

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE
PROGRAMAS DE CONTROL NUMÉRICO, PARA EL MECANIZADO DE
SPROCKETS, POR MEDIO DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO
BASADAS EN CARACTERÍSTICAS**

PABLO FADUL PACHECO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTA D.C.**

2019

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE PROGRAMAS DE
CONTROL NUMÉRICO, PARA EL MECANIZADO DE SPROCKETS, POR
MEDIO DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO BASADAS EN
CARACTERÍSTICAS**

PABLO FADUL PACHECO

**Trabajo de grado en modalidad de solución de problema de ingeniería para
optar al título de Ingeniero Mecánico**

Director:

Ing. JORGE GARCIA BARBOSA

Grupo de Investigación GEAMEC

Semillero de Investigación 'Tecnologías Avanzadas de Manufactura'

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTA D.C.**

2019

CONTENIDO

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN.....	7
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	9
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1. RECONOCIMIENTO DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA EL DISEÑO DE SPROCKETS.....	10
1.1 TRANSMISIÓN POR CADENAS.....	10
1.2 PROCEDIMIENTO PARA SELECCIONAR UNA TRANSMISIÓN POR CADENAS	11
1.3 CÁLCULOS DE DISEÑO PARA UNA TRANSMISIÓN POR CADENAS	12
1.3.1 Factor de servicio	12
1.3.2 Velocidad del sprocket conductor	13
1.4 FORMACIÓN DE PERFIL DEL <i>SPROCKET</i>	13
1.4.1 Ecuación del <i>sprocket</i>	16
1.5 CONSIDERACIONES DE LA TRANSMISIÓN POR CADENA.....	19
2 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARAMÉTRICO CAD.....	21
2.1 BASE DE DATOS	21
2.2 PARAMETRIZACIÓN CAD EN <i>SIEMENS NX</i>	22
2.2.1 Parametrización de la curva del perfil	24
2.2.2 Copia simétrica de la geometría	25
2.2.3 Límite del perfil	26
2.2.4 Operación de vaciado	26
2.2.5 Característica de patrón circular	27
2.2.6 Manzana del <i>sprocket</i> y eje de transmisión.....	28
2.2.7 Biselado.....	30
2.3 MODELO PARAMÉTRICO CAD	31
3 IMPLEMENTACIÓN DE MECANIZADO BASADO EN CARACTERÍSTICAS	32

3.1	GEOMETRÍAS PRISMÁTICAS.....	32
3.1.1	Superficies planas	33
3.1.2	Agujeros	34
3.1.3	Ranuras.....	34
3.1.4	Cajeras	36
3.1.5	Redondeos.....	37
3.2	METODOLOGÍA PARA AUTOMATIZAR LA PROGRAMACIÓN DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO	38
3.2.1	Definir los parámetros y características de las geometrías prismáticas en el modelo <i>CAD</i>	38
3.2.2	Reconocimiento de características por medio de herramienta <i>FBM</i> en el modelo <i>CAM</i>	41
3.2.3	Enseñanza de características a través de <i>FBM</i>	43
3.3	DEFINIR ESTRATEGIAS DE MECANIZADO PARA LAS CARACTERÍSTICAS ENCONTRADAS	44
3.4	CONTROL Y ALMACENAMIENTO DE BASES DE DATOS	46
3.5	MACHINING KNOWEDGE EDITOR – <i>MKE</i>	47
3.5.1	Regla de mecanizado	47
3.6	DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE AUTOMATIZADO EN <i>NX</i>	52
3.7	TRAYECTORIAS <i>FBM</i>	53
4	VALIDACIÓN DEL CODIGO NUMÉRICO GENERADO AUTOMÁTICAMENTE	54
4.1	PARÁMETROS DE CORTE	54
4.1.1	Velocidad de corte - v_c	54
4.1.2	Avance - f	55
4.2	POSTPROCESADOR	55
4.3	PRUEBAS DE MECANIZADO	56
5.	CONCLUSIONES.....	58
6.	RECOMENDACIONES.....	60
7.	BIBLIOGRAFIA.....	61
	ANEXOS	63
	ANEXO 1: Capacidad de potencia cadena ANSI 40	63
	ANEXO 2: Capacidad de potencia cadena ANSI 60	64
	ANEXO 3: Capacidad de potencia cadena ANSI 80	65

ANEXO 4: Diagrama de flujo proceso de selección de cadena	66
ANEXO 5: Diagrama de flujo automatización CAM en NX.....	67

RESUMEN

En la actualidad, Colombia enfrenta desafíos en apropiación tecnología que nos hacen menos competitivos frente a otros países y limitan el desarrollo de nuevos productos con técnicas eficientes de manufactura. Por esta razón, el presente trabajo consistió en integrar diferentes herramientas tecnológicas (*Microsoft Excel*, *Siemens NX CAD/CAM*, *Siemens NX MKE*, Centro de mecanizado 3 ejes) con el propósito de automatizar la selección, el diseño *CAD* y la programación *CAM* para manufacturar *sprockets*. Es decir, implementar una cadena de procesos digitales que optimicen procesos y representen una ventaja competitiva para la industria nacional.

Para desarrollar el proyecto fue necesario conocer los parámetros que determinan la geometría del *sprocket*. Por lo tanto, se implementó una herramienta para seleccionar *sprockets* automáticamente a partir de criterios de selección de transmisión por cadenas, como lo son la potencia y la velocidad angular. A partir de esta información se definió la ecuación del perfil del *sprocket* para generar un modelo paramétrico *CAD*. Luego, por medio de estrategias de mecanizado basado en características (*Feature Based Machining – FBM*) se definieron las geometrías prismáticas en el elemento para que el software hiciera un reconocimiento de la topología del elemento y genere las trayectorias de la herramienta, automatizando la programación *CAM*. Finalmente, se ejecutaron pruebas de manufactura, validando las estrategias de mecanizado según las características del elemento.

INTRODUCCIÓN

La manufactura asistida por computadora (*Computer Aided Manufacturing – CAM*) es una herramienta utilizada para auxiliar todas las fases de manufactura de un producto. Una característica importante es su capacidad para modificar las trayectorias de la herramienta de acuerdo con la geometría del elemento. Sin embargo, el operario tiene que precisar las operaciones de mecanizado y definir las trayectorias que debe realizar la herramienta en el centro de mecanizado (*Computer Numerical Control – CNC*). Por lo tanto, es una tarea que demanda mucho tiempo y requiere de personal capacitado pues se necesita una calidad dimensional adecuada al finalizar el proceso de mecanizado [1].

El mecanizado basado en características (*Feature Based Machining – FBM*), es una herramienta del software *CAM* que permite establecer de forma automática las metodologías de manufactura que mejor se adaptan a la geometría del elemento, haciendo que el proceso de planeación y fabricación sea más eficiente y preciso, debido a que garantiza la automatización de la programación *CNC*. Estas estrategias permiten reconocer características de mecanizado – *FBM*, es decir, una porción del cuerpo que es extraído por la herramienta de corte y que representa un patrón en la topología de la pieza, como agujeros, cajeras, contornos, ranuras, etc. [2]–[4]. Luego, la integración de estas tecnologías y estrategias permiten la flexibilidad para fabricar productos de acuerdo a demandas inestables, con diferentes configuraciones en un rango de tiempo efectivo [5], [6].

Sin embargo, aún hay desafíos en la apropiación tecnológica que permita desarrollar estrategias eficientes de mecanizado. En Colombia existe acceso a tecnología de máquinas *CNC*, pero la iniciativa hacia la integración de métodos avanzados de manufactura es muy baja. Según XmartPLM, empresa colombiana dedicada a la distribución de software *CAD/CAM*, en el año 2018 se vendieron 15 licencias del software *SprutCAM* que incluye un complemento de *FBM*. El complemento de *FMB* para software *NX* se vende por separado y no han vendido ninguno. En consecuencia, se presentan limitaciones en el desarrollo de nuevos productos y técnicas de manufactura.

La implementación de *FBM* permite crear automáticamente programas de mecanizado optimizados directamente a partir del diseño *CAD* [7], lo que resulta efectivo para aumentar la competitividad de la industria colombiana. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es la exploración de nuevas alternativas de mecanizado que promuevan al desarrollo y fortalecimiento de la industria manufacturera. Se hará exploración en temas de tecnología *CAD/CAM*, implementando estrategias *FBM* para optimizar el proceso de manufactura, hacia la consolidación de estrategias eficientes de mecanizado.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el término capacidad tecnológica, se refiere a la manera como las empresas desarrollan y utilizan la tecnología. Este concepto hace que las empresas consideren nuevas estrategias para sus procesos de diseño y manufactura [8]. Sin embargo, en Colombia la apropiación tecnológica es uno de los obstáculos que impiden el desarrollo. En consecuencia, el nivel de competitividad con otros países se ve afectado. Los indicadores de competitividad a partir del año 2000 muestran que el país ha descendido 9 posiciones según el *International Institute of Management Development – IMD* situándose en el puesto 55 de 60 en el año 2017 [9].

Las razones para argumentar los malos resultados en los últimos años que expliquen este retroceso se encuentran factores de innovación y sofisticación, eficiencia del mercado, además de bajos indicadores en educación superior y capacitación [9]. Por lo anterior, surge la iniciativa de implementar una metodología de manufactura basada en características- *FBM*, hacia la integración de tecnologías *CAD/CAM*, controladores, maquinas-herramientas, que permitan obtener el máximo rendimiento para desarrollar soluciones de fabricación de elementos con geometrías complejas [10].

La manufactura basada en características representa un pilar en el proceso de automatización del mecanizado [11]. Por esta razón la integración de metodologías, técnicas y tecnologías permitirá desarrollar nuevos métodos de manufactura paramétrica que puedan generar verdaderas ventajas competitivas para las empresas colombianas y afianzar espacios de exploración hacia nuevas estrategias eficientes de manufactura.

