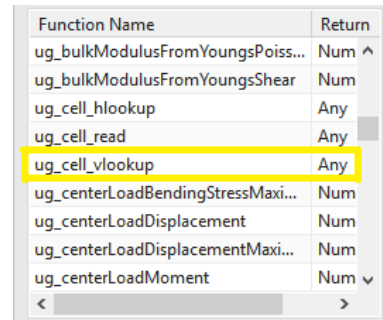
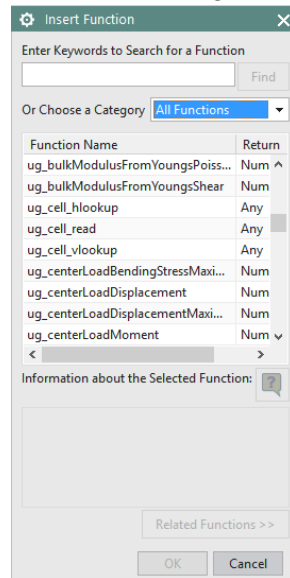
Figura 50. Herramienta de parametrización de NX®



Fuente: Autor

- 4) Una vez seleccionado, se abrirá una nueva ventana llamada Insert Function; en la opción de Or Choose a Category se busca y selecciona la opción All Functions, donde nos arrojará todas las funciones que maneja el programa de NX® como se ve en la Figura 51 (a), pero en este caso se utiliza la función “UG_CELL_VLOOKUP muy similar a la función de búsqueda en Excel® como se ve en la Figura 51 (b).

Figura 51. Menú de funciones de NX®



(a)

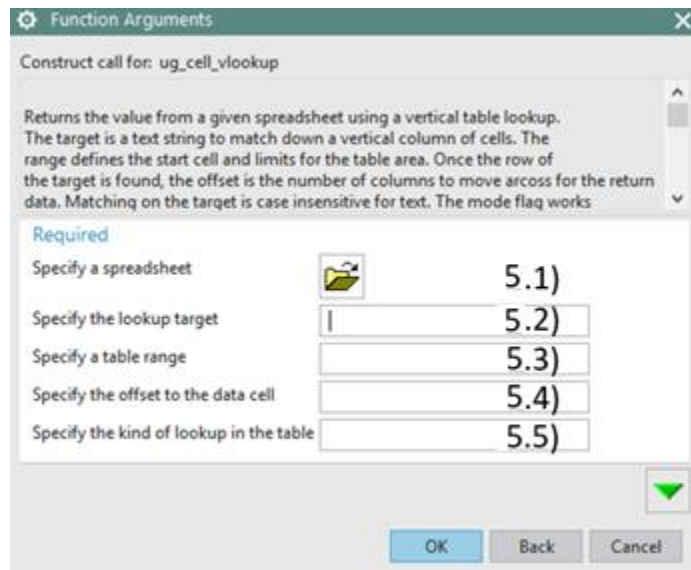
(b)

Fuente: Autor

- 5) Al seleccionar esta función, el programa NX® abre una nueva pestaña, la cual se aprecia en la Figura 52 donde se debe diligenciar la siguiente información:
- 5.1) Specify a spreadsheet: Se da clic en la carpeta y se busca el documento de Excel® que se quiere enlazar con el programa NX®.
 - 5.2) Specify the lookup target: En esta celda se pone el nombre de la fila donde el programa buscará los datos ya calculados en la aplicación de Excel®.
 - 5.3) Specify a table range: Aquí se pone el rango de la fila de los datos, de donde inicia hasta donde finaliza la búsqueda de los datos.
 - 5.4) Specify the offset to the data cell: En este espacio se pone el número de la celda según la posición de la fila.

5.5) Specify the kind of lookup in the table: Se debe poner la precisión de la celda que se quiere buscar.

Figura 52. Menú de parametrización de NX® a Excel®



Fuente: Autor

6) Después de hacer el paso 5 completo y darle clic en el botón ok; automáticamente se despliega una ventana como se ve en la Figura 53 con diferentes espacios para diligenciar de la siguiente forma:

6.1) Type: Se selecciona el tipo de dato que se va a introducir.

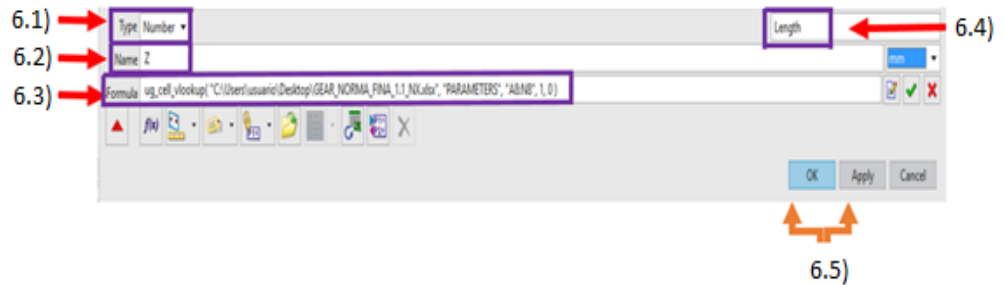
6.2) Name: Se pone el nombre de la variable.

6.3) Formula: Esta celda de diligencia instantáneamente después de hacer el paso 6 completo.

6.4) En la parte superior derecha se selecciona el tipo de unidad de dato que se va a utilizar.

6.5) Se le da aplicar y de esta forma queda registrada la variable en el programa NX®.

Figura 53. Configuración de la variable de entrada a NX®



Fuente: Autor

- 7) Si se quiere meter otra variable, lo único que se debe hacer es cambiar el número de búsqueda de la celda en el paso 5 fila (5.4), si el dato está en la misma fila que los datos anteriores; se debe cambiar el nombre de la variable paso (6.2), el tipo de dato paso (6.1) y el tipo de unidad según el caso paso (6.3).
- 8) Si el tipo de dato que se quiere meter no se encuentra en una celda de la misma fila que se está trabajando, se debe cambiar el Target paso (5.2) el rango paso (5.3) y repetir el paso 7. (Desde el (6.1)).

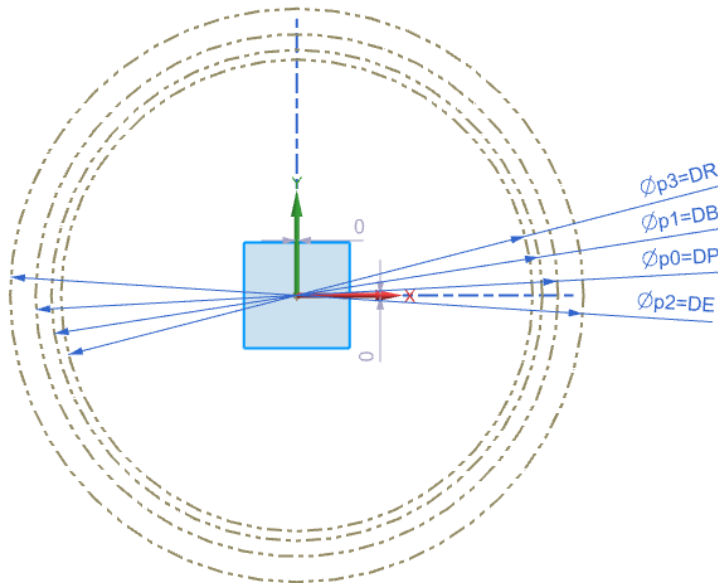
Anexo B Método de diseño de dibujo.

Durante el proceso de investigación se encontraron dos métodos de dibujo los cuales dependen del número de dientes, si el número de dientes es normal o muy pequeño para un determinado módulo se utiliza el método de diseño de dibujo uno, pero si se presenta un número de dientes muy alto se observa que el diámetro base (DB) cambia de posición con el diámetro de raíz (DR) siendo el método de diseño de dibujo dos.

MÉTODO DE DISEÑO DE DIBUJO UNO

- 1) Inicialmente se generan los cuatro diámetros funcionales para el diseño del engranaje como es el diámetro externo (DA), diámetro primitivo (D), diámetro base (DB) y diámetro de raíz (DF) a modo de líneas de referencia como se ve en la Figura 54, lo que permitió dimensionar el largo del diente e identificar que la curva de involuta nace desde el diámetro base (DB) y termina en el diámetro externo (DA).

Figura 54. *Generación de diámetros del engranaje método uno*

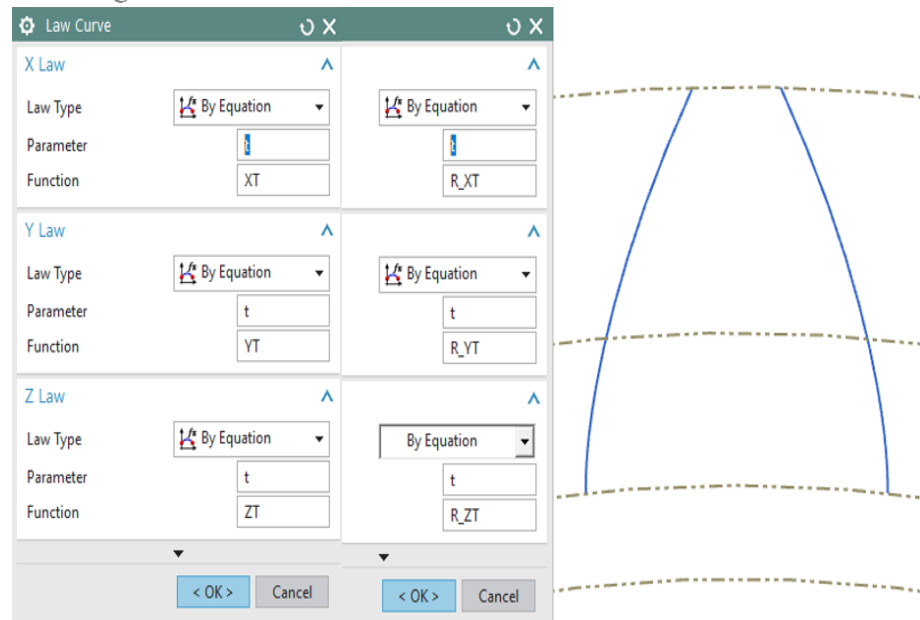


Fuente: Autor

- 2) Ya establecidos los diámetros del engranaje, se procede a introducir las ecuaciones paramétricas obtenidas en el documento de Excel® e integradas a NX®; para poder

dibujar la curva de involuta se utiliza la función (*Law Curve*) que previamente tienen incorporadas las ecuaciones paramétricas de la curva como se ve en la Figura 55.

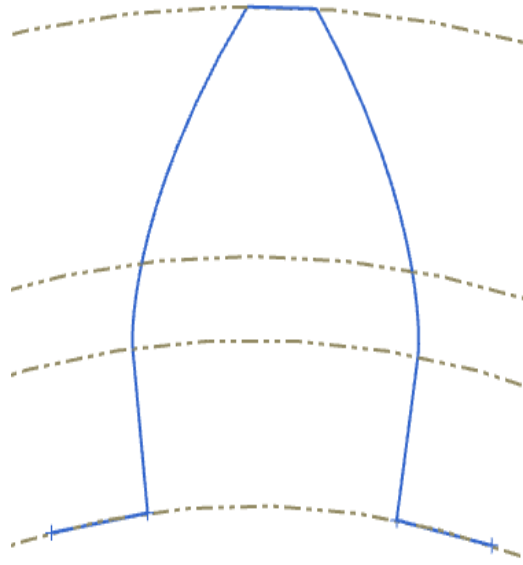
Figura 55. *Generación de la curva de involuta en NX®*



Fuente: Autor

- 3) Después de tener la curva de involuta en el programa de NX® como se ve en la figura 10, se establecen los puntos del flanco y el valle, uniéndose las líneas de la curva de involuta a los puntos P1_IZQ y P1_DER, luego se unen los puntos P1_IZQ a P2_IZQ y P1_DERE a P2_DERE por medio de líneas de arco con ecuaciones en $X=0$, $Z=0$ y $Y= (DR/2)$ con origen en $(0,0,0)$, obteniendo una geometría del diente del perfil como se ve en la Figura 56.

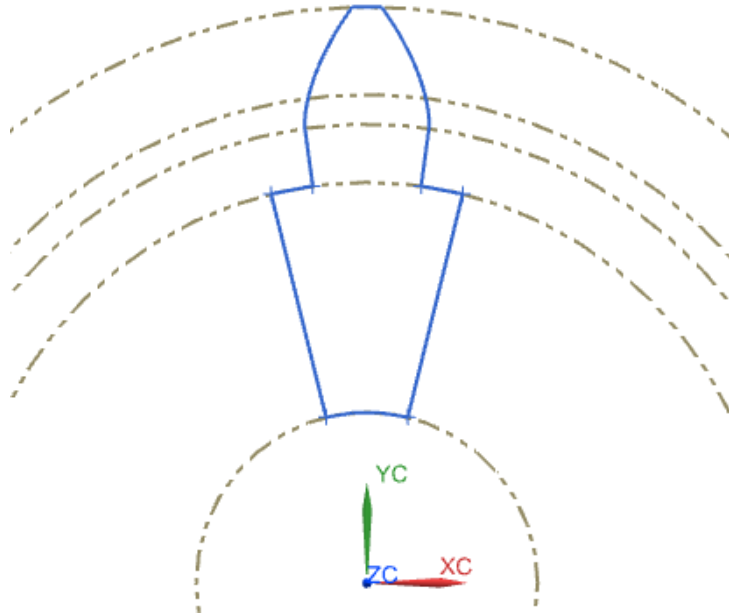
Figura 56. Flanco y valle del diente en NX®



Fuente: Autor

- 4) Para poder cerrar la geometría del perfil del diente del engranaje lo que se debe hacer es utilizar la línea de arco de tres puntos con coordenadas en $(0,0,0)$ y un punto final en la parte superior de la curva de involuta para aplicar una restricción geométrica y la línea de arco no sea superior a las líneas de involuta, poniendo en punto medio las siguientes coordenadas $X=0, Z=0$ y $Y=(DA/2)$ como se ve en la Figura 56.
- 5) Como se observa en la Figura 56 ya se tiene la geometría del diente recto del engranaje, lo que se debe hacer es establecer los puntos del diámetro del eje y hay si poder cerrar el perfil del diente obteniendo un diente del engranaje como se ve en la Figura 57.

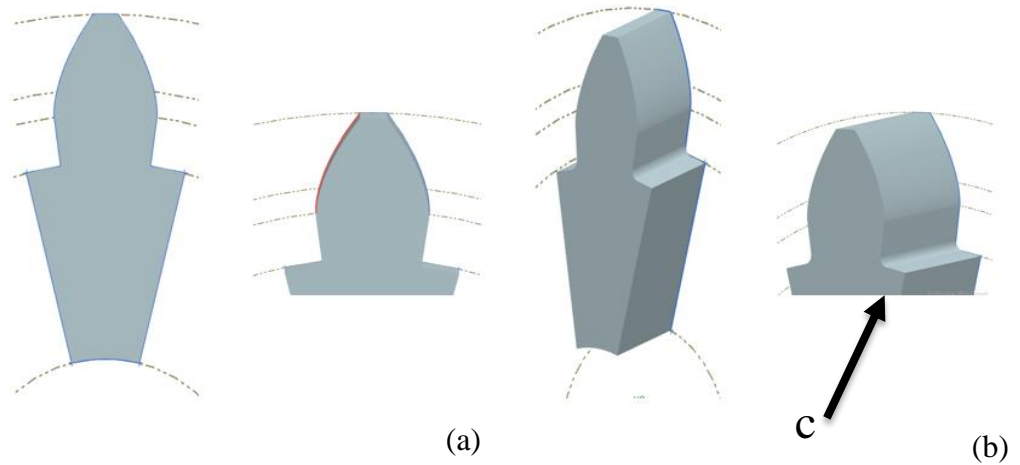
Figura 57. Perfil del diente en NX®



Fuente: Autor

- 6) Al tener la geometría del diente cerrado se hace una extrusión, lo que da una pieza en 3D como se ve en la Figura 58(a); permitiendo generar un pequeño radio entre el flanco y el valle del engranaje conocida como juego de cabeza designado con la sigla (c) como se ven en la Figura 58(b) dando un diente con una mayor resistencia a las fuerzas ejercidas en él.

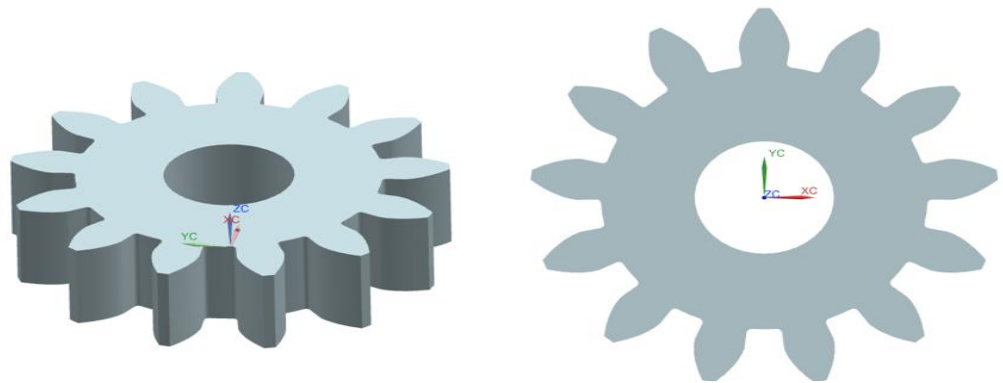
Figura 58. *Extrusión del diente y juego de cabeza*



Fuente: Autor

- 7) Después de tener la geometría del diente del engranaje con todas sus características se utiliza la función de (*Associative Copy*) seleccionando el método *Patten Geometry* con un diseño circular, un vector perpendicular al plano y como punto de referencia (0,0,0) con una cantidad de dientes igual a la variable Z y un ángulo de paso con un valor de AP , al tener todos estos valores se le da en OK, automáticamente el programa genera el engranaje final como se ve en la Figura 59 según los valores de los cálculos de la aplicación de Excel® y con las ecuaciones paramétricas

Figura 59. *Generación del engranaje en NX®*



Fuente: Autor

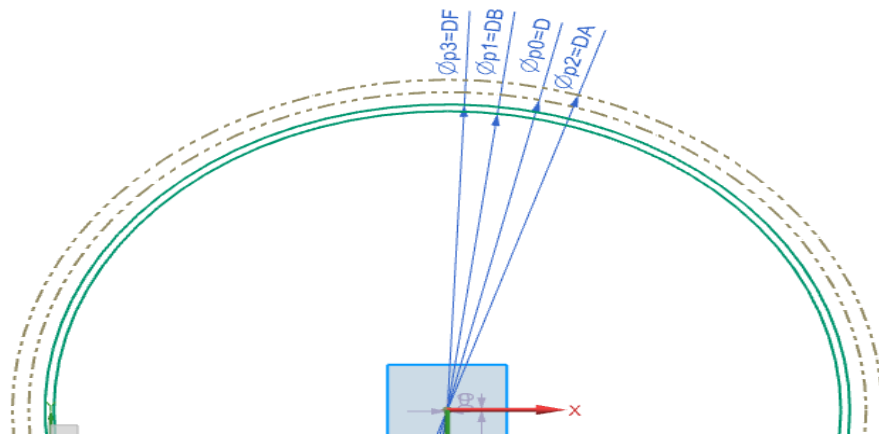
Después de enlazar el programa de Excel® con el programa NX® y hacer los pasos para la construcción de un engranaje de dientes rectos en el programa se obtiene una geometría como la que se ve en la Figura 59, lo cual evidencia que la aplicación y el método de dibujo están funcionando correctamente.

MÉTODO DE DISEÑO DE DIBUJO DOS

Como se vio en el método de diseño de dibujo uno, al enlazar el programa NX® con Excel® se generó un engranaje y a su vez se comprobó el funcionamiento donde se pudo determinar que si el número de dientes es muy alto con respecto a un determinado módulo la geometría del engranaje cambia, ya que el diámetro de raíz (DF) se intercambia de posición con el diámetro base (DB) lo cual genera una geometría diferentes para el proceso de diseño de dibujo, a continuación, se explicara la diferencia geométrica de dibujo que no altera de ninguna manera el proceso de manufactura ni el funcionamiento.

- 1) Después de tener las variables y ecuaciones establecidas en el programa NX®, se crea un sketch donde se ponen los 4 diámetros para la construcción de los engranajes con la diferencia que para la construcción de este método, el diámetro de raíz (DF) toma la posición del diámetro base (DB) y el diámetro base (DB) toma la posición del diámetro de raíz (DF) dejando estos dos diámetros con líneas activas mientras que los otros dos diámetros se dejan como líneas de referencia, como se ve en la Figura 60.

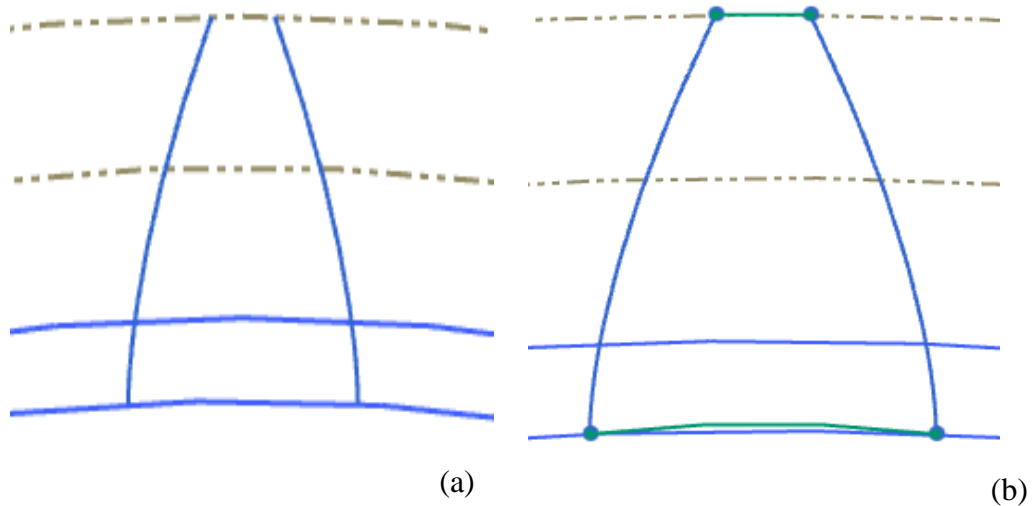
Figura 60. *Generación de diámetros del engranaje método dos*



Fuente: Autor

- 2) Después de realizar el paso anterior, se debe implementar la curva de involuta por medio de ecuaciones paramétricas en el programa de diseño NX® como se hizo en el paso 2 del método de diseño uno obteniendo una geometría como se ve en la Figura 61 (a) respetando el intercambio de los diámetros.

Figura 61. *Generación de la curva de involuta en NX®*

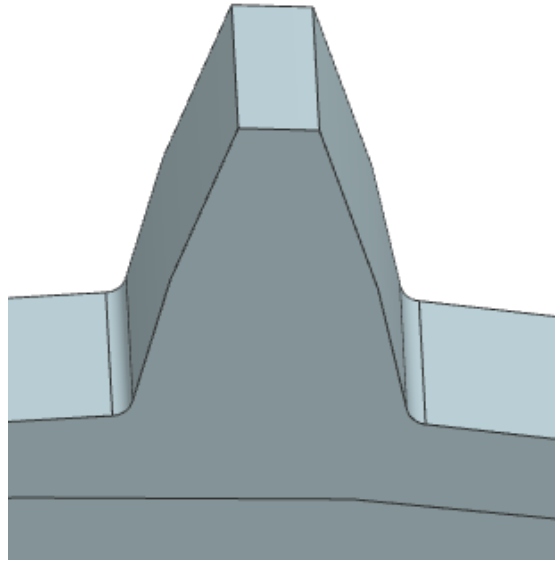


Fuente: Autor

- 3) Para poder cerrar la geometría del perfil del diente del engranaje como se ve en la Figura 61(a) lo que se debe hacer es utilizar la línea de arco de tres puntos con coordenadas en $(0,0,0)$ y punto final en uno de los extremos superiores de la curva de involuta, aplicando la restricción geométrica que la línea de arco no sea superior a las líneas de involuta, para ello ponemos en punto medio las siguientes coordenadas: $X=0, Z=0$ y $Y=(DA/2)$ obteniendo la geometría del diente como se ve en la figura 16 (b).
- 4) Al tener la geometría del diente cerrado como se ve en la Figura 61(b) se utiliza la opción de extruir generando un sólido de circunferencias y el perfil de un diente,

además se genera el radio entre la curva de involuta y el diámetro de raíz (DF) conocido como juego de cabeza, como se ve en la Figura 62.

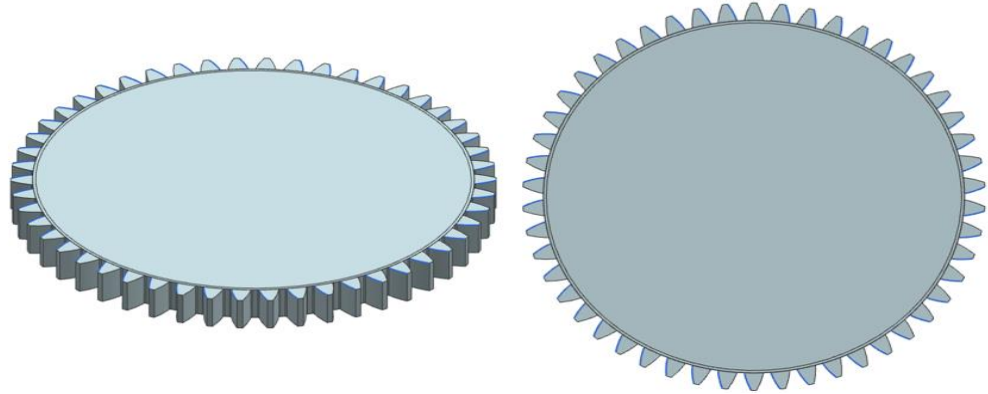
Figura 62. *Extrusión del diente del engranaje*



Fuente: Autor

- 5) Obteniendo la pieza que se ve en la Figura 62; se utiliza la función de (*Asssociative Copy*), seleccionando el método *Patten Geometry* lo cual nos permite generar la réplica de los demás dientes del engranaje con un diseño circular, un vector perpendicular al plano y punto de referencia de (0,0,0), con una cantidad de dientes igual a la variable Z y un ángulo de paso con un valor de AP , al tener todos estos valores se le da en OK y genera el engranaje final con los valores de los cálculos de la aplicación de Excel® y con las ecuaciones paramétricas obteniendo una geometría de dibujo como la que se ve en la Figura 63.

Figura 63. Generación del engranaje con el método dos



Fuente: Autor

Es así como se genera el engranaje de dientes rectos con el método de dibujo dos rectificando que las aplicaciones funcionen de forma correcta; para la selección del método de dibujo es necesario establecer en el documento de Excel® la cantidad de dientes y el módulo del engranaje, como ayuda adicional de la aplicación de Excel® se creó una hoja llamada (Selección método de diseño) donde muestra la diferencia geométrica de dibujo de los engranajes y determina el método que se debe utilizar para la generación del engranaje en el programa NX® como se ve en la Figura 64.