En la Universidad Santo Tomás existe un precedente, el cual propone una metodología para reconocer características de mecanizado en diferentes geometrías prismáticas a partir de la generación de estrategias basadas en conocimiento (*Knowledge Based Machining-KBM*) y *FBM*. El documento define los mecanismos de reconocimiento de características de mecanizado y concluye de manera muy positiva sobre la aplicación de este tipo de estrategias. Incluso resalta la versatilidad de la herramienta *FMB* en ambientes de fabricación donde existen cambios constantes de diseño y dimensionales [12]. Por lo tanto, el desarrollo de este proyecto continuará con la exploración hacia la integración de metodologías, técnicas y tecnologías de manufactura para la parametrización del mecanizado aplicado a ruedas dentadas como los *sprockets*, debido a que constituye un elemento de transmisión de potencia con múltiples aplicaciones en sistemas de transporte y elevación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Automatizar el proceso de generación de programas de control numérico, para el mecanizado de *sprockets*, por medio de estrategias de mecanizado basadas en características.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los parámetros y características de diseño para la manufactura de *sprockets*.
2. Construir un modelo paramétrico *CAD* con información y conocimiento de manufactura.
3. Implementar estrategias de mecanizado basado en características - *FBM* que permitan la automatización de la generación de programas de control numérico.
4. Verificar el código de control numérico generado automáticamente, por medio de pruebas de mecanizado de dos *sprockets* con diferentes características dimensionales.

1. RECONOCIMIENTO DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA EL DISEÑO DE *SPROCKETS*

1.1 TRANSMISIÓN POR CADENAS

Las cadenas de rodillos son una alternativa eficiente de transmisión de potencia en sistemas mecánicos. El diseño de las cadenas permite tener flexibilidad y además permite que la cadena transmita grandes fuerzas de tensión. El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares – *ANSI* estandarizó las cadenas de rodillos con respecto a sus tamaños (25, 35, 40, 60, etc.). En la Figura 1-1 se muestra la nomenclatura. El paso es la distancia lineal entre los centros de los rodillos, el ancho es la distancia entre las placas de eslabones [13].

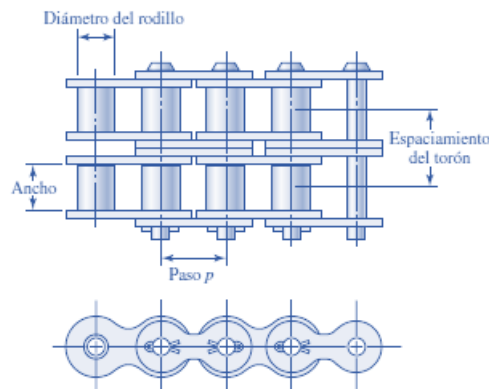


Figura 1-1: Parte de una cadena de rodillos de doble torón [13]

Los *sprockets* son ruedas dentadas que están acopladas al eje y en conjunto con la cadena, son los elementos mecánicos encargados de transmitir la potencia y movimiento entre ejes [14], como se muestra en la Figura 1-2. La Organización Internacional de Normalización (*International Organization for Standardization – ISO*), en la norma ISO 606 de 2015 especifica las características de los *sprockets* relacionados con los números de cadena *ANSI* y las aplicaciones en transmisión de potencia. También cubre dimensiones, tolerancias, precarga, esfuerzo mínimo a tensión.

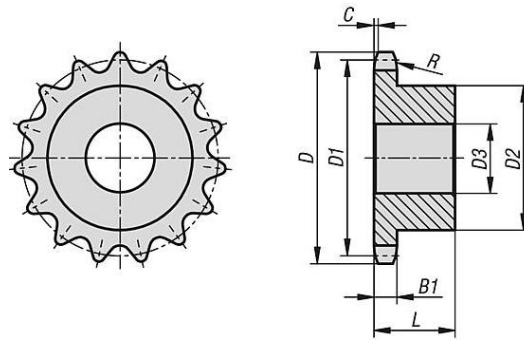


Figura 1-2 Dimensiones características de un sprocket [15]

1.2 PROCEDIMIENTO PARA SELECCIONAR UNA TRANSMISIÓN POR CADENAS

Para seleccionar una transmisión por cadenas, es necesario conocer la potencia de la fuente y la velocidad de entrada para determinar el paso de la cadena y el tamaño del *sprocket* conductor. El procedimiento a seguir es descrito en la Figura 1-3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Considerando un factor de servicio igual a 1, la Asociación Americana de Cadenas (*American Chain Association – ACA*), basada en la norma *ASME B29.1*, clasifica las cadenas de acuerdo con la capacidad de potencia requerida del sistema y establece una relación con la velocidad de giro suministrando el número de dientes del *sprocket* conductor [16].

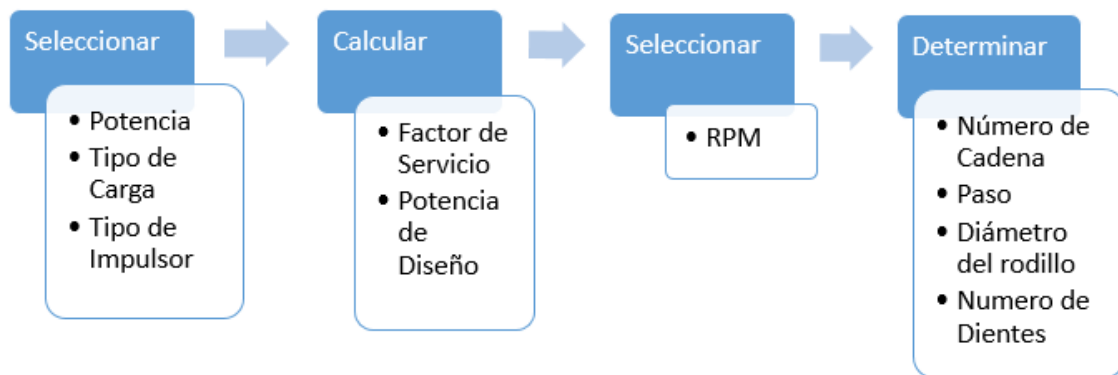


Figura 1-3: Procedimiento para seleccionar una transmisión por cadenas. Fuente: Autor

En los anexos 1, 2 y 3 se presentan las tablas de potencia nominal para tres tamaños normales de cadena. *ANSI* Numero 40 (1/2 pulg.), *ANSI* Numero 60 (3/4 pulg.), *ANSI* Numero 80 (1 pulg.) Existen características de los datos disponibles para todos los tamaños de cadenas.

- Las capacidades se basan en la velocidad del *sprocket* menor, y son para una duración esperada de 15000 horas, aproximadamente.

- Para determinada velocidad, la capacidad de potencia aumenta con el número de dientes del *sprocket*. Mientras mayor sea la cantidad de dientes, mayor será el diámetro del *sprocket*. El uso de una cadena con paso pequeño en un *sprocket* grande produce un accionamiento más silencioso.
- Para determinado número de dientes, la capacidad de potencia se incrementa al aumentar la velocidad, hasta un punto y después decrece.
- Las capacidades son para cadenas de una hilera (Cadenas simples). Aunque las hileras múltiples aumentan la capacidad de potencia. No son para un múltiplo directo en la capacidad de una sola hilera. Se debe multiplicar la capacidad obtenida en las tablas por los valores de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [14].

Tabla 1-1: Factor número de torones. Tomado y modificado. [16]

FACTOR NUMERO DE TORONES	
<i>Cantidad de Torones</i>	<i>Factor Cantidad de Torones</i>
2	1.7
3	2.5
4	3.3

1.3 CÁLCULOS DE DISEÑO PARA UNA TRANSMISIÓN POR CADENAS

1.3.1 Factor de servicio

Es importante resaltar que los datos suministrados por la ACA están sujetos a carga uniforme con impulsor uniforme, es decir, factor de servicio igual a 1. El factor de servicio compensa las cargas a las que está expuesto el sistema considerando las alternativas de la Tabla 1-2, y determina la potencia de diseño, por medio de la ecuación (1).

Tabla 1-2: Factor de servicio. Tomado y modificado [16].

FACTOR DE SERVICIO			
<i>Tipo de Carga \ Tipo de Impulsor</i>	<i>Impulsor hidráulico</i>	<i>Motor eléctrico o turbina</i>	<i>Motor de combustión interna</i>
<i>Suave</i>	1.0	1.0	1.2
<i>Moderada</i>	1.2	1.3	1.4
<i>Pesada</i>	1.4	1.5	1.7

$$\text{Potencia de diseño} = \text{Factor de servicio} \times \text{Potencia a transmitir} \quad (1)$$

1.3.2 Velocidad del sprocket conductor

Luego de determinar la potencia de diseño, se debe especificar cuál es la velocidad de giro del *sprocket* conductor. A partir de este parámetro debe consultar en los anexos 1, 2 y 3, el valor mayor más cercano a la potencia de diseño y coincidir este valor con el número de dientes que debe tener el *sprocket*.

El diseñador debe establecer una velocidad de salida deseada para el sistema, así determina la relación a partir de la ecuación (2).

$$Relación = \omega_1 / \omega_2 \quad (2)$$

Luego de consultar las tablas y determinar cuál es el paso de la cadena y el tamaño del *sprocket* que se ajusta a esa potencia y a esa velocidad. Es necesario calcular la cantidad de dientes necesaria para el *sprocket* mayor, a partir de la ecuación (3). Redondear al número entero más cercano.

$$Z_2 = Z_1 * Relacion \quad (3)$$

Verificar si la velocidad de salida es aceptable con los números de dientes de los *sprockets*, a partir de la ecuación (4).

$$\omega_{2'} = \omega_1 (Z_1 / Z_2) \quad (4)$$

1.4 FORMACIÓN DE PERFIL DEL SPROCKET

Para minimizar la variación de velocidad de la cadena con respecto al *sprocket*, es necesario asegurar que la longitud de arco del diámetro de paso sea igual al ángulo de paso, o, que la distancia recorrida por la cadena en cualquier momento es igual a la longitud de arco del diámetro de paso [17], es decir, reducir k tanto como sea posible, como indica la Figura 1-4.