Figura 64. Selección de método de diseño en Excel® según el número de dientes

Para determinar el metodo de diseño de dibujo de los engranajes lea y haga los pasos correspondientes

En la hoja de calculos digite el numero de dientes y el modulo donde el excel le calculara todos los datos correspondientes para la construccion del engranaje (el angulo de presion es de 20 segun la norma)	
Si el Diametro de Raiz (DR) es menor o igual al Diametro Base (DB) utilice el metodo uno (1) para el diseño	
Si el Diametro de Raiz (DR) es mayor o igual que el Diametro Base (DB) utilice el metodo dos (2) para el diseño	
Diametro Raiz (DR)	262.163
Diametro Base (DB)	258.4154707
DISEÑO CON EL METODO DOS (2) SEGUN DIAMETROS	

1

$DF < DB$

2

$DF \geq DB$

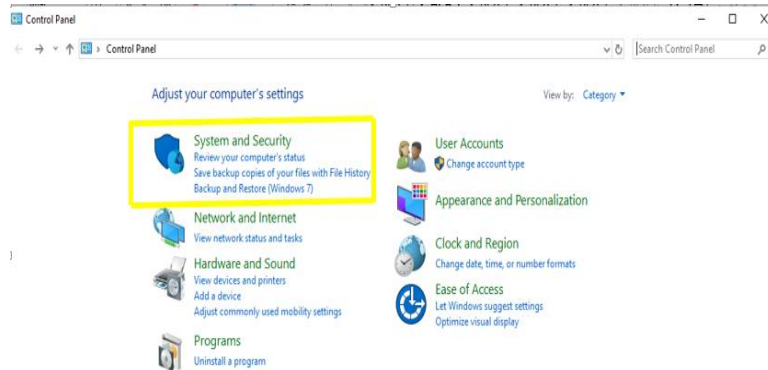
Fuente: Autor

Anexo C Activación de acelerador de dibujo de NX®

Después de tener instalado el programa NX® en este caso la versión 2010 se debe tener en cuenta que el programa viene sin los complementos de aceleración de dibujo y diseño, es por esto por lo que, para generar un engranaje, arandela, etc., es necesario instalar los complementos que le faltan al programa, para eso se deben realizar los siguientes pasos:

- 1) Tener el programa cerrado
- 2) Ir al buscador y buscar panel de control
- 3) En el panel de control, se selecciona la opción de sistema y seguridad como se ven en la Figura 65.

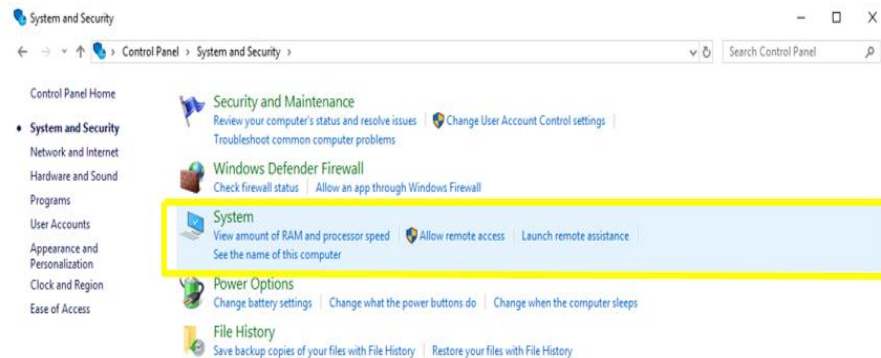
Figura 65. Configuración computador (panel de control)



Fuente: Autor

- 4) Automáticamente se abrirá una ventana donde se debe seleccionar herramienta de sistema como se ve en la Figura 66.

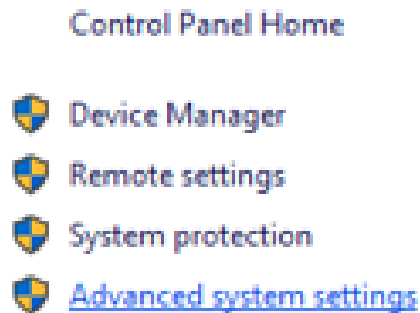
Figura 66. Configuración computador (ajustes del sistema)



Fuente: Autor

- 5) Al dar clic sobre dicha opción se abre una ventana con todas las propiedades del computador, en la parte superior izquierda nos da un listado de opciones, donde se escoge la configuración avanzada del sistema como se ve en la Figura 67.

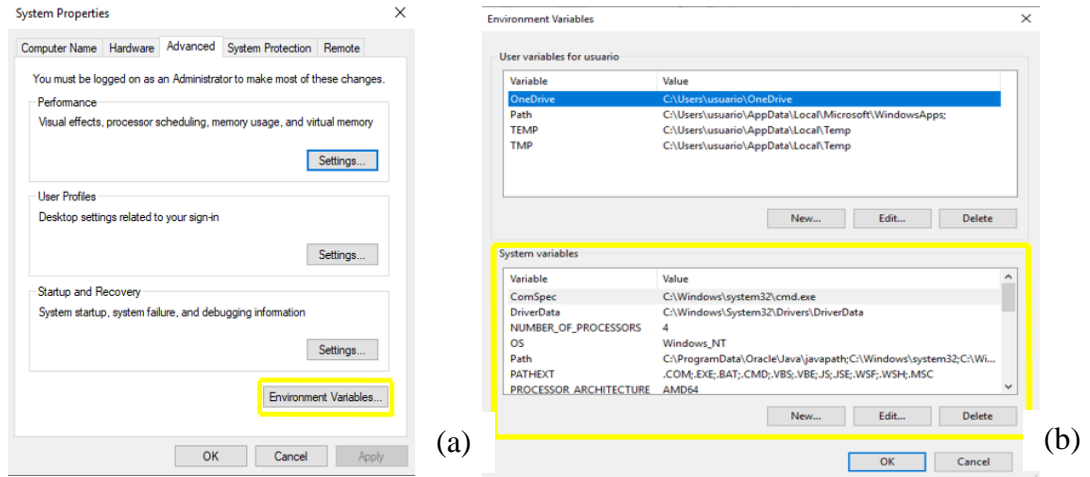
Figura 67. Configuración computador (ajustes avanzados del sistema)



Fuente: Autor

- 6) En este momento se desplegará una nueva ventana y en la parte inferior derecha se busca la opción de variables de entorno
- 7) En la opción de variables de entorno se debe seleccionar la ventana denominada variables del sistema como se ve en la Figura 68(a).
- 8) En la opción de variables del entorno es debe seleccionar la ventana denominada Variables del Sistema como se ve en la Figura 68(b).

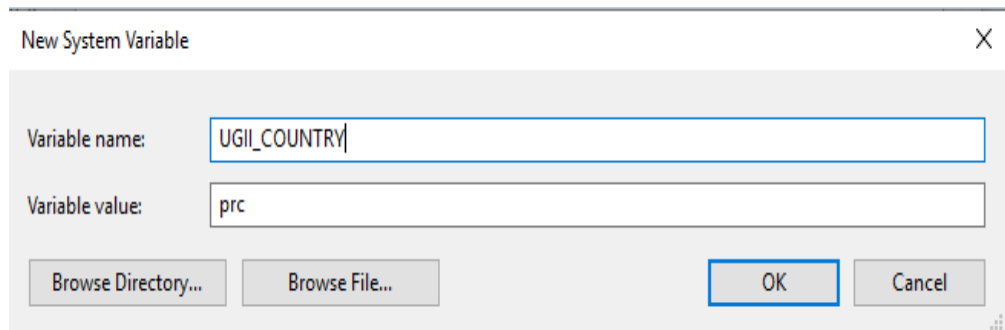
Figura 68. Configuración computador (variables del entorno)



Fuente: Autor

- 9) Instantáneamente se tendrá una ventana para diligenciar con los datos de la nueva variable, en este caso, Nombre de la variable en mayúsculas: UGII_COUNTRY y con valores de variables en minúscula: prc como se ve en la Figura 69.

Figura 69. Configuración variable de entrono para la activación del acelerador de NX®



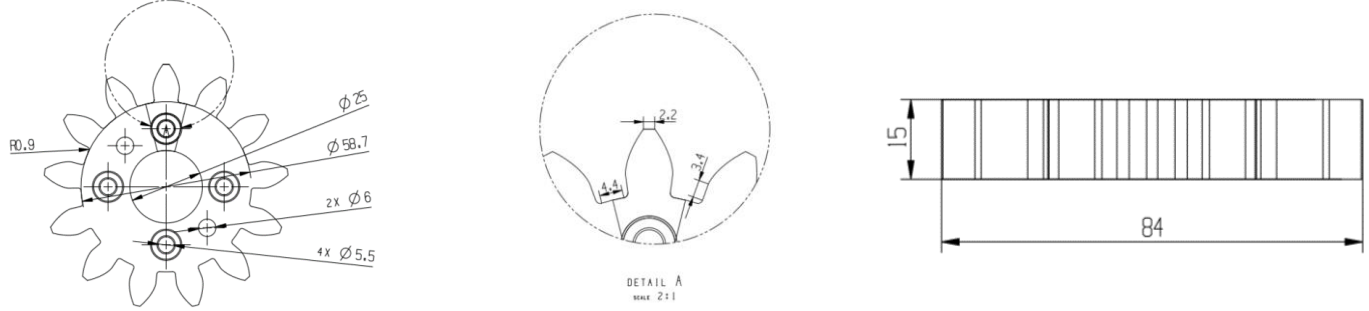
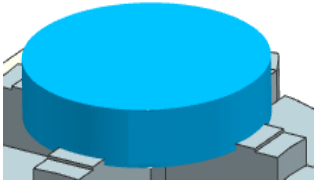


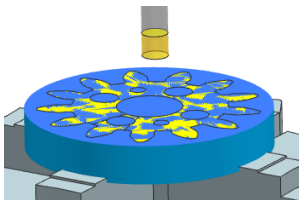
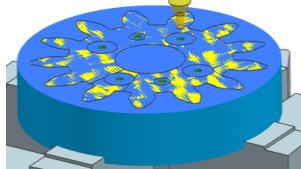
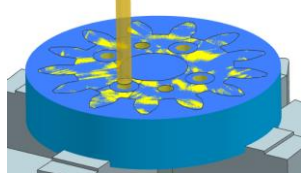
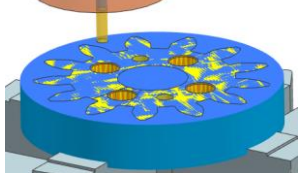
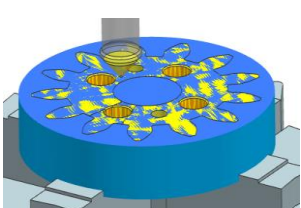
Fuente: Autor

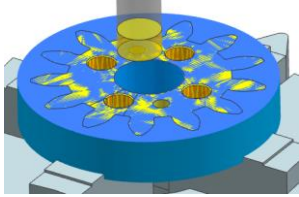
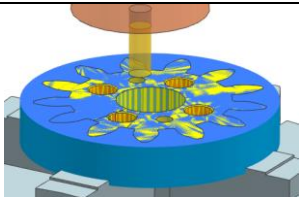
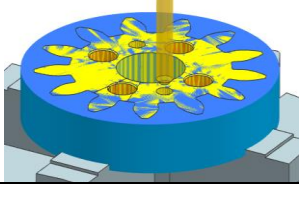
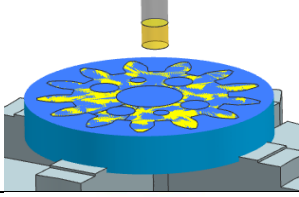
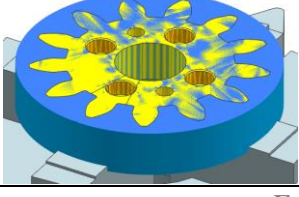
- 10) Al hacer el paso 9 del Anexo C, se procede abrir el programa y automáticamente el menú cambiara su forma y algunas herramientas de acceso directo cambiaran de ubicación.

Anexo D Hojas de proceso mecanizado preparación materia prima

Tabla 12. Hoja de procesos preparación de materia prima

Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> 		<u>Sebastián C. Chacón Vargas</u>					
Material en bruto(mm): Ø90x21(mm)				Preparación materia prima		Fecha: 00/00/2000			
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.			Facultad de Ingeniería Mecánica				
Máquina		Centro de mecanizado multieje Finetech							
									
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	Nº RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	<u>1.1</u>	Pieza con medidas en Bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR					



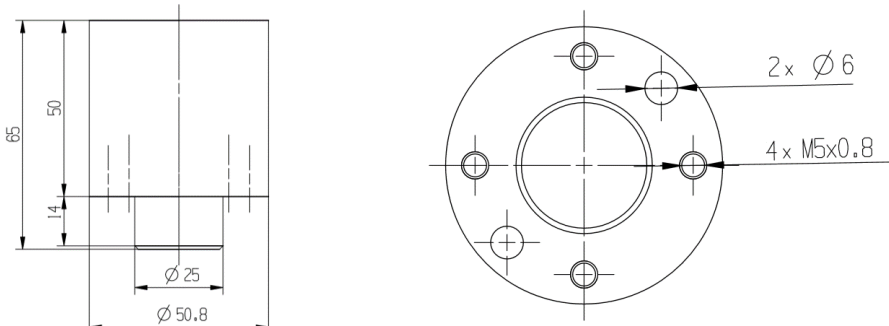
C E N T R O D E M E C A N I Z A D O M U L T I E J E S C N C	<u>1.2</u>	Planeada cara superior en G54		Herramienta N°: 15 Fresa punta plana. Diámetro 10mm. Filos 3	0.05	572.9578	3813.72	120	1
	<u>1.3</u>	Centro Punto en G54		Herramienta N°: 2 Centro Punto 3.15mm	0.03	303.1522	10105	100	0.5
	<u>1.4</u>	Taladrado en G54		Herramienta N°: 5 Broca 5.5mm	0.025	115.749	2314.98	40	3
	<u>1.5</u>	Abocardado en G54		Herramienta N°: 11 Fresa punta plana Diámetro 4mm	0.025	477.4648	9549.29	120	
	<u>1.6</u>	Avellan en G54		Herramienta N°: 1 Nine9 Diametro 6.5mm	0.03	82.2706	2742.36	56	1.5

<u>1.7</u>	Desbaste Agujero único en G54		Herramienta N°: 19 Escariador punta plana Diámetro 16mm Filos 2	0.1	477.46	2387.33	120	1
<u>1.8</u>	Acabado Agujero único en G54		Herramienta N°: 13 Escariador punta plana Diametro 8mm	0.05	954.929	4774.65	120	1.5
<u>1.9</u>	Rimas G54		Herramienta N°: 7 Rima Diametro 6mm Filos 6	0.08	2291.8312	477.46	9	3
<u>1.10</u>	Planeado cara inferior en G54		Herramienta N°: 15 Fresa punta plana. Diámetro 10mm. Filos 3	0.05	572.9578	3813.72	120	1
<u>1.11</u>	Desmontaje pieza final		Verificación de mecanizado de la materia prima, verificación de medidas del agujero único					

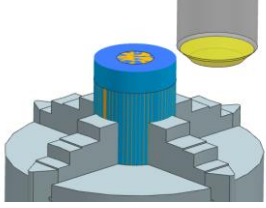
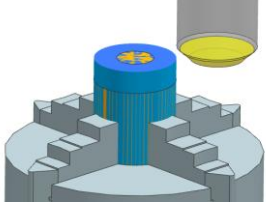
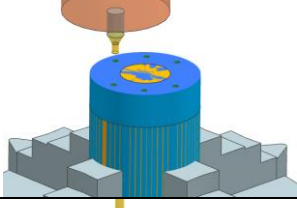
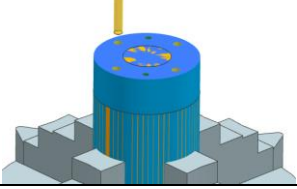
Fuente: Autor

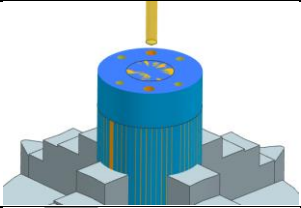
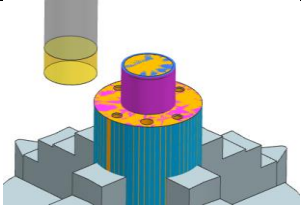
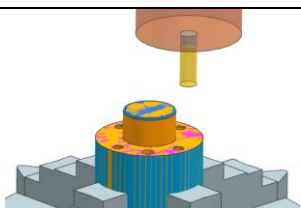
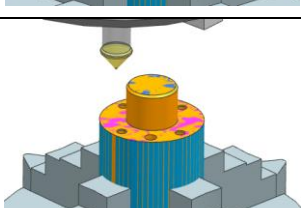
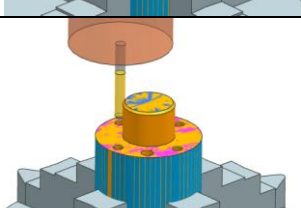
Anexo E Hojas de proceso mecanizado preparación dispositivo de sujeción

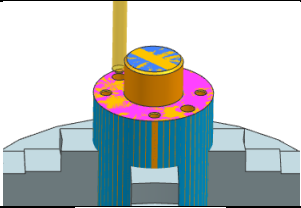
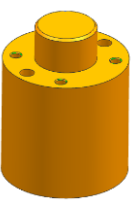
Tabla 13. Hoja de procesos dispositivo de sujeción

Material: acero 1045		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Dispositivo de sujeción</p> 		Sebastián C. Chacón Vargas					
Material en bruto(mm): ØMMMMxM M(mm)				Fecha: 00/00/2000					
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.		Facultad de Ingeniería Mecánica					
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech							
									
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	2.1	Pieza con medidas en Bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR					

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

C E N T R O D E M E C A N I Z A D O M U L T I	<u>2.2</u>	Planeada cara inferior en G54		Herramienta N°: 21 Fresa de planeado. Diámetro 50mm. 4 insertos	0.1	203.7183	509.3	80	1
	<u>2.3</u>	Planeado cara superior en G54		Herramienta N°: 21 Fresa de planeado. Diámetro 50. 4 insertos	0.1	203.7183	509.3	80	1
	<u>2.4</u>	Centro Punto en G54		Herramienta N°: 2 Centro Punto 3.15mm	0.03	60.6304	2021.01	20	0.5
	<u>2.5</u>	Taladrado en G54 Tornillos		Herramienta N°: 4 Broca 4.2mm	0.025	151.5761	3031.52	40	3

E J E S C N C	<u>2.6</u>	Taladrado en G54 Rimas		Herramienta Nº:5 Broca 5.5mm	0.025	115.749	2314.98	40	3
	<u>2.7</u>	Desbaste diametral Eje en G54		Herramienta Nº: 20 Escariador punta plana Diámetro 25mm insertos 3	0.06	275.0197	1527.89	120	0.5
	<u>2.8</u>	Acabado Eje en G54		Herramienta Nº: 13 Escariador punta plana Diámetro 8mm insertos 4	0.02	318.301	3978.87	100	1
	<u>2.9</u>	Avellan en G54		Herramienta Nº: 1 Nine9 Diametro 6.5mm	0.03	117.529	3917.66	80	0.5
	<u>2.10</u>	Rosca en G54		Herramienta Nº: 9 Macho M5x0.8	0.8	305.5775	381.97	6	3

<p><u>2.11</u></p>	<p>Rimas en G54</p>		<p>Herramienta Nº: 7 Rima Diametro 6mm Filos 6</p>	<p>0.8</p>	<p>2291.8312</p>	<p>477.46</p>	<p>9</p>	<p>3</p>
<p><u>2.12</u></p>	<p>Desmontaje pieza final</p>		<p>Verificación de mecanizado del dispositivo de montaje y sujeción, verificación de medidas de cara y altura del eje</p>					

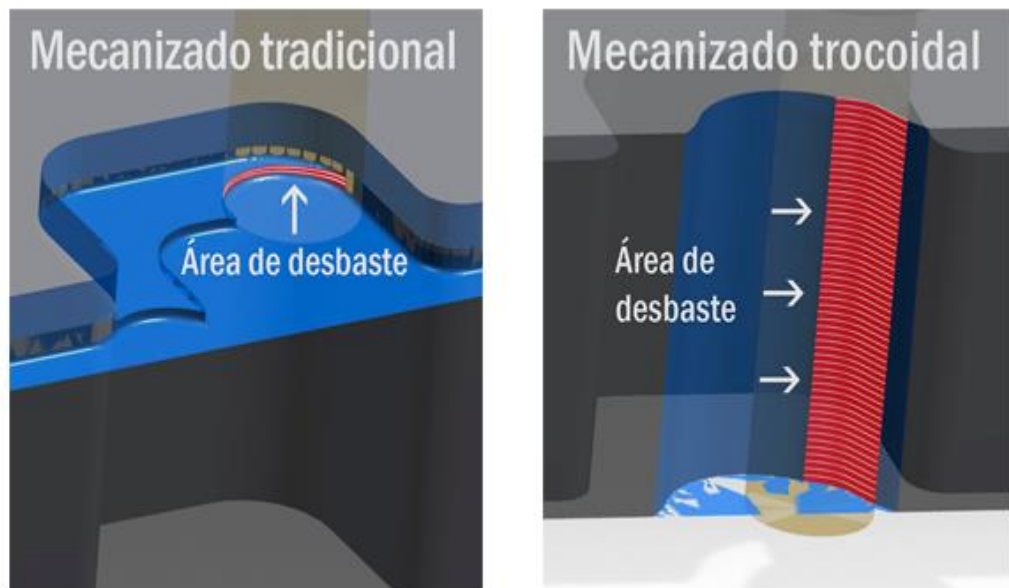
Fuente: Autor

Anexo F Mecanizado trocoidal

El mecanizado trocoidal es uno de los sistemas de desbaste más eficiente cuando se trata de quitar sobre material, aumentando hasta un 60% el volumen de extracción de viruta que a su vez garantiza un desgaste del filo de la herramienta de forma uniforme incrementando la vida útil de la herramienta, generando así un mecanizado más suave el cual disminuye las vibraciones (Figura 70).

Este sistema de desbaste suele ser más eficiente que el mecanizado tradicional ya que se disminuyen tiempos en el proceso de manufactura [17] como se ve en Figura 70 disminuyendo el y el uso de refrigerante.

Figura 70. *Mecanizado Trocoidal*

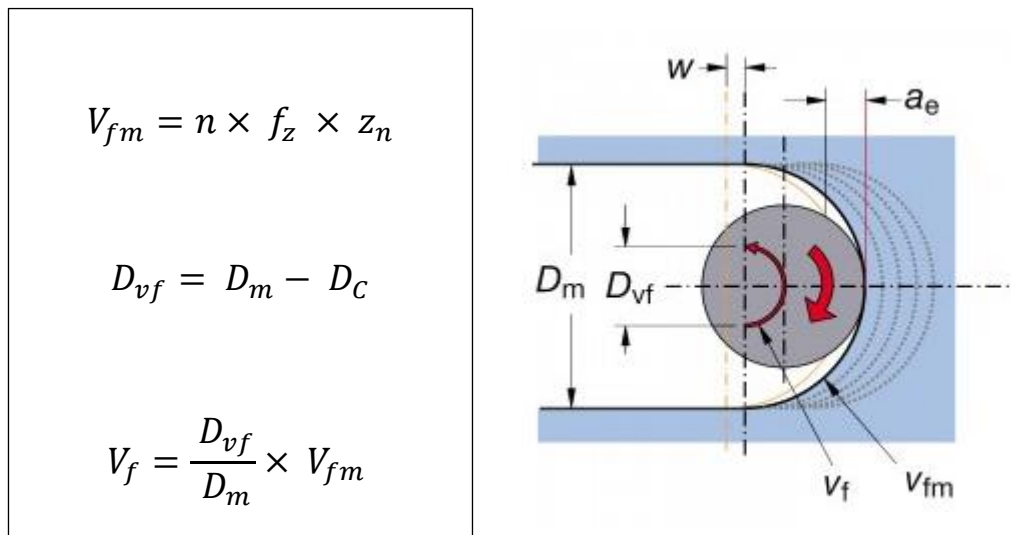


Fuente: [17]

Para garantizar un mecanizado trocoidal es necesario calcular el avance, las rpm, longitud de filo de la herramienta para mecanizar, número de pasadas con las ecuaciones de la Figura 71 y las siguientes condiciones de maquinado [10]:

- 1) Profundidad de corte radial reducida a_e (*Maximo el 10% del D_c*).
- 2) Gran profundidad de corte $a_p = 2 \times D_c$
- 3) Mayor avance V_f (*alto*)
- 4) Velocidad de corte V_c (*10 veces superior a la convencional*)
- 5) Avance inicial por diente $F_z = 0.1mm$
- 6) Para la configuración en el programa NX® es necesario establecer los siguientes parámetros de corte, que también se pueden analizar según la imagen

Figura 71. Ecuaciones de configuración mecanizado trocoidal NX®

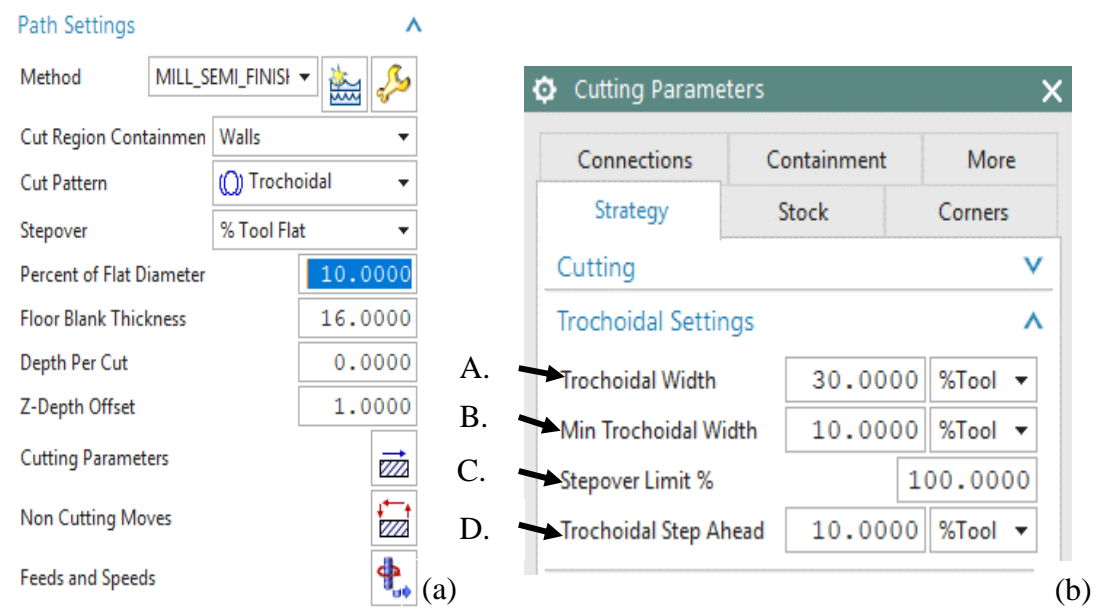


Fuente: [10]