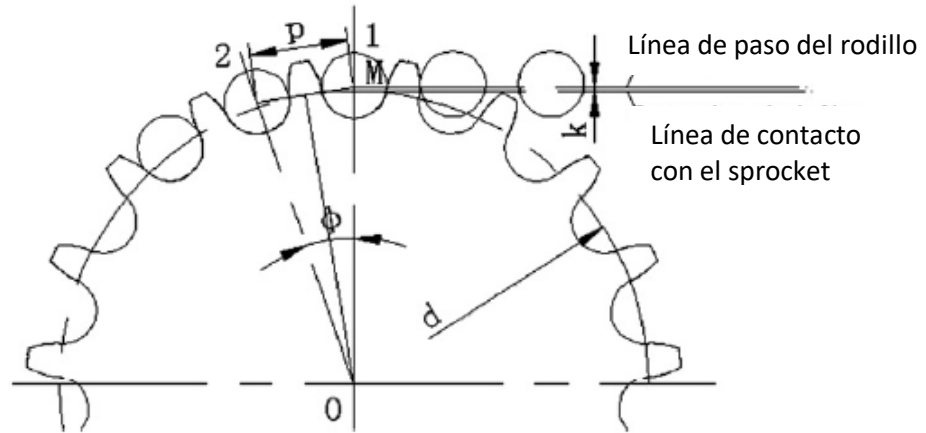


Figura 1-4: Diagrama de acople entre un sprocket y una cadena [18]

El diámetro de paso del perfil del diente esta expresado por:

$$d = \frac{pZ}{\pi} \quad (5)$$

La compensación de la línea de contacto relativa con el diámetro de paso está dada por:

$$k = \frac{p}{2 \sin \gamma} - \frac{d}{2} \quad (6)$$

Donde:

$$\phi = 360^\circ/Z$$

$$\gamma = \phi/2 = 180^\circ/Z$$

El ángulo $\phi/2$, a través del cual es eslabón gira cuando entra en contacto, se llama *Angulo de Articulación*. La rotación del eslabón a través de este ángulo provoca impacto entre los rodillos y los dientes, así como desgaste en la junta de la cadena. Por lo tanto, resulta importante reducir el ángulo de articulación tanto como sea posible para prolongar la vida útil y evitar un desgaste prematuro de los elementos.

En un sistema cartesiano de coordenadas XY, las líneas L_1 y L_2 representan la línea de paso de contacto y la línea de paso de la cadena, respectivamente, como muestra en la Figura 1-5. La línea L_1 , gira alrededor del diámetro de paso sin deslizarse. Cuando la línea L_1 rota un ángulo θ , L_1 se mueve a L_3 y la línea L_2 a L_4 .

El punto A en la línea L_1 se mueve a C. El punto B en L_2 se mueve al punto D. De acuerdo con el principio de generación de curvas involutas, la trayectoria de cualquier punto C sobre L_3 , es una familia de curvas involutas cuya ecuación es:

$$\begin{cases} x = r(\cos \theta - \sin \theta) \\ y = r(\sin \theta + \cos \theta) \end{cases} \quad (7)$$

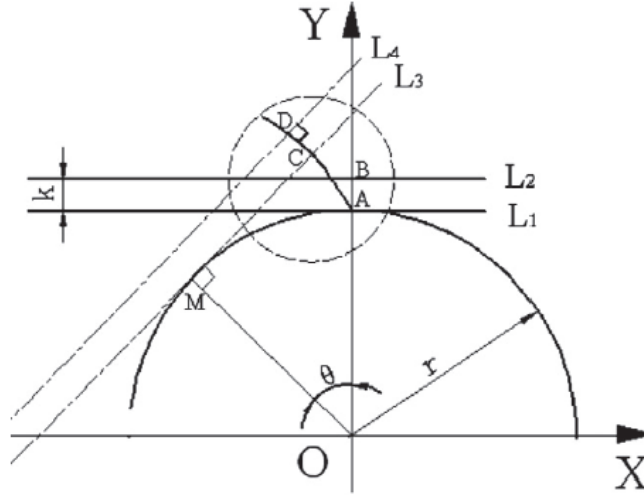


Figura 1-5: Trayectoria del centro del rodillo[18].

La línea CD es normal a la línea L_4 en cualquier posición. Por lo tanto, las coordenadas del punto $D(X,Y)$ sobre la línea L_4 y el punto $C(X,Y)$ sobre la línea L_3 siguen la siguiente ecuación:

$$\begin{cases} X = x - k \sin \theta \\ Y = y + k \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

Al sustituir la ecuación (7) en la ecuación (8), la ecuación de la trayectoria del rodillo puede ser obtenida como:

$$\begin{cases} X(\theta) = r\theta \cos \theta - (r + k) \sin \theta \\ Y(\theta) = r\theta \sin \theta + (r + k) \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

La curva resultante corresponde a la trayectoria del centro del rodillo. La curva que define el perfil del diente, es una curva equidistante a la trayectoria en mención.

1.4.1 Ecuación del *sprocket*

Se toma el sistema coordenado fijo $\{ o; \vec{i}; \vec{j} \}$ y el sistema coordenado dinámico $\{ P; \vec{i}_p; \vec{j}_p \}$, como se muestra en la Figura 1-6. La curva V es la trayectoria del centro del rodillo y la curva U es una curva equidistante a V. Asumiendo que el origen P está en la trayectoria de la curva V del centro del rodillo y que la dirección de $\vec{i}_p$ es opuesta a la línea O-P. La posición inicial del plano dinámico es $\{ P_0; \vec{i}_{p0}; \vec{j}_{p0} \}$ en el eje $\vec{j}$. Luego se dibuja un círculo con centro en P_0 y que sea fijo al sistema coordenado dinámico. Al trasladar el centro del círculo por la curva V, se forma una familia de curvas equidistantes. Al mismo tiempo, el punto M_0 en posición inicial se mueve al punto M. La posición del punto M es decidida por el ángulo de rotación β . La posición P es decidida por el ángulo de rotación α . Conforme a la Ecuación (9), la ecuación del vector de trayectoria de la curva V del rodillo en términos de Θ , está dada por.

$$\vec{r}(\theta) = X(\theta)\vec{i} + Y(\theta)\vec{j} \quad (10)$$

Y la ecuación de la familia de círculos:

$$\vec{r}' = \vec{r}(\theta) + h(\cos \beta \vec{i}_p + \sin \beta \vec{j}_p) \quad (11)$$

Donde h es la distancia entre las curvas V y U, es decir, el radio del rodillo.

El vector transformación de relación entre el plano dinámico y el plano fijo es:

$$\begin{cases} \vec{i}_p = -\sin \alpha \vec{i} + \cos \alpha \vec{j} \\ \vec{j}_p = -\cos \alpha \vec{i} - \sin \alpha \vec{j} \end{cases} \quad (12)$$

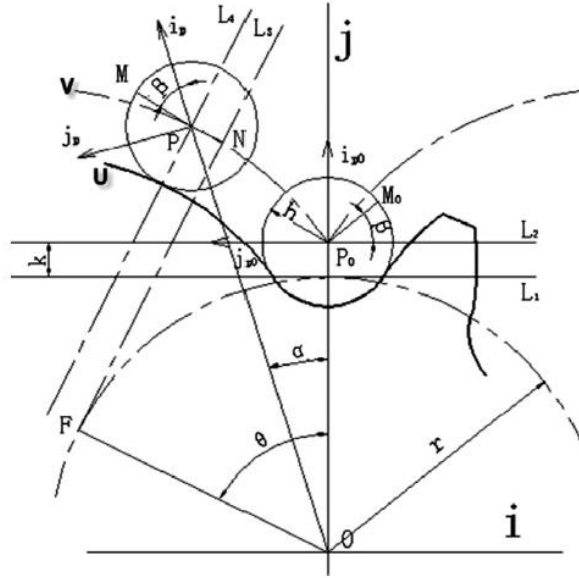


Figura 1-6: Formación del perfil del diente [17]

El valor del ángulo α en la ecuación (12), es determinado por el ángulo θ .

Es decir:

$$\alpha(\theta) = \theta - \arctan \frac{r\theta}{r+k}.$$

Sin embargo, no importa los cambios de relación de la función, en la ecuación (12), la relación de transformación siempre es sostenible.

Por lo tanto $\alpha = \theta$ y combinando la ecuación (11) y la ecuación (12), se tiene:

$$\vec{r}'(\theta) = [X(\theta) - h \sin(\theta + \beta)]\vec{i} + [Y(\theta) + h \cos(\theta + \beta)]\vec{j} \quad (13)$$

Las coordenadas en cualquier punto (X', Y') pueden ser derivadas según la ecuación (13).

$$\begin{cases} X'(\theta) = X(\theta) - h \sin(\theta + \beta) \\ Y'(\theta) = Y(\theta) + h \cos(\theta + \beta) \end{cases} \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación (9) en la ecuación (14), la derivada parcial de variables paramétricas Θ y β está dada como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial x}{\partial \theta} = -r\theta \sin \theta - k \cos \theta - h \cos(\theta + \beta) \\ \frac{\partial x}{\partial \beta} = -h \cos(\theta + \beta) \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} = r\theta \cos \theta - k \sin \theta - h \sin(\theta + \beta) \\ \frac{\partial y}{\partial \beta} = -h \sin(\theta + \beta) \end{array} \right. \quad (15)$$

De acuerdo al principio de resolver una curva envolvente, se tiene:

$$\frac{\delta x}{\delta \theta} \cdot \frac{\delta y}{\delta \beta} = \frac{\delta x}{\delta \beta} \cdot \frac{\delta y}{\delta \theta} \quad (16)$$

Combinando la ecuación (15) y la ecuación (16), se obtiene:

$$\tan \beta = -\frac{r\theta}{k} \quad (17)$$

También se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \beta = \pm \frac{r\theta}{\sqrt{k^2 + (r\theta)^2}} \\ \cos \beta = \pm \frac{k}{\sqrt{k^2 + (r\theta)^2}} \end{array} \right. \quad (18)$$

Combinando las ecuaciones (9) y (14), la curva equidistante a la trayectoria del centro del rodillo es determinada por las ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} X'(\theta) = \left(r\theta \pm \frac{hr\theta}{\sqrt{k^2 + (r\theta)^2}} \right) \cos \theta - \left(r\theta \pm \frac{hk}{\sqrt{k^2 + (r\theta)^2}} \right) \sin \theta \\ Y'(\theta) = \left(r\theta \pm \frac{hr\theta}{\sqrt{k^2 + (r\theta)^2}} \right) \sin \theta + \left(r\theta \pm \frac{hk}{\sqrt{k^2 + (r\theta)^2}} \right) \cos \theta \end{array} \right. \quad (19)$$

Donde “ $\pm$ ” expresa que la curva de trayectoria del centro del rodillo tiene dos curvas equidistantes, que están ubicadas en la parte interna y externa del rodillo. Para definir el perfil del *sprocket* se utiliza la expresión negativa en la ecuación (19) [18].