Para la configuración del mecanizado trocoidal en el programa NX® se establecieron los siguientes parámetros

- 1) Como se ve en la Figura 72 (a) se establece un parámetro de corte en forma trocoidal siendo esta la trayectoria que hará la herramienta para la operación.
- 2) Una de las restricciones o condiciones para utilizar el método de mecanizado trocoidal es el uso del 10% del diámetro del corte de la herramienta, como se ve en la Figura 72 (a)
- 3) Una vez seleccionada la parte a mecanizar y configurado los parámetros de la Figura 72 (a) se deben establecer los parámetros de la herramienta de la Figura 72 (b) los cuales son:
 - A. Un ancho del diámetro de corte de un 30%
 - B. Un mecanizado trocoidal de solapamiento del 10% de la herramienta
 - C. Un límite de paso a paso de corte del 100% del diámetro de la herramienta
 - D. Un avance de la herramienta del 10% entre cada pasada

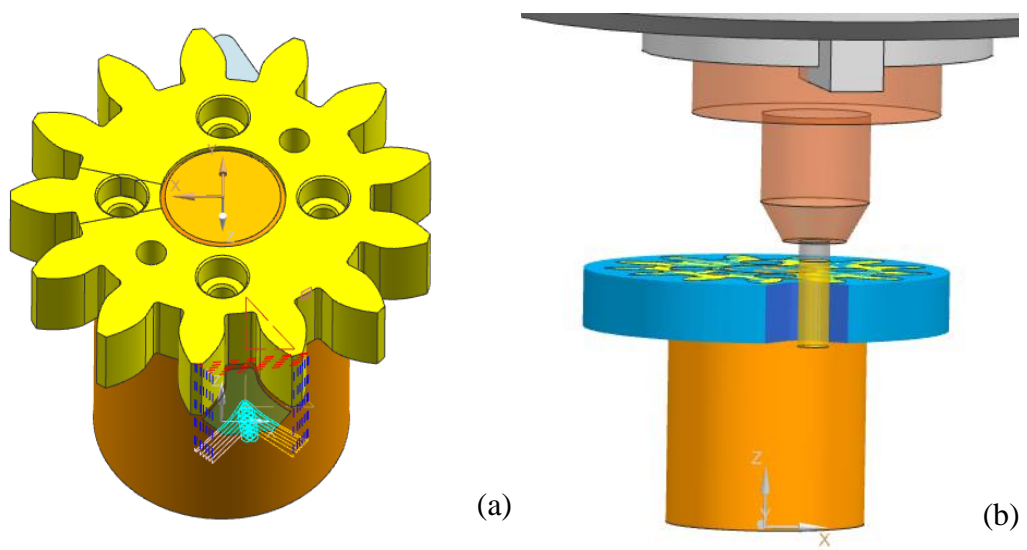
Figura 72. Configuración mecanizado trocoidal NX®



Fuente: Autor

Al tener todas las condiciones o parámetros de configuración en el programa NX® lo que se tiene que hacer es configurar los parámetros de corte de la herramienta según el catalogo y generar la trayectoria de la herramienta donde se podrá comprobar un avance corto como se ve en la Figura 73 (a) y el uso de la totalidad del filo del corte de la herramienta como se ve en la Figura 73 (b) [10].



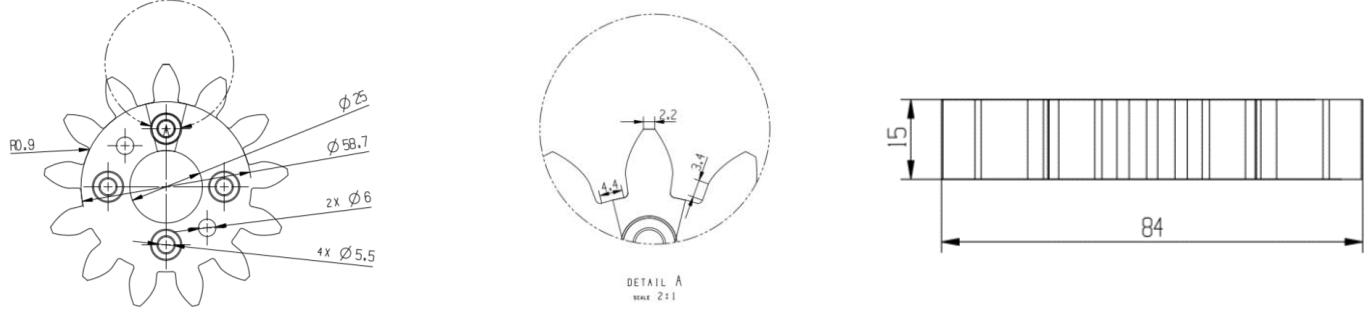
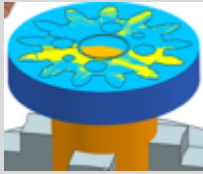
Figura 73. Configuración mecanizado trocoidal NX®

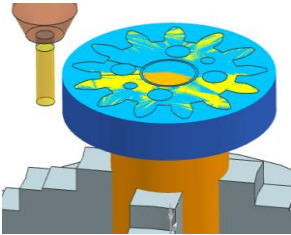
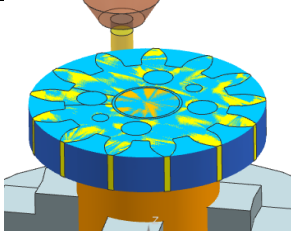
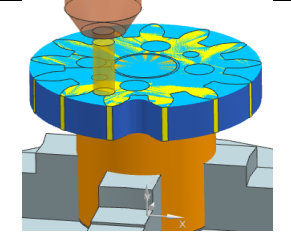
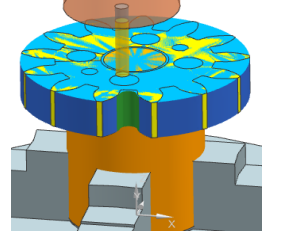


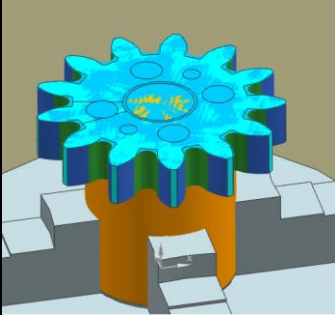
Fuente: Autor

Anexo G Hojas de proceso mecanizado desbaste de la geometría

Tabla 14. Hoja de procesos desbaste de la geometría

Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> 		<u>Sebastián C. Chacón Vargas</u>					
Material en bruto(mm): Ø90x15(mm)				desbaste de la geometría		Fecha: 00/00/2000			
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.			Facultad de Ingeniería Mecánica				
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech							
									
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	3.1	Pieza en bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR					



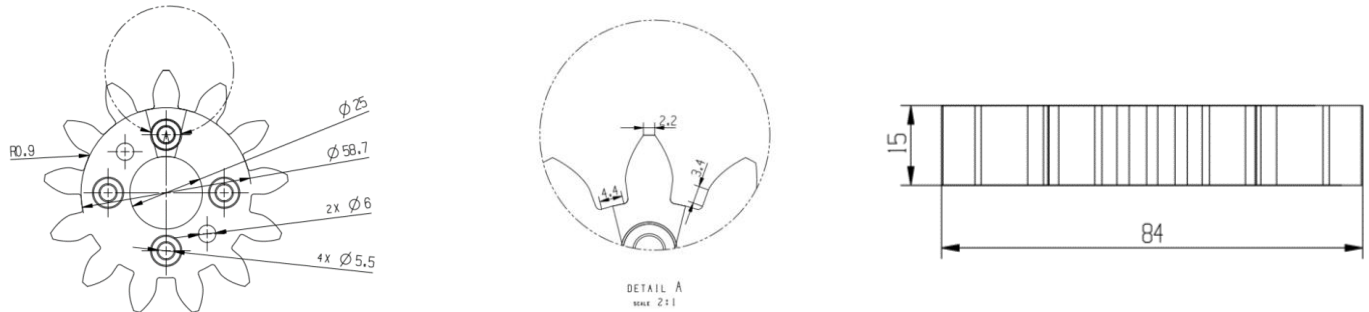

CENTRO DE MECANIZADO MULTI EJE S CNC	<u>3.2</u>	Desbaste diámetro externo en G54		Herramienta N°: 13 Escariador punta plana. Diámetro 8mm. Filos 4	0.07	1114.08	3978.87	100	0.8
	<u>3.3</u>	Acabado diámetro externo en G54		Herramienta N°: 13 Escariador punta plana. Diámetro 8mm. Filos 4	0.07	1114.08	3978.87	100	0.8
	<u>3.4</u>	Desbaste diente en G54		Herramienta N°: 13 Escariador punta plana. Diámetro 8mm. Filos 4	0.07	1114.08	3978.87	100	0.8
	<u>3.5</u>	Desbaste diente en G54		Herramienta N°: 12 Fresa punta plana Diámetro 5mm Filos 4	0.02	509.29	6366.19	100	0.5

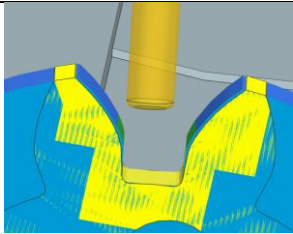
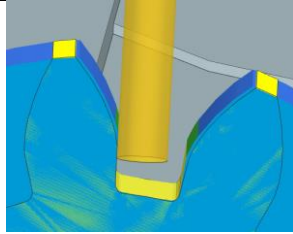
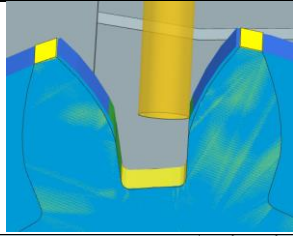
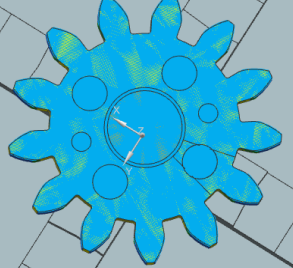
	<u>3.9</u>	Desmontaje pieza final	 A 3D CAD model of a gear assembly. The gear is light blue with eight teeth. It is mounted on a brown cylindrical shaft. The assembly is shown on a grey base with a coordinate system (X, Y, Z axes).	Verificación de mecanizado de la generación de los dientes del engranaje
--	------------	------------------------	--	--

Fuente: Autor

Anexo H Hojas de proceso mecanizado acabado flancos y valle de la geometría generada desde Excel®

Tabla 15. Hoja de procesos acabado flancos y valle de la geometría generado desde Excel®



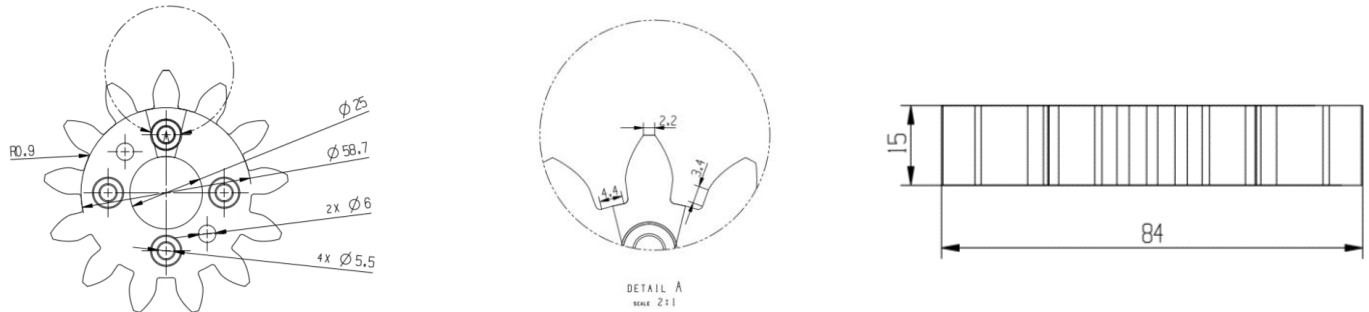
Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> 		<u>Sebastián C. Chacón Vargas</u>					
Material en bruto(mm): Ø90x15(mm)				desbaste de la geometría		Fecha: 00/00/2000			
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.			Facultad de Ingeniería Mecánica				
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech							
									
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	3.1	Pieza con medidas en bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR					

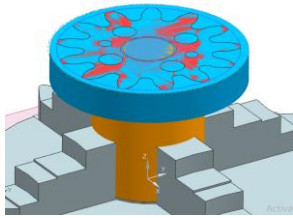
C E N T R O D E M E C A N I Z A D O M U L T I E J E S C N C	<u>3.6</u>	Acabado Valle en G54		Herramienta N°: 14 Escariador torico Diámetro 5mm	0.02	509.29	6366.19	100	1
	<u>3.7</u>	Acabado flanco izquierdo en G54		Herramienta N°: 12 Fresa punta plana Diámetro 5mm Filos 4	0.02	509.29	6366.19	100	0.5
	<u>3.8</u>	Acabado flanco derecho en G54		Herramienta N°: 12 Fresa punta plana Diámetro 5mm Filos 4	0.02	509.29	6366.19	100	0.5
		Desmontaje pieza final		Verificación de mecanizado de la generación de los dientes del engranaje					

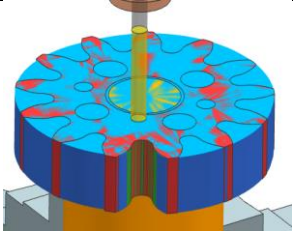
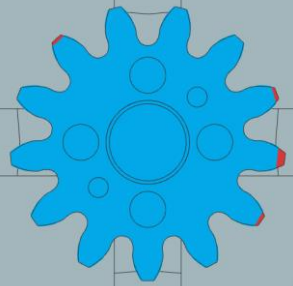
Fuente: Autor