1.5 CONSIDERACIONES DE LA TRANSMISIÓN POR CADENA

Este tipo de transmisión enfrenta ciertas desventajas de acuerdo con la velocidad de servicio. A velocidades bajas presentan fatiga en los dientes, por tensión en la cadena, y vibraciones propias del efecto poligonal. El ruido y el impacto de la cadena con los dientes son desventajas que se presentan a velocidades altas. La reducción del peso y una calidad de punta son los factores determinantes para la industria en la actualidad [18].

El efecto poligonal provoca variaciones en la velocidad lineal de la cadena con respecto al *sprocket* y se debe a la diferencia en el radio de giro. En la Figura 1-7, la sección AB de la cadena es tangente al círculo de paso de la rueda dentada. Sin embargo, cuando esta gira un ángulo de $\gamma/2$, la línea de paso AB se acerca al centro de la rueda una distancia k . Por lo tanto, la velocidad no es constante. Esta variación de la velocidad se conoce como *Variación Cordal de la Velocidad*.

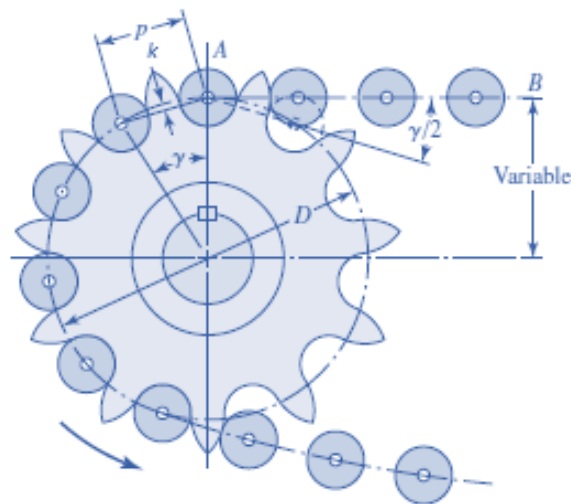


Figura 1-7: Acoplamiento entre una cadena y un sprocket [13]

En algunas aplicaciones para sincronizar componentes o procesos de precisión, esta variación se debe tener en cuenta para no alterar el procedimiento con los cambios en la velocidad, y por lo tanto en el tiempo [13], [14].

El número de dientes del *sprocket* también modifica la relación de velocidad durante la rotación a través del ángulo de paso γ . Por lo tanto es conveniente obtener un

sprocket tan pequeño como sea posible [13]. Habitualmente los fabricantes producen *sprockets* a partir de 11 dientes hasta 120.

El diámetro exterior del *sprocket* es determinado mediante la ecuación:

$$D_e = P(0,6 + \cot(\gamma)) \quad (20)$$

El espesor del *sprocket* está determinado por el ancho interno de la cadena:

$$W = 0.9 * \text{Ancho interno cadena} \quad (21)$$

2 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARAMÉTRICO CAD

2.1 BASE DE DATOS

La geometría de los *sprockets* depende del paso de la cadena, el diámetro del rodillo y el número de dientes. Sin embargo, el proceso para conocer esos valores es un proceso extenso. Por lo tanto, se compilaron las tablas de los anexos 1, 2 y 3 en una base de datos de Excel con el propósito de automatizar el proceso de selección de cadenas y además facilite los datos sobre la geometría de los sprockets involucrados en el sistema.

El funcionamiento de esta herramienta se explica en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Donde, el usuario debe ingresar manualmente los valores de potencia, tipo de carga, tipo de impulsor y RPM. A partir de los valores indicados, el programa calcula la potencia de diseño y busca en la columna de RPM, el valor de potencia de diseño calculado. Luego el programa proporciona las variables de salida necesarias para definir la geometría del *sprocket*. Como lo son el paso, el diámetro del rodillo y el

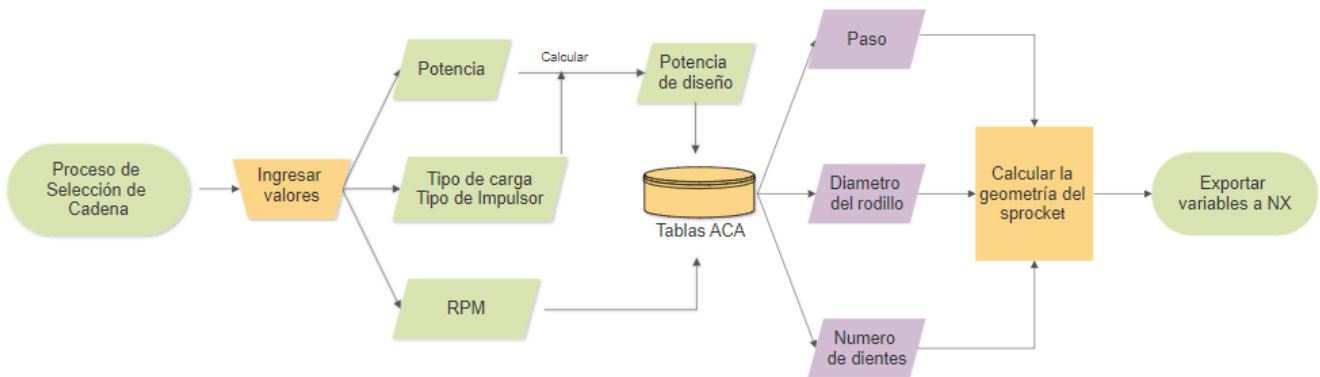


Figura 2-1: Diagrama de flujo hoja de cálculo paramétrico en Excel Fuente: Autor

número de dientes.

En la Tabla 2-1 se muestra la interface que debe manejar el usuario para calcular los parámetros que definen la geometría del *sprocket*. Los parámetros que definen la geometría, son llamados como expresiones a un archivo de *NX* para generar el perfil de acuerdo con las ecuaciones.

Tabla 2-1: Interfaz hoja de Excel Fuente: Autor

Ingrese la potencia del mecanismo	
Ingrese la Potencia	15 HP
Seleccione el tipo de carga y el tipo de impulsor	
Tipo de Carga	Choque Pesado
Tipo de Impulsor	Motor Comb Interna
El factor de servicio de su selecciones es:	
Factor de Servicio	1,7
La potencia de diseño es:	
Potencia de Diseño	25,5 HP
Ingrese la velocidad de entrada:	
Velocidad entrada	900 RPM
4.1 Potencia encontrada	25,835 HP
4.2 Numero de Cadena	ANSI 60
4.3 Paso	19,05 mm
4.4 Diametro del rodillo	11,91 mm
4.5 Numero de dientes	20
4.6 Ancho de cadena	12,7 mm
4.7 Delta Contacto [e]	0,25008362 mm

2.2 PARAMETRIZACIÓN CAD EN SIEMENS NX

Consiste en un modelo de diseño *CAD* 2D y 3D en el cual se pueden manipular las características geométricas con el uso de los parámetros que definen la topología del modelo. Estos parámetros se definen por medio de las ecuaciones que permiten cambiar la geometría sin que esta se deforme. En el Capítulo 1 se hizo un reconocimiento a las variables que definen la topología del elemento, estas fueron almacenadas y asignadas en una sección *Expressions* del programa *NX*, como se muestra en la Figura 2-2.

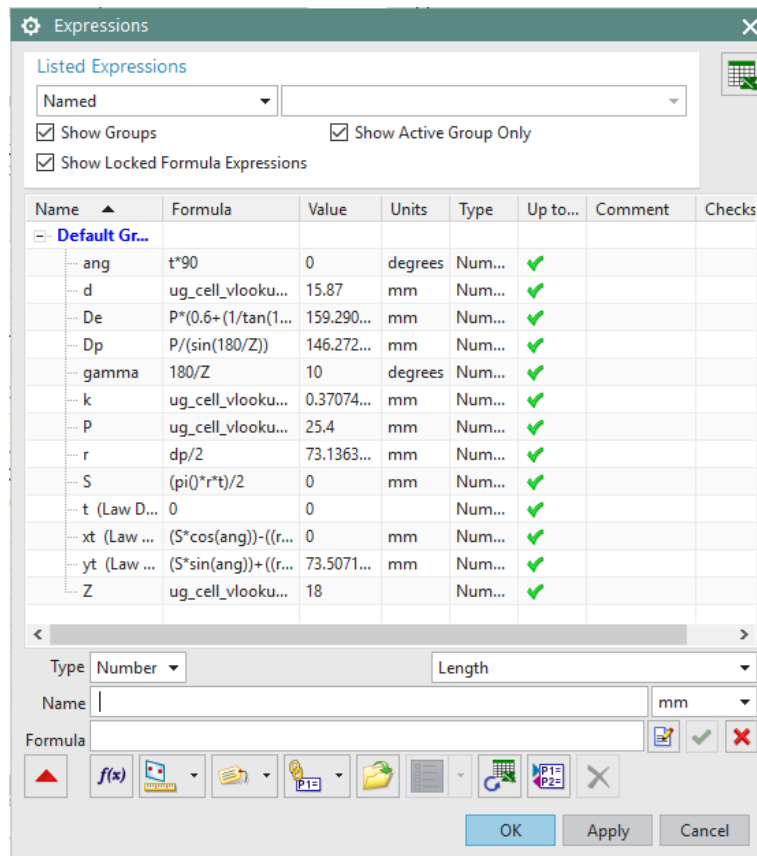


Figura 2-2: Parámetros definidos en el software NX como expresiones Fuente: Autor

En la sección *Tools > Expressions* se utiliza función *ug_cell_vlooup* para llamar el valor de una casilla específica del Excel. Para esto se debe llamar el archivo de

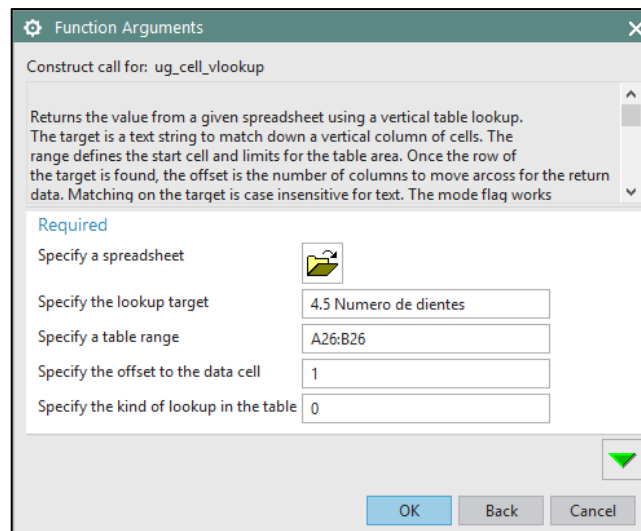


Figura 2-3: Argumentos de la función, Siemens NX Fuente: Autor

Excel que se está utilizando, por medio del icono. Por ejemplo, en la Figura 2-3 se muestra como se utilizó la función para llamar el valor del número de dientes.

2.2.1 Parametrización de la curva del perfil

Para definir la curva paramétrica es necesario declarar las funciones $X'(\theta)$ y $Y'(\theta)$ según el parámetro θ . Para reproducirlo en NX es necesario tener en cuenta que el valor θ debe estar expresado en radianes. Por lo tanto, se ajustó la expresión $r\theta$ como S .

$$S = \frac{\pi r t}{2}$$

Para ingresar la ecuación (19) al programa de NX, fue necesario realizar algunas simplificaciones en la ecuación tales como:

- $J = hS$
- $F = \sqrt{k^2 + S^2}$
- $G = hk$
- $Q = \frac{J}{F}$
- $B = \frac{G}{F}$

Además, el software vincula la curva paramétrica por medio del parámetro t . Sin embargo, el programa utiliza un rango de 0 a 1, por lo cual se reemplaza el valor de $\theta = ang$.

$$ang = t * 90$$

Así la ecuación (19) en el programa NX queda expresada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} xt &= (S - Q) * \cos(ang) - ((r + k) - B) * \sin(ang) \\ yt &= (S - Q) * \sin(ang) + ((r + k) - B) * \cos(ang) \end{aligned}$$

La curva paramétrica que define el perfil del diente se muestra en la Figura 2-4. Para adjuntarla *menú > Insert > Curve > Law Curve*

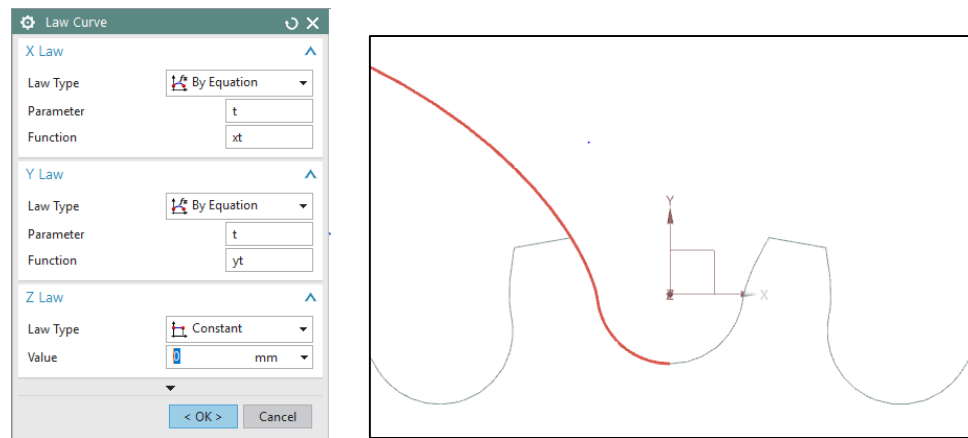


Figura 2-4: Curva paramétrica de la trayectoria del rodillo. Fuente: Autor

Para el eje X y el eje Y, el parámetro está dado por ecuación y en el eje Z es constante igual a cero.

2.2.2 Copia simétrica de la geometría

Para continuar con la construcción del diente, es necesario hacer una copia simétrica de la geometría. Es importante que sea una copia de la geometría y no una proyección simétrica de la curva. Ya que al cambiar los parámetros independientes de la geometría se pueden generar alteraciones de forma. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el procedimiento adecuando, ya que el software es muy susceptible con este tipo de operaciones.

Para hacer una copia simétrica de la geometría: *Menu > Insert > Associative copy > Mirror Geometry*

Debe seleccionar la curva paramétrica generada en el paso anterior, luego seleccionar un plano paralelo al plano YZ como se muestra en la Figura 2-5.

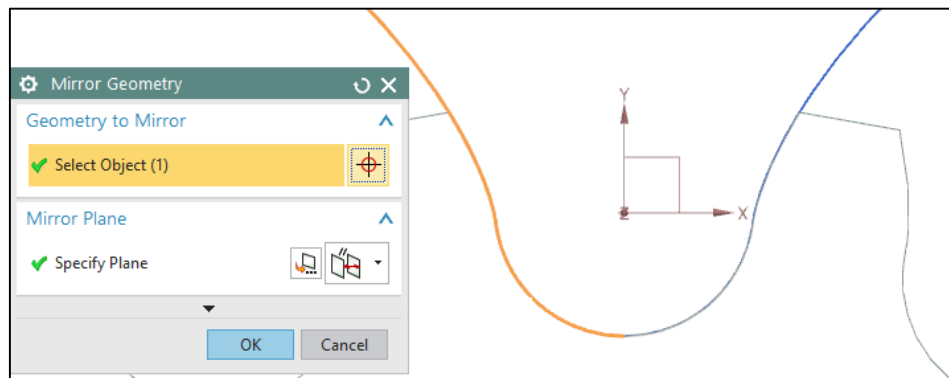


Figura 2-5: Copia simétrica de la geometría. Fuente: Autor

2.2.3 Límite del perfil

Para determinar el límite del perfil se utiliza la ecuación (20) que establece el diámetro externo del *sprocket*.

$$D_e = P(0,6 + \cot(\gamma)) \quad (20)$$

Esta expresión es útil para realizar dos operaciones. Completar el perfil de vacío del diente, es decir, crear un boceto de las curvas simétricas completamente cerrado, como se muestra en la Figura 2-6, en color naranja. También a partir del diámetro exterior se hace el disco sólido.

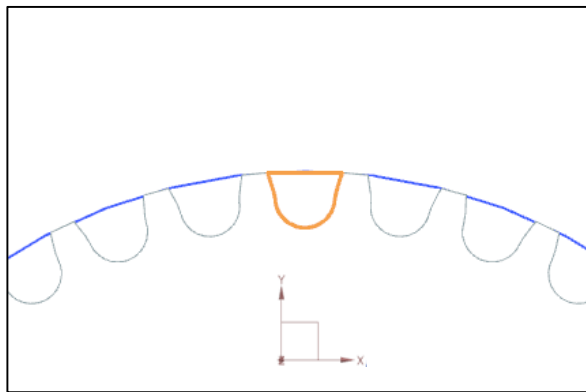


Figura 2-6: Limite del perfil Fuente: Autor

2.2.4 Operación de vaciado

Toda vez que el perfil este cerrado, se procede a realizar la operación de vaciado. En el software ir a *Home > Extrude*. Debe seleccionar el perfil que se muestra en la Figura 2-7. Luego debe completar el cuadro de dialogo del programa indicando que el área seleccionada se quiere sustraer y es pasante.

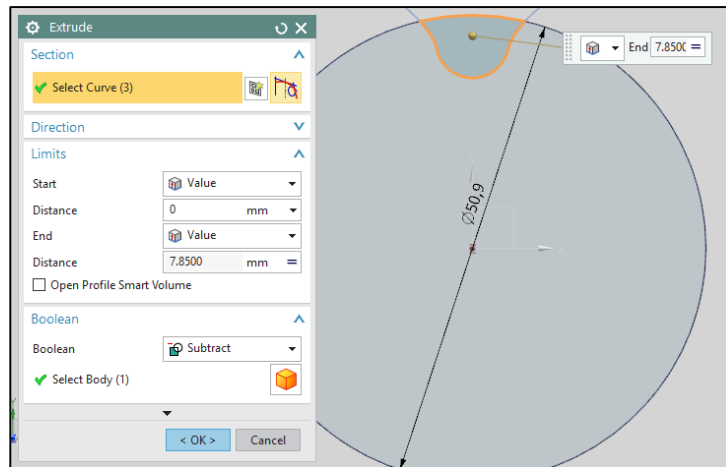


Figura 2-7: Operación de vaciado Fuente: Autor

2.2.5 Característica de patrón circular

Para configurar el patrón circular a partir de las curvas paramétricas, es importante que el sólido haya sido creado con un espesor igual al de la ecuación 22, como se muestra en la Figura 2-7.

$$W = 0.9 * \text{Ancho interno cadena} \quad (22)$$

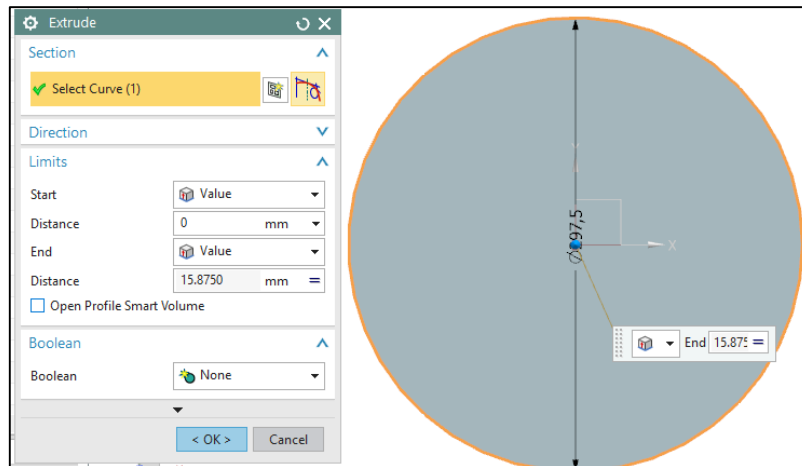


Figura 2-8: Crear el volumen Fuente: Autor

Ahora se debe seleccionar la opción en el programa NX relacionada: *Home > Pattern Feature*. Se abre una ventana como muestra la Figura 2-8. En *Select Feature* se debe seleccionar la operación de vaciado. Luego debe especificar que el patrón es circular, el vector corresponde al eje Z y el punto de referencia es el origen del boceto. La ubicación del patrón depende de la cantidad de dientes, por lo

tanto, debe utilizar la expresión Z y debe distribuirse en toda la superficie del disco, es decir, 360°, como muestra la Figura 2-9.