Anexo I Hojas de proceso mecanizado acabado flancos y valle de la geometría del acelerador de NX®

Tabla 16. Hoja de procesos acabado flancos y valle de la geometría del acelerador de NX®

Material: Duraluminio	 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Generación del engranaje del acelerador nx®</p> 		<u>Sebastián C. Chacón Vargas</u>						
Material en bruto(mm): Ø90x15(mm)			Fecha: 00/00/2000						
Universidad Santo Tomás	Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.		Facultad de Ingeniería Mecánica						
Máquina	Centro de mecanizado multiejes Finetech								
									
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)



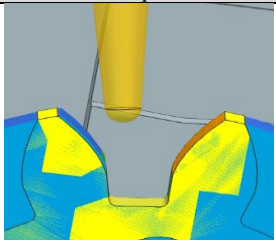
	<u>4.1</u>	Pieza con medidas en Bruto		MONTAJE DE LA PIEZA EN BRUTO PARA MECANIZAR					
--	------------	----------------------------	--	---	--	--	--	--	--

	<u>4.6</u>	Acabado Valle y flancos en G54		Herramienta N°: 14 Escariador torico Diametro 5mm	0.02	509.29	6366.19	100	1
	<u>4.9</u>	Desmontaje pieza final		Verificación de mecanizado de la generación de los dientes del engranaje					

Fuente: Autor



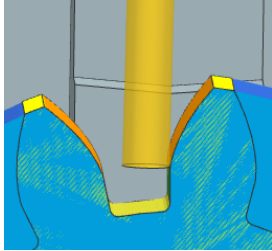
Anexo J Hojas de proceso mecanizado acabado del engranaje

Tabla 17. Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.1

Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Acabado dientes engranaje a partir de Excel®</p> 		Sebastián C. Chacón Vargas					
Material en bruto(mm): Ø84.3x15(mm)				Fecha: 00/00/2000					
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.		Facultad de Ingeniería Mecánica					
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech							
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	5.2 5.3	Acabado curva de involuta izquierdo y derecha en G54		Herramienta N°: 17 Escariador cónico Diámetro 4mm. Filos 6	0.02	754.394	6286.62	79	1

Fuente: Autor

Tabla 18. Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.2

Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Acabado dientes engranaje a partir de Excel®</p> 		Sebastián C. Chacón Vargas					
Material en bruto(mm): Ø84.3x15(mm)				Fecha: 00/00/2000					
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.		Facultad de Ingeniería Mecánica					
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech							
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	<u>5.4</u> <u>5.5</u>	Acabado curva de involuta izquierdo y derecha en G54		Herramienta N°: 12 Escariador punta plana Diámetro 5mm. Filos 4	0.02	509.295	6366.19	100	1



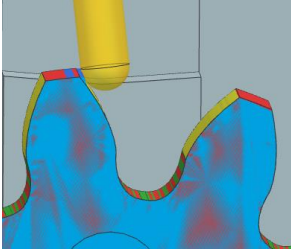
Fuente: Autor

Tabla 19. Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.3

Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> <p style="text-align: center;">Acabado dientes engranaje a partir de Excel®</p> 						<u>Sebastián C. Chacón Vargas</u>	
Material en bruto(mm): Ø84.3x15(mm)								Fecha: 00/00/2000	
Universidad Santo Tomás			Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.			Facultad de Ingeniería Mecánica			
Máquina			Centro de mecanizado multiejes Finetech						
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	5.4 5.5	Acabado curva de involuta izquierdo y derecha en G54		Herramienta N°: 13 Escariador punta redonda. Diámetro 5mm. Filos 2	0.04	509.295	6366.19	100	1

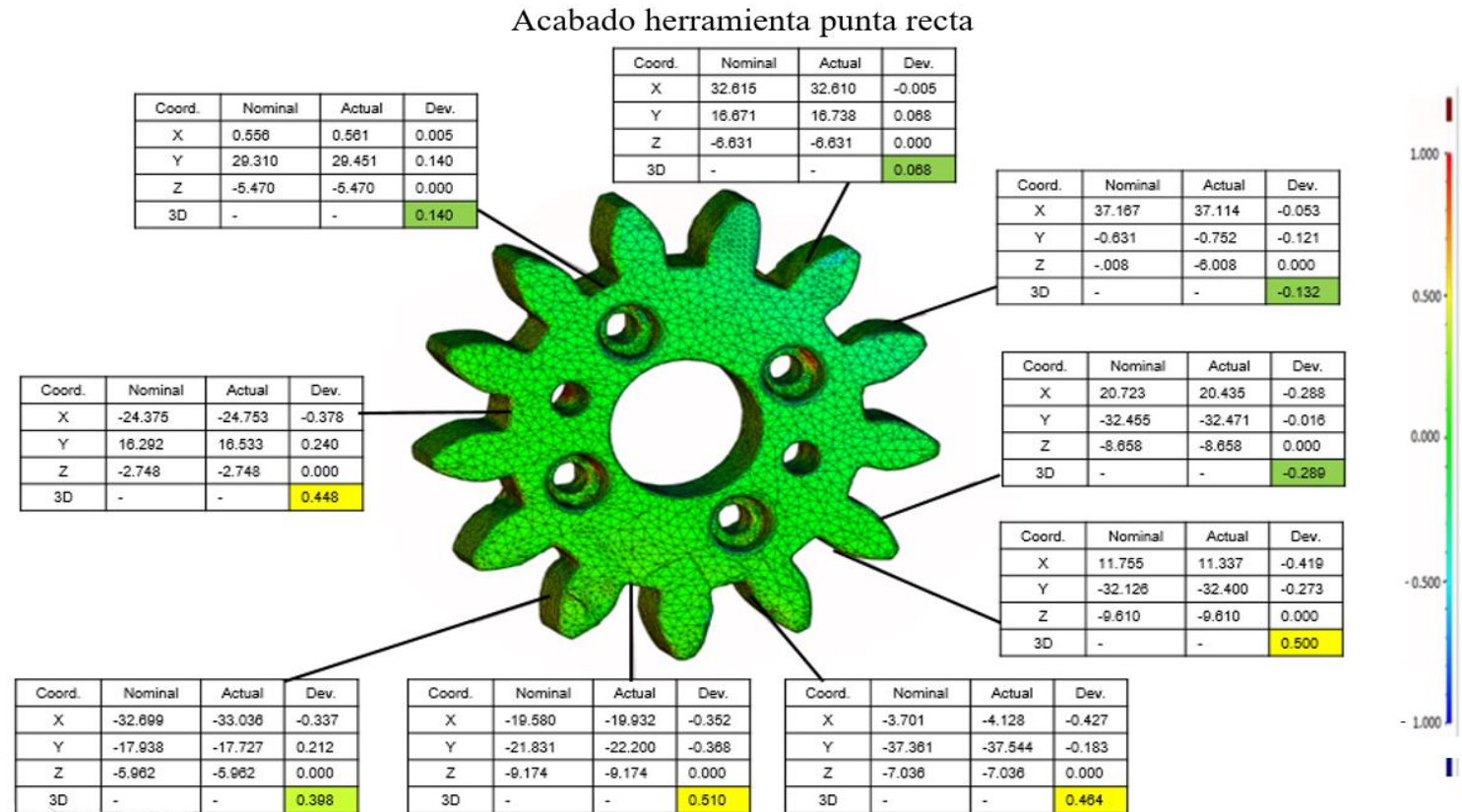
Fuente: Autor

Tabla 20. Hoja de procesos acabado dientes del engranaje 1.4

Material: Duraluminio		 <h1 style="text-align: center;">HOJA DE PROCESO</h1> 		<u>Sebastián C. Chacón Vargas</u>					
Material en bruto(mm): Ø84.3x15(mm)				Acabado dientes engranaje a partir del acelerador		Fecha: 00/00/2000			
Universidad Santo Tomás		Comparación de la geometría básica de engranajes rectos generados a partir de un acelerador de diseño y la curva paramétrica.			Facultad de Ingeniería Mecánica				
Máquina		Centro de mecanizado multiejes Finetech							
Fase	Ope	Designación	Croquis	Herramienta	Fz(mm)	Vf (mm/min)	N° RPM	Vc (m/min)	Ap(mm)
	5.4 5.5	Acabado curva de involuta izquierdo y derecha en G54		Herramienta N°: 13 Escariador punta redonda. Diámetro 5mm. Filos 2	0.04	509.295	6366.19	100	1

Fuente: Autor

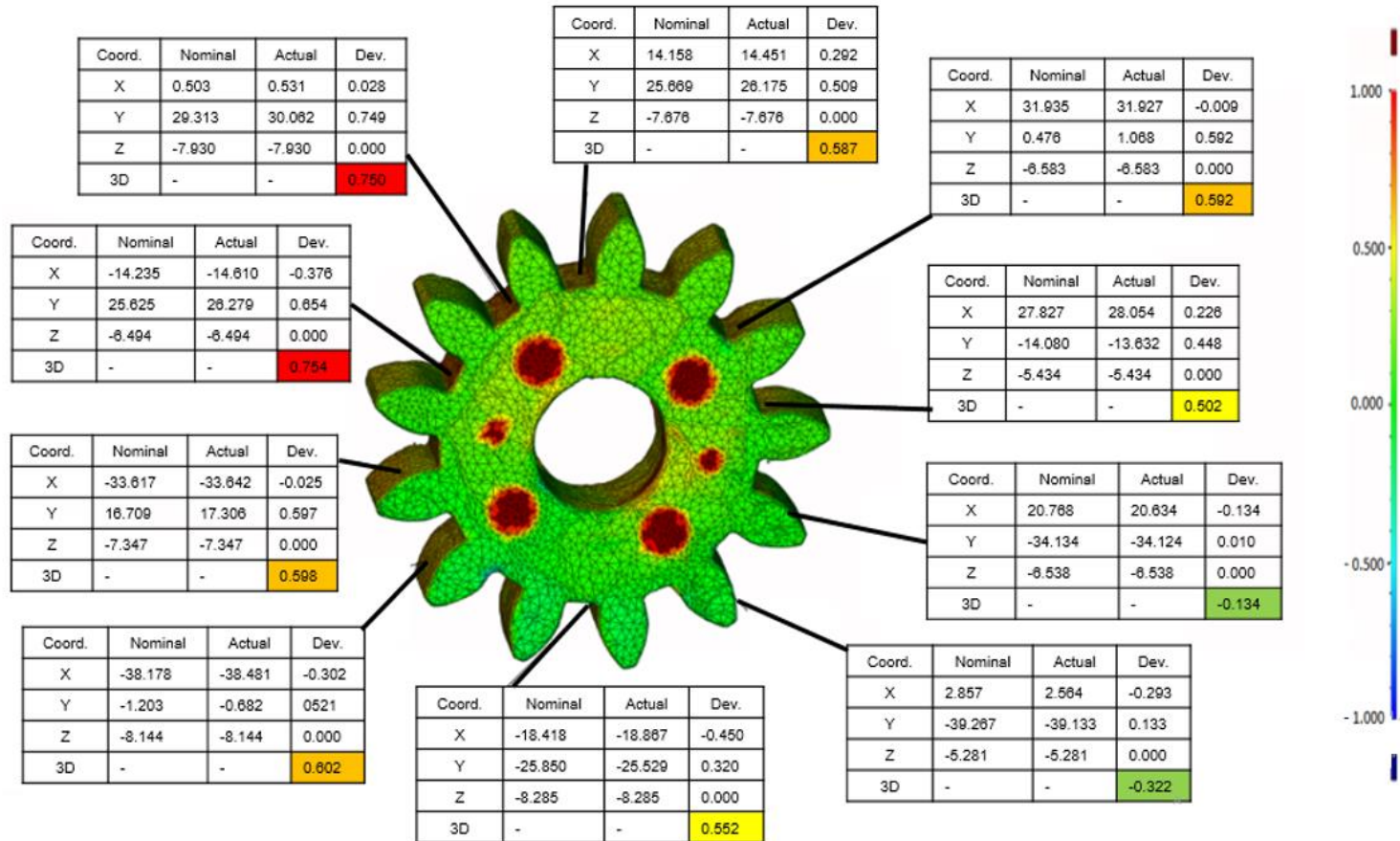
Figura 74. Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta recta