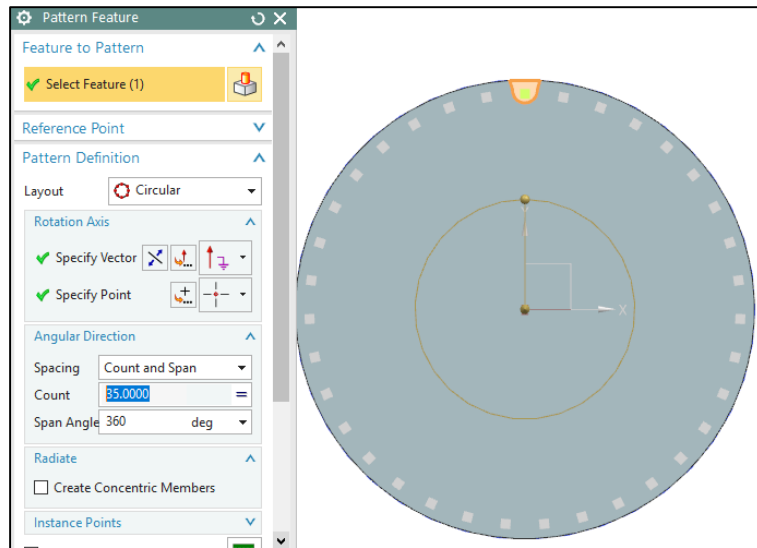


Figura 2-9: Característica de patrón circular Fuente: Autor

Como resultado de la operación de característica de patrón, se obtiene la pieza que se muestra en la Figura 2-10.

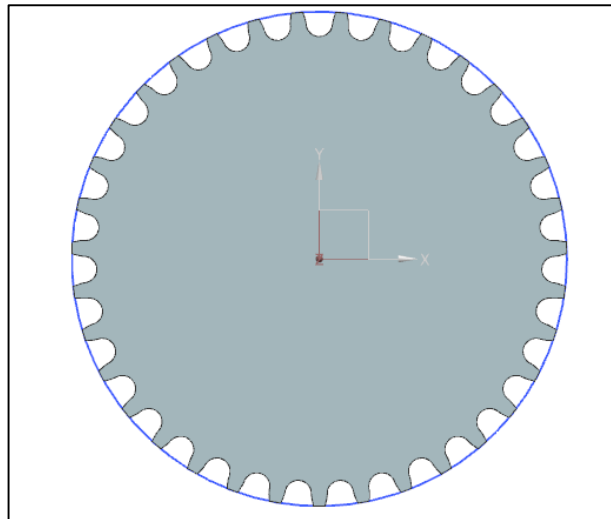


Figura 2-10: Formación del sprocket Fuente: Autor

2.2.6 Manzana del sprocket y eje de transmisión

El diámetro de la manzana y el diámetro del eje de transmisión varía de acuerdo al número de dientes del sprocket. Por lo tanto, en las tablas de Excel

correspondientes a la base de datos de la *American Chain Assosiation*, se incluyeron las medidas correspondientes al diámetro de manzana, espesor de manzana y diámetro de eje de transmisión, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Estos parámetros fueron llamados como expresiones al software *NX* para que la topología de la pieza no se viera afectada y el *CAD* fuera completamente paramétrico.

La geometría de la manzana del sprocket y el diámetro del eje de transmisión fueron tomados del catálogo del fabricante Intermec S. A. [19].

Tabla 2-2: Datos geométricos tomados de los catálogos de fabricantes Fuente: Autor

5. Datos de geometria fabricantes sprockets	
5.1 Diametro manzana	43 mm
5.2 Ancho manzana	22 mm
5.3 Diametro eje	12,7 mm

Ahora debe añadir dos bocetos que represente gráficamente la geometría de la manzana y el eje utilizando las expresiones, los bocetos deben ser independientes, pues el software es muy sensible al realizar operaciones de extracción y vaciado. Como se muestra en la Figura 2-11.

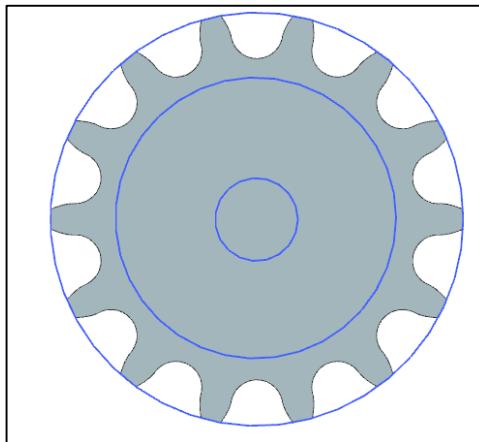


Figura 2-11: Boceto de manzana y eje para crear el volumen y el agujero. Fuente: Autor

Ahora debe utilizar el boceto para la operación correspondiente, por lo tanto, para la manzana del sprocket debe seleccionar el boceto y proyectar de acuerdo al ancho de la manzana. Para el diámetro del eje debe seleccionar agujero pasante.

2.2.7 Biselado

El biselado consiste en reducir el área transversal de los dientes con el propósito de que encaje de manera más suave en los eslabones de la cadena y para disminuir el ruido. Las dimensiones C y R , que se muestran en la Figura 2-12, fueron tomadas del catálogo de Norelem [15] y agregadas a la hoja paramétrica de Excel.

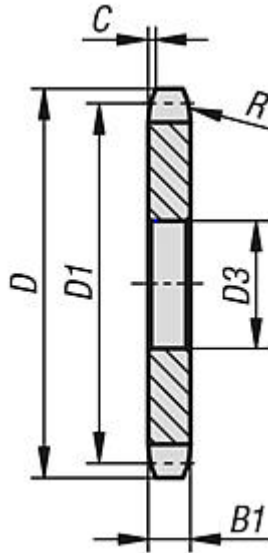


Figura 2-12: Plano de un sprocket del catálogo Norelem [15].

2.3 MODELO PARAMÉTRICO CAD

La Figura 2-13: A: sprocket de 35 dientes. B: sprocket de 18 dientes. C: sprocket de 11 dientes.
Fuente: Autor

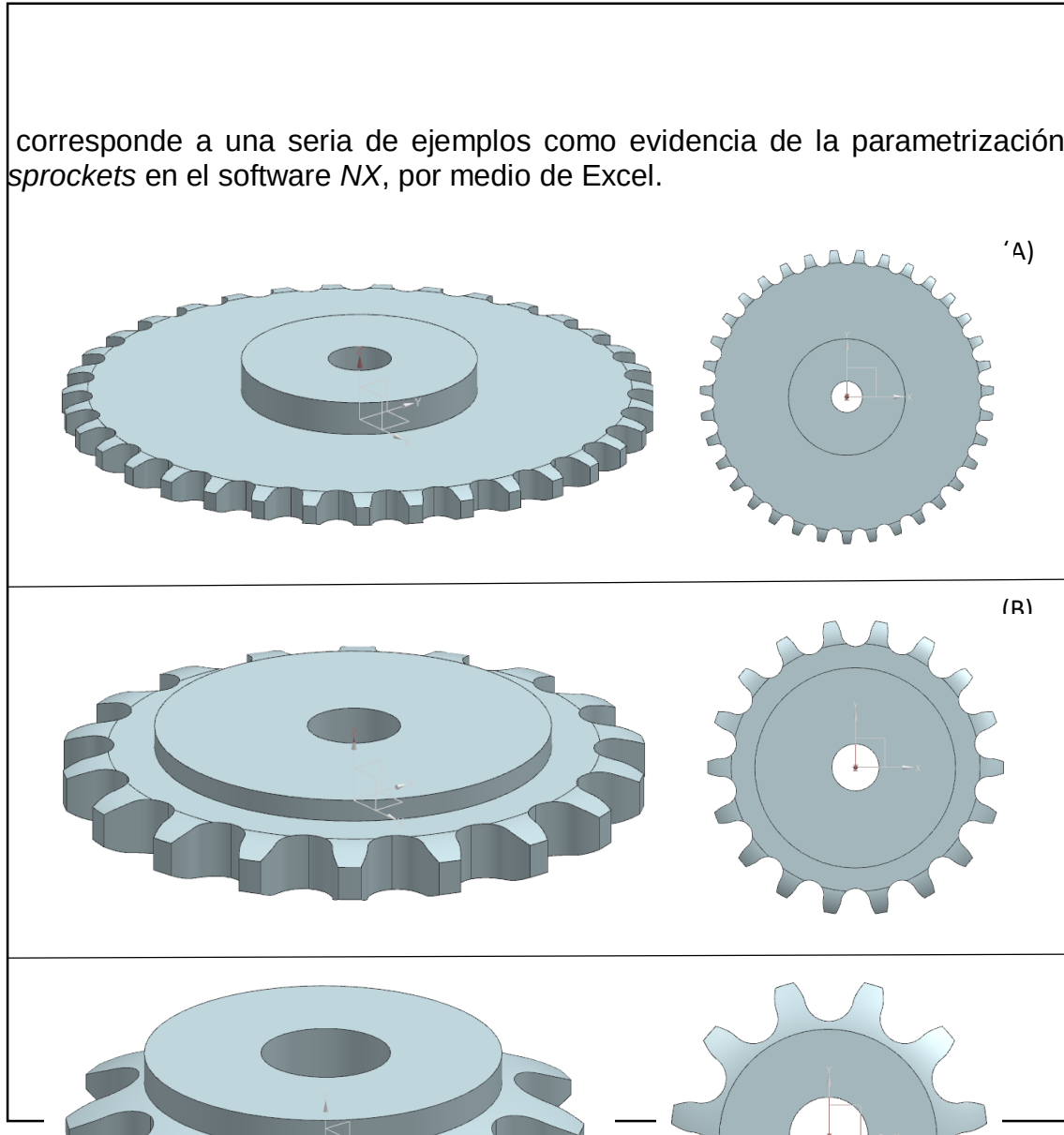


Figura 2-13: A: sprocket de 35 dientes. B: sprocket de 18 dientes. C: sprocket de 11 dientes.
Fuente: Autor

3 IMPLEMENTACIÓN DE MECANIZADO BASADO EN CARACTERÍSTICAS

Este capítulo resalta una de las últimas tecnologías en automatización de la programación de control numérico disponibles en el mercado *CAD/CAM*; y como esta tecnología puede mejorar la productividad de la manufactura a partir del mecanizado basado en características – *FBM*.

El *FMB* busca que la programación de control numérico sea más fácil y rápida con la programación automatizada. Esta herramienta puede proporcionar mayor calidad como resultado de minimizar los errores y brindar mayor estandarización mediante la aplicación de procesos y recursos personalizados. El concepto *FBM* requiere software que pueda reconocer funciones de mecanizado, determinar el mejor proceso de maquinado para cada función, y luego generar las trayectorias de herramientas para cada operación, todo de forma automática.

Estas funciones de mecanizado son aplicadas según la geometría prismática que encuentra en el elemento a fabricar. Por tanto, es necesario definir cuáles son las geometrías prismáticas que se pueden identificar con el software *Siemens NX*.

3.1 GEOMETRÍAS PRISMÁTICAS

Las geometrías prismáticas describen información acerca del diseño y modelado de la pieza, las cuales están directamente relacionadas con las operaciones de maquinado, siendo este el primer criterio para seleccionar el proceso de mecanizado adecuado dentro del software *CAD/CAM*.

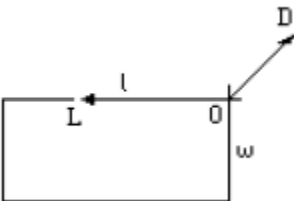
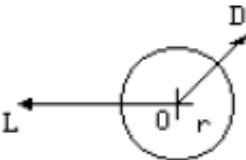
En la información geométrica están asignadas las dimensiones propias de cada elemento tales como su ancho, longitud, radios, profundidades, áreas, etc. También establece la posición del eje coordenado con respecto a la característica.

Según el estándar para el intercambio de datos de modelos de productos *Standard for the Exchange of product data – STEP*, las geometrías prismáticas se dividen en superficies planas, redondeos, agujeros, ranuras, cajas y esquinas.

3.1.1 Superficies planas

Los parámetros de las superficies planas de forma general son: Ancho (w - *width*) y longitud (l -*length*) sin depender de la forma, el parámetro radio es agregado cuando la superficie presenta redondeos, y puede ser el único parámetro si es el caso que la superficie sea redonda. Como se muestra en la Tabla 3-1 los parámetros para superficies planas donde 'D' es la dirección de la profundidad o eje '-Z' y 'L' en dirección positiva de la longitud con 'O' como origen.

Tabla 3-1: Parámetros para superficies [20]

Tipo de Superficie	Parámetros
 Superficie Plana	• Ancho 'w' • Longitud 'l'
 Superficie circular	• Radio 'r'

3.1.2 Agujeros

La geometría del agujero se divide en dos: Agujero Pasante y Agujero Ciego. Estas geometrías tienen los mismos parámetros, solo que para el agujero ciego se debe adicionar el ángulo de chaflán en el suelo. Esto en caso que sea un agujero taladrado y su forma final tenga la misma topología de la broca, como se muestra en la Figura 3-2. Si el fondo del agujero ciego es plano, el software no lo reconoce como agujero, sino como ranura de fondo recto, por ejemplo.

Los parámetros como diámetros, profundidad, chaflán, ángulo de chaflán, profundidad de chaflán, ajuste y acabado superficial deben ser agregados mediante la herramienta de información relacionada con el producto y la manufactura del elemento (*Product and Manufacturing Information – PMI*), en la interfaz del CAD.

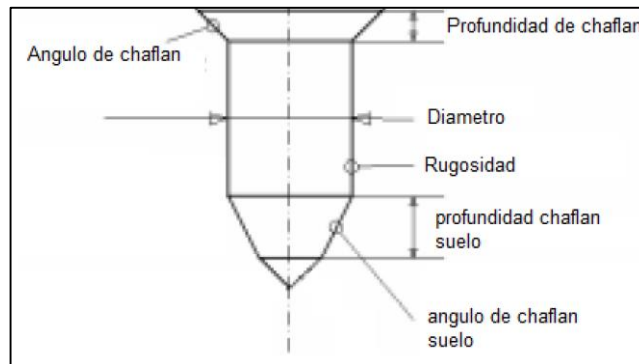


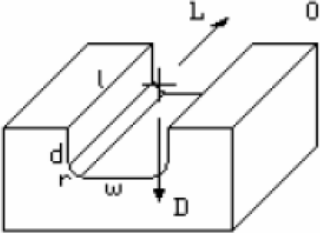
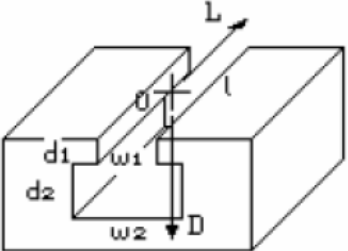
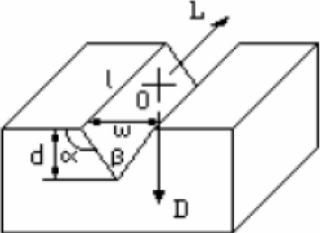
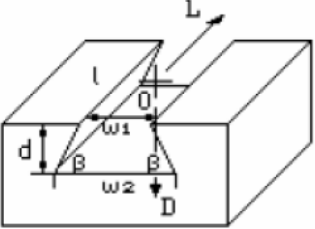
Figura 3-2: Parámetros para agujeros ciegos [20]

La ISO 1101 define *PMI* como el estándar que preside el diseño asistido por computador CAD en 3D y proyectos colectivos para el desarrollo de fabricación de productos. Tiene a su alcance la capacidad de incluir dimensiones en cotas 3D e información de precisión como tolerancias geométricas y dimensionales, acabados superficiales, entre otros. Esta información es fundamental para la selección adecuada de estrategias y herramientas que garanticen resultados positivos.

3.1.3 Ranuras

La geometría ranura incluye: Ranura Recta, Ranura en forma de T, Ranura en forma de V y Ranura en cola de milano. Los parámetros generales de estas ranuras son, Profundidad (*d- depth*), longitud (*l-length*) y ancho (*w-width*). Como se muestra en la Tabla 3-2, donde 'D' es la dirección de la profundidad o eje '-Z' y 'L' es la dirección de la longitud con origen en 'O'.

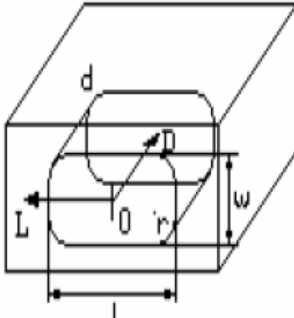
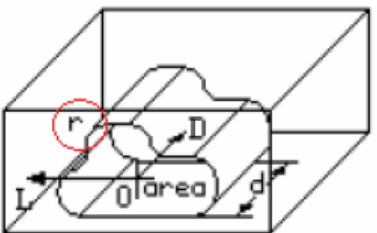
Tabla 3-2: Parámetros para superficies[20]

Tipo de Ranura	Parámetros
 Ranura recta	• Ancho 'w' • Longitud 'l' • Profundidad 'd' • Radio de las paredes 'r'
 Ranura en forma de T	• Ancho₁ 'w_1' • Ancho₂ 'w_2' • Longitud 'l' • Profundidad₁ 'd_1' • Profundidad₂ 'd_2'
 Ranura en forma V	• Ancho 'w' • Angulo 'α' • Longitud 'l' • Profundidad 'd'
 Ranura en Cola de Milano	• Ancho₁ 'w_1' • Ancho₂ 'w_2' • Angulo 'β' • Longitud 'l' • Profundidad 'd'

3.1.4 Cajeras

Las cajeras cuadradas o de forma libre están definidas por los parámetros de profundidad (d -*depth*), longitud (l -*length*), ancho (w -*width*) y el radio ' r ' de las aristas, como se muestra en la Tabla 3-3. Donde ' D ' es la dirección de la profundidad o eje ' $-Z$ ' y ' L ' es la dirección de la longitud con origen en ' O '. En el caso de la ranura de forma libre, que está compuesta por diferentes radios, solo es necesario declarar el radio de menor valor, ya que este será el criterio de selección de herramienta.

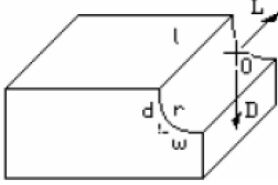
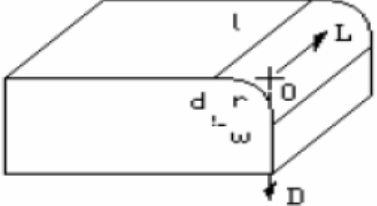
Tabla 3-3: Parámetros para Cajeras [20]

Tipo de Cajera	Parámetros
 Cajera Recta	• Ancho 'w' • Longitud 'l' • Profundidad 'd' • Radio de las paredes 'r'
 Cajera de Forma Libre	• Ancho 'w' • Longitud 'l' • Profundidad 'd' • Radio menor de las paredes 'r'

3.1.5 Redondeos

Comprenden dos tipos: redondeos convexos y redondeos cóncavos. Los parámetros no cambian uno con respecto al otro. La Tabla 3-4 muestra los parámetros relacionados con estas geometrías donde 'D' es la dirección de la profundidad o eje '-Z' y 'L' es la dirección de la longitud con origen en 'O'.

Tabla 3-4: Parámetros para redondeos [20]

Tipo de redondeo	Parámetros
 Redondeo Cóncavo	• Ancho 'w' • Longitud 'l' • Profundidad 'd' • Radio suelo 'r'
 Redondeo Convexo	• Ancho 'w' • Longitud 'l' • Profundidad 'd' • Radio suelo 'r'

3.2 METODOLOGÍA PARA AUTOMATIZAR LA PROGRAMACIÓN DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO

Los antecedentes para el desarrollo de este proyecto son muy escasos. Sin embargo, en la Universidad Santo Tomás existe un precedente con el proyecto de grado “Automatización de la planeación del proceso de mecanizado de productos a partir de la generación de estrategias (*FBM* y *KBM*) empleando la herramienta *siemens NX*” [12] donde se estableció una metodología para el reconocimiento de características y estrategias de mecanizado.