Fuente: Autor

Figura 75. Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta cónica

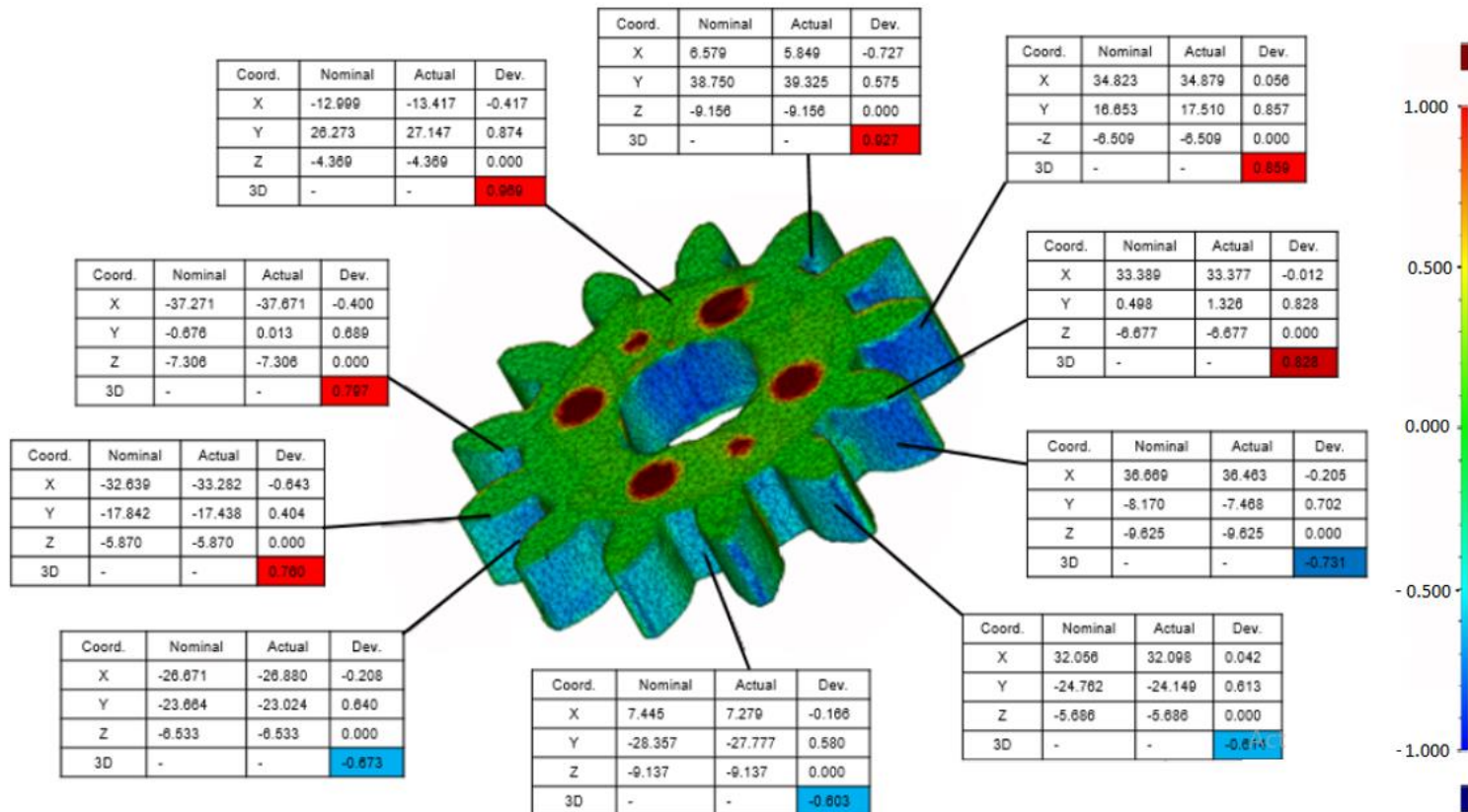
Acabado herramienta punta cónica



Fuente: Autor

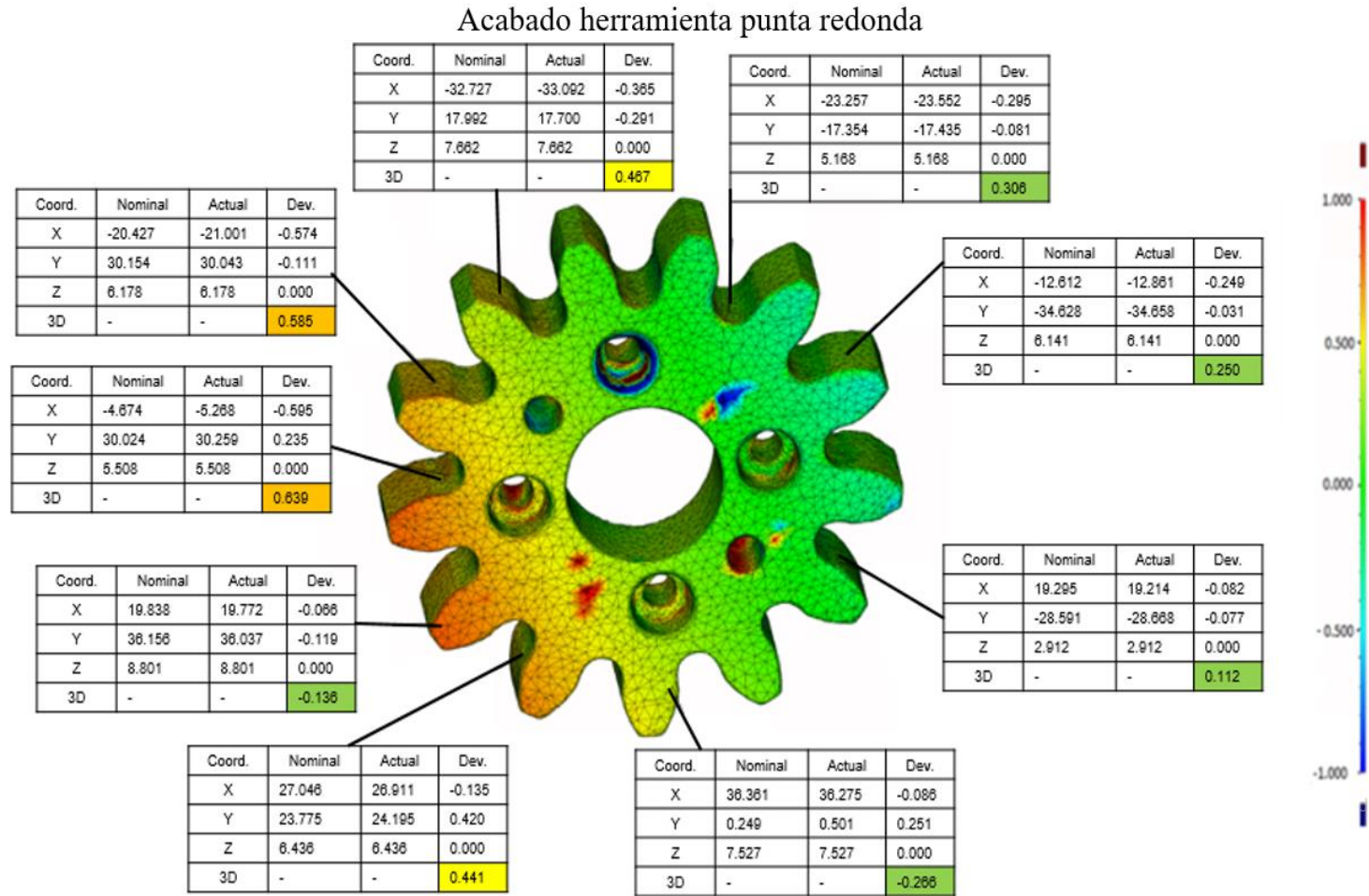
Figura 76. Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta redonda

Acabado herramienta punta redonda



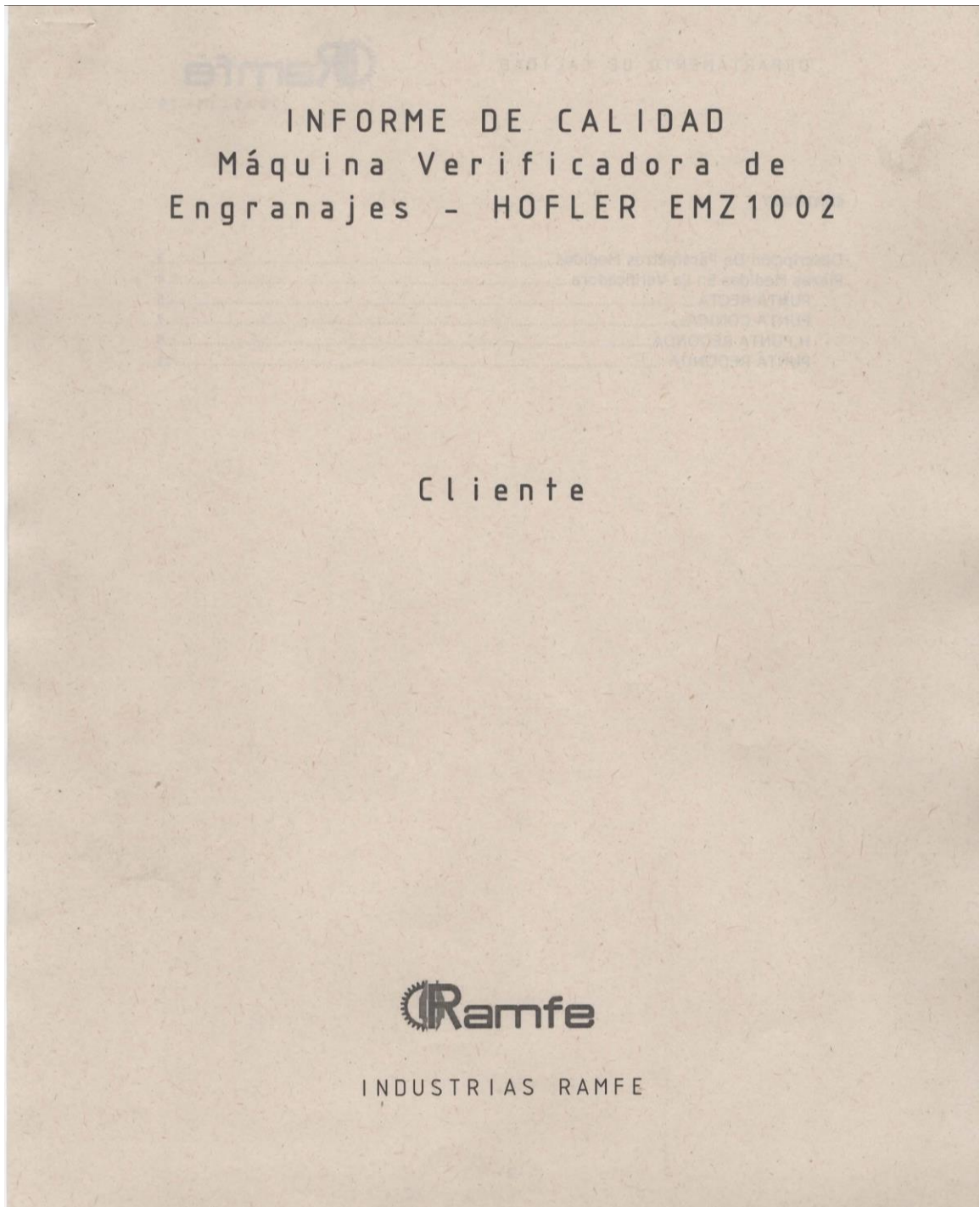
Fuente: Autor

Figura 77. Resultados metrología escáner engranaje con acabado punta redonda geometría del acelerador de dibujo



Fuente: Autor

Anexo L Informe metrología máquina Hofler EMZ 1002 (metrología
Industrias RAMFE S.A.S.)



Descripción De Parámetros Medidos

Fa, ffa,	son mediciones realizadas para determinar la calidad superficial del diente medido desde la raíz del diente hacia la punta.
Fβ, ffβ	Son mediciones realizadas para determinar la calidad superficial del diente medido sobre la hélice del engranaje.
fHa	Determina la desviación existente del ángulo de presión en micras. si la desviación es negativa el ángulo de presión es mayor al nominal y viceversa.
fHβ	Determina la desviación existente del ángulo de hélice en micras. si la desviación es negativa el ángulo de hélice es menor al nominal y viceversa.
fp	Determina la desviación mas alta en micras de la medición realizada a cada paso del engranaje.
fu*	Es la diferencia máxima existente entre la medición de dos pasos adyacentes medida en todos los pasos del engranaje.
Fp	Es la diferencia mas grande entre una sumatoria de pasos con desviación positiva y una sumatoria de pasos con desviación negativa.
Fp z/8	Es la diferencia mas grande entre una sumatoria de pasos determinada por el numero de dientes del engranaje y dividida en 8, ya sea con desviación positiva y una sumatoria de pasos con desviación negativa.
Fr	Es el parámetro que determina la desviación mas alta de concentricidad de un diente medida en todo el engranaje.

Tabla 1. Descripción de los parámetros medidos por la maquina verificadora Hofler.

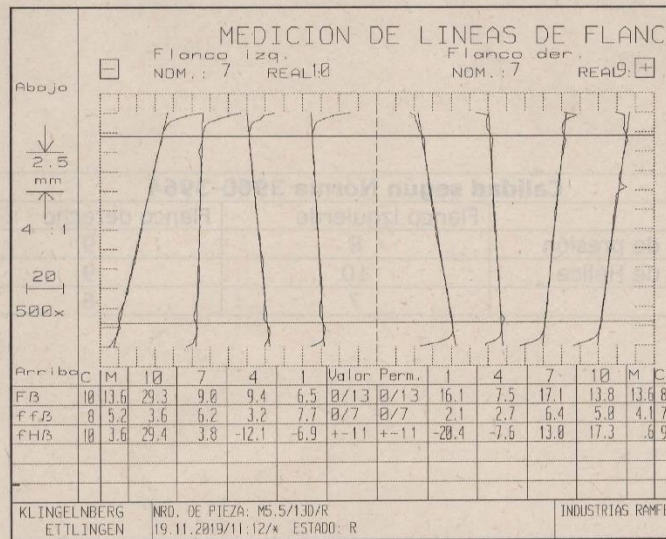
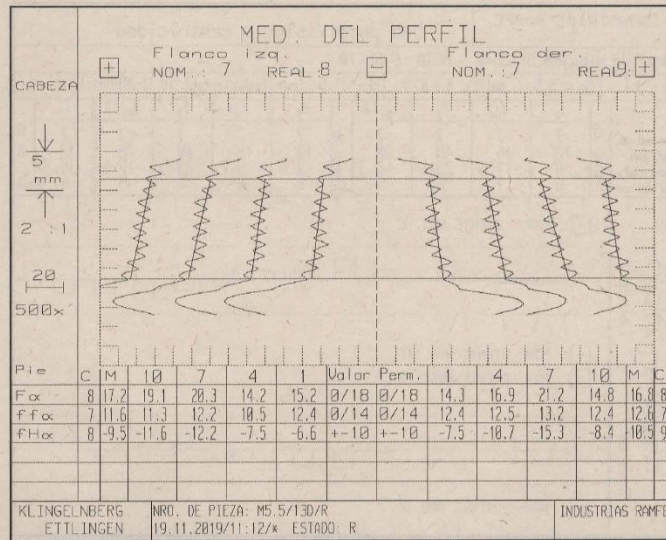
Piezas Medidas En La Verificadora

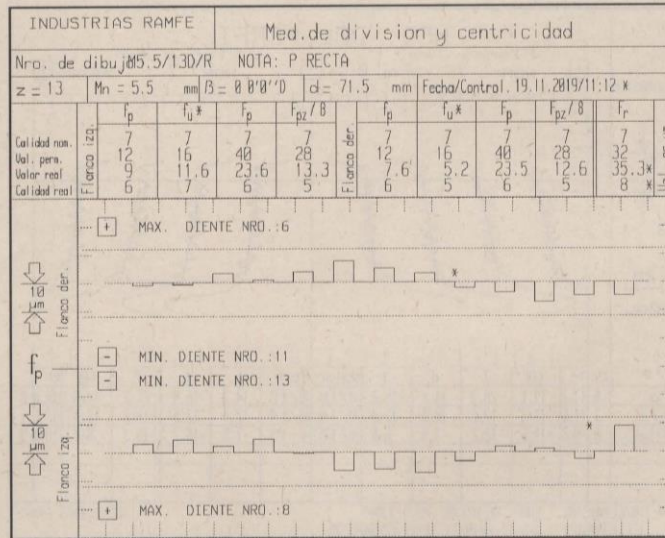
Se realizo la medición de cuatro engranajes, con las siguientes especificaciones:

- ENGRANAJE
 - MODULO: 5.5 mm
 - NUMERO DE DIENTES: 13
 - ANGULO DE HÉLICE: 0°0'0"
 - DIRECCIÓN HÉLICE: n/a
 - ANCHO DEL DIENTE: 15 mm

La verificación consiste en evaluar la calidad de fabricación con referencia al ángulo de hélice, ángulo de presión y paso de cada pieza evaluada, bajo la norma DIN 3960-3964.

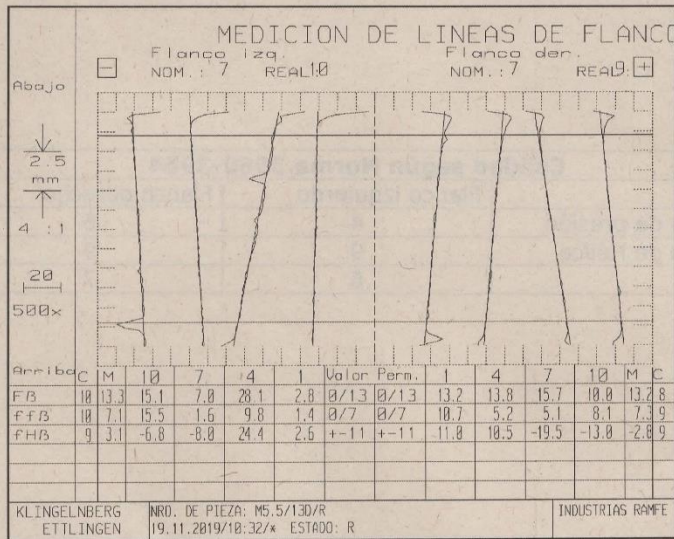
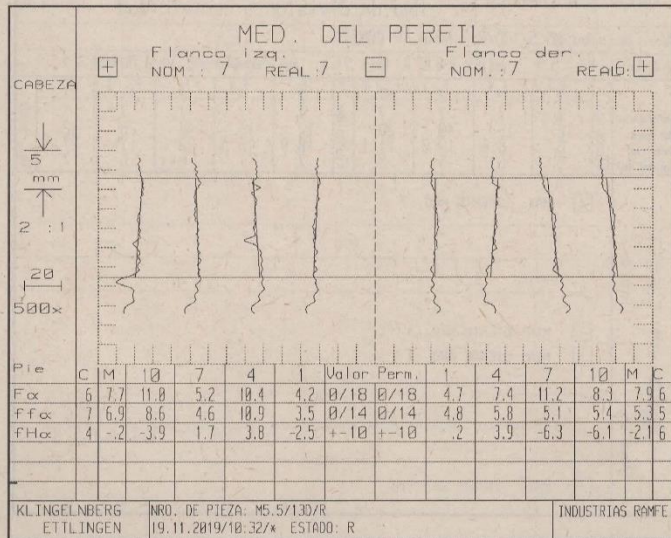
PUNTA RECTA

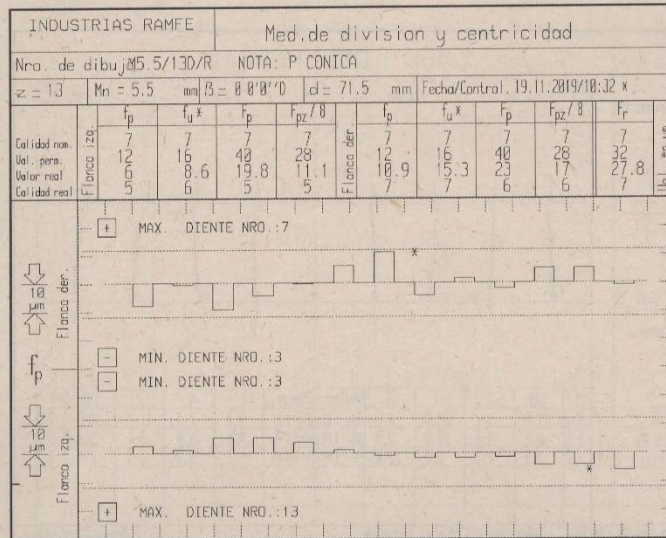




Calidad según Norma 3960-3964		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	8	9
Ángulo de Hélice	10	9
Paso	7	6

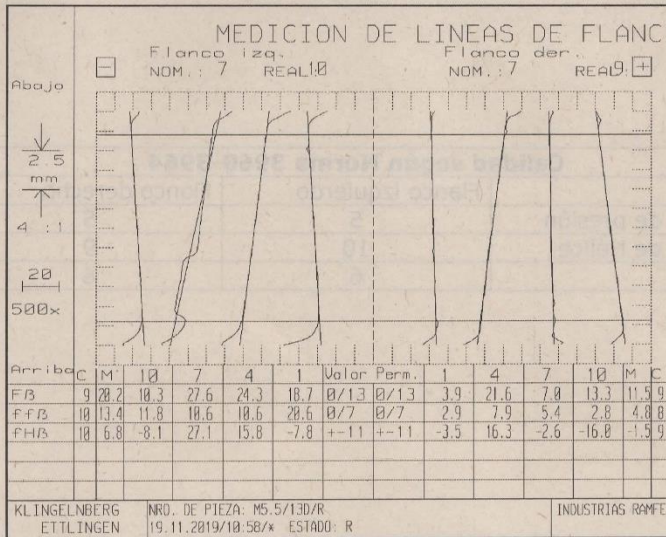
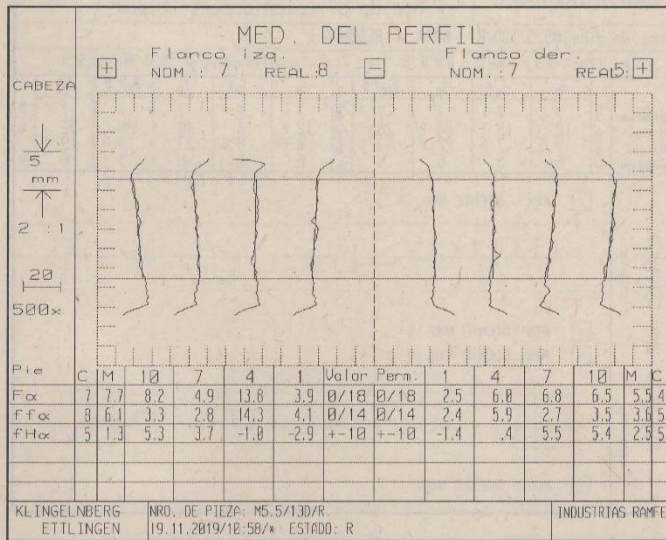
PUNTA CÓNICA

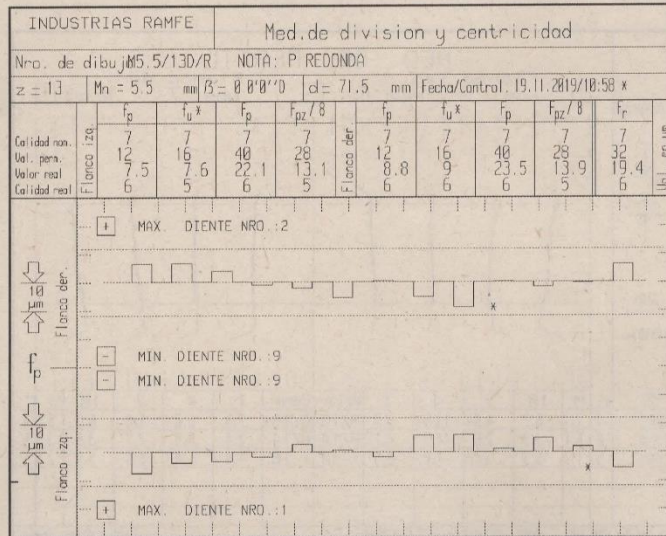




Calidad según Norma 3960-3964		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	4	6
Ángulo de Hélice	9	9
Paso	6	7

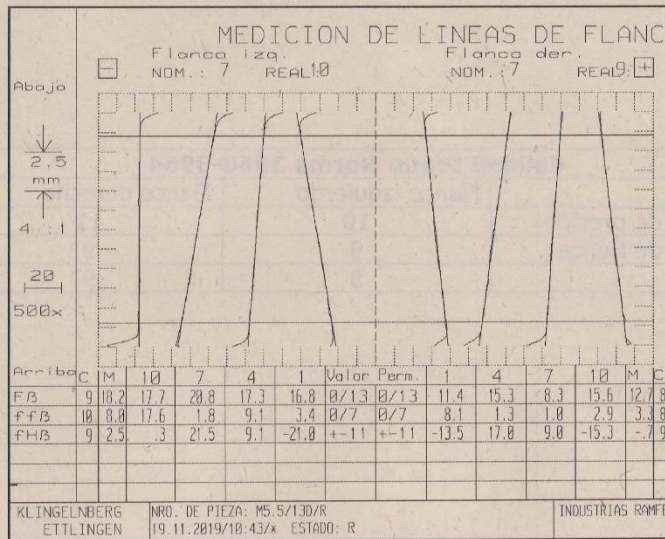
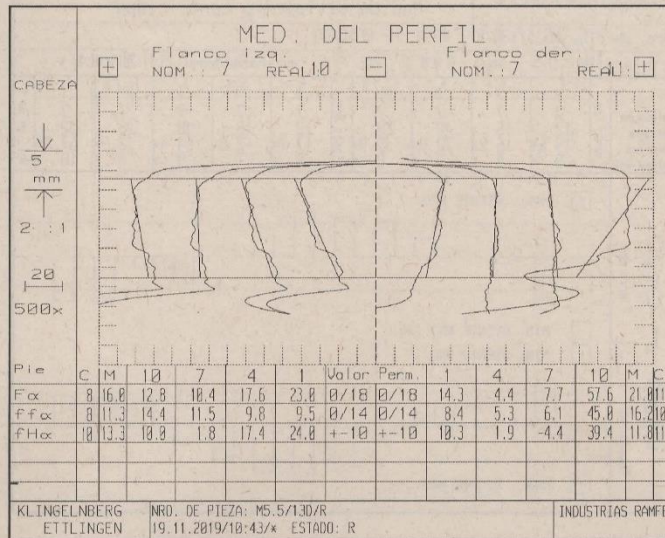
PUNTA REDONDA

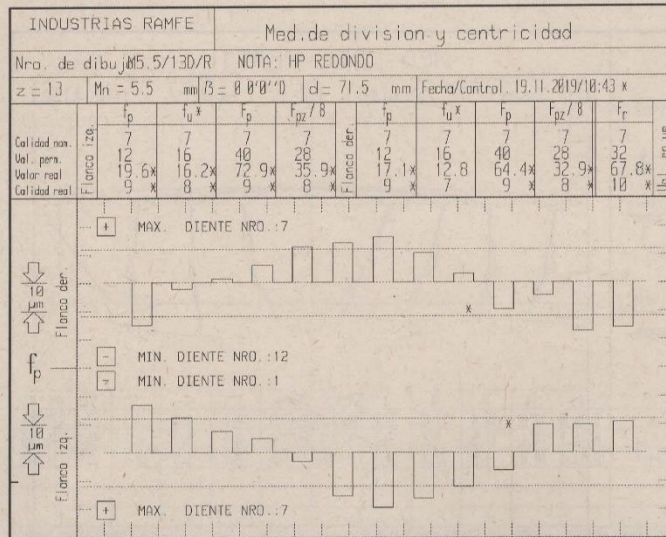




Calidad según Norma 3960-3964		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	5	5
Ángulo de Hélice	10	9
Paso	6	6

H.PUNTA REDONDA





Calidad según Norma 3960-3964		
	Flanco izquierdo	Flanco derecho
Ángulo de presión	10	11
Ángulo de Hélice	9	9
Paso	9	9