Este método se ha planteado con el propósito de determinar cuál es la información de manufactura de la geometría y definir las estrategias de mecanizado que mejor se adaptan a las condiciones del producto. A través de la herramienta *FBM* el programa hace el reconocimiento de características y plantea estrategias de mecanizado directamente de la base de datos del software. No obstante, esta base de datos es susceptible a cambios para beneficiar los intereses de la compañía, o en caso de limitar las estrategias de mecanizado a las herramientas que se disponen.

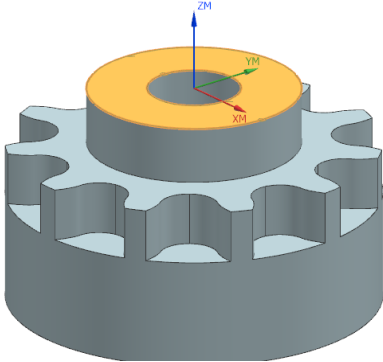
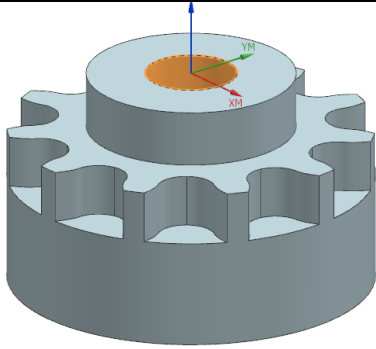
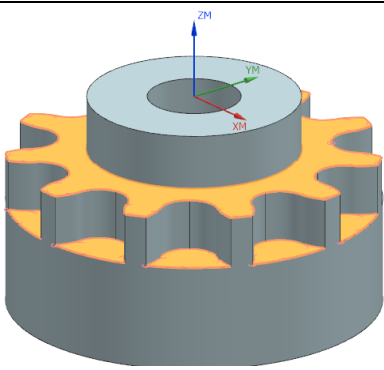
3.2.1 Definir los parámetros y características de las geometrías prismáticas en el modelo CAD

3.2.1.1 Identificación de geometrías prismáticas

La etapa inicial se dirige a identificar las geometrías prismáticas de la pieza que se desea fabricar con la finalidad de concretar las características presentes en el elemento. Consiste en reconocer agujeros, cajas y ranuras rectangulares, en U o redondas.

Para esta etapa de estudio *CAM*, se modificó del *CAD* agregando la materia prima inferior suponiendo el cilindro completo de la materia prima, para facilitar el reconocimiento de características. Para este caso de estudio se han identificado 3 tipos de geometrías prismáticas, tal como se muestra en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Geometrías prismáticas identificadas en el sprocket Fuente: Autor

• Superficie redonda: Comprende el planeado de la superficie adyacente a la manzana	
• Agujero: Comprende el agujero de centro del <i>sprocket</i>	
• Cajeras de forma libre: La manzana y los dientes son considerados cajeras de forma libre.	

3.2.1.2 Alimentación de información geométrica por medio de *PMI* y uso atributo de cara

Para automatizar el proceso de generación de programas de control numérico, se debe realizar un reconocimiento de toda la información relacionada con el producto y la manufactura del elemento *PMI*.

El usuario debe garantizar que las características presentes en su elemento estén correctamente referenciadas según sus atributos. Esta información hará que el software reconozca de manera adecuada la topología de la pieza y también facilite la selección de herramientas más convenientes para el proceso de mecanizado. La alimentación de información geométrica se realiza mediante la herramienta *PMI*, en la interface *CAD* del software. *PMI* es un sistema de acotación donde se podrán asignar dimensiones, tolerancias, ajustes y acabados superficiales, con el objetivo de definir las características que se encontraron en el *sprocket*.

En ocasiones alimentar la información geométrica de la pieza por medio de la herramienta *PMI* es un proceso complejo, debido a que es una acotación en 3D y algunas características no son fáciles de definir. Por lo tanto, debe agregar los parámetros por medio de *menú > Propiedades > Atributo de cara*. El usuario tendrá que diligenciar una planilla como se muestra en la Figura 3-3 dando los parámetros ligados a la cara que seleccionó.

Title/Alias	Value	Units	Templ..

☐ Allow Multiple Values

Category (optional):

Title/Alias: WIDTH

Data Type: Number

Dimensionality: Length

Units: mm

Value: 12.7000

Link to Expression:

Add New Attribute:

Export:

Export Attributes to Information Window:

OK Apply Cancel

Figura 3-3: Atributo de cara

Luego de completar la primera fase del proceso de automatización de la generación de programas de control numérico, es necesario familiarizarse con las bases de datos que dispone el software en la librería de herramientas, los parámetros de reconocimiento de características y las reglas de mecanizado

3.2.2 Reconocimiento de características por medio de herramienta *FBM* en el modelo *CAM*

Para llevar a cabo esta fase es necesario implementar el modelo *CAD* desarrollado en capítulos anteriores y verificar que las geometrías prismáticas que fueron identificadas y posteriormente definidas mediante *PMI*, ahora sean reconocidas por el software.

En el proceso de reconocimiento de características debe buscar en la interface *CAM* de *NX*, el recurso llamado *Machining Feature Navigator* para ejecutar el comando *Find Features*. A continuación, se abrirá un cuadro de dialogo como el que se muestra en la Figura 3-3: Cuadro de dialogo Find Features. Fuente: Autor

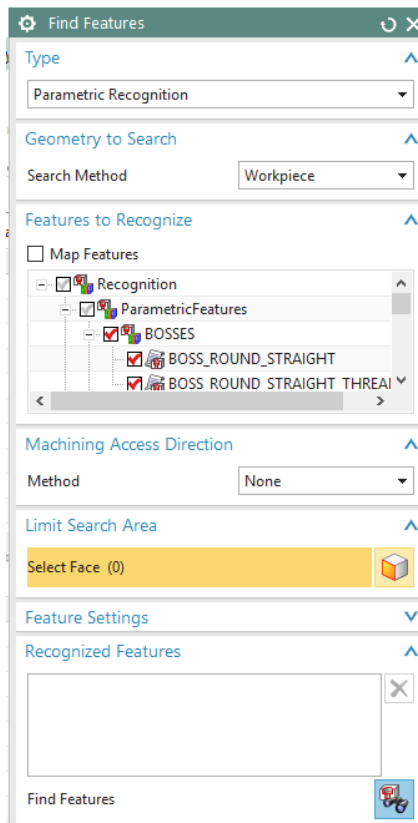


Figura 3-4: Cuadro de dialogo Find Features.
Fuente: Autor

Inicialmente el software únicamente reconoce las características agujero centro (*STEP1HOLE*) y la superficie redonda (*SURFACE_PLANAR_ROUND*), según el tipo de reconocimiento paramétrico (*Parametric Recognition*), como se muestra en la Figura 3-5.

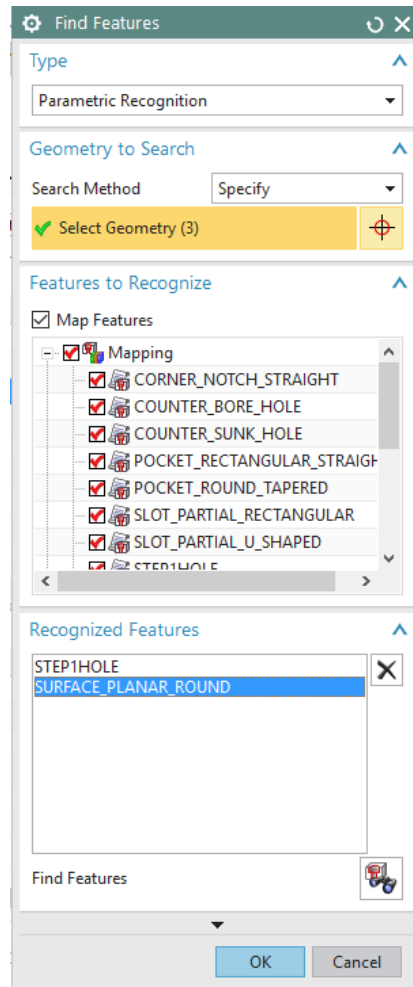


Figura 3-5: Selección del tipo de reconocimiento Fuente: Autor

3.2.3 Enseñanza de características a través de *FBM*

La enseñanza de características a través de *FBM* es sencilla, gracias a la amplia base de datos que incluye el programa. El tipo de reconocimiento para caras y cajeras (*Legacy Face and Pocket Recognition*), que consiste en seleccionar aquellas características que no fueron reconocidas e indicar cuál es la característica equivalente, como muestra la Figura 3-6, es decir que característica adopta los parámetros y la forma de los dientes y la manzana para nuestro proyecto. En nuestro caso la característica que equivalente para los dientes y la manzana es la cajera de forma libre (*POCKET_FREESHAPE*) sin embargo la opción no está disponible. Por lo tanto, debe seleccionar *POCKET_RECTANGULAR_STRAIGHT*.

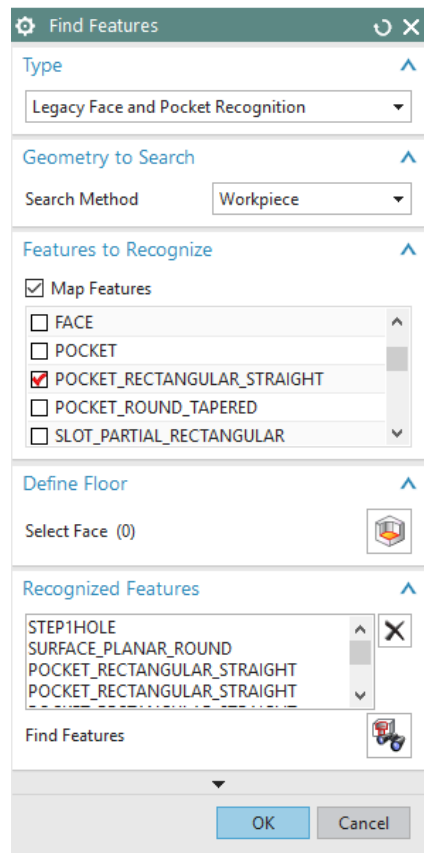


Figura 3-6: *Legacy Face and Pocket Recognition* Fuente: Autor

En la Figura 3-7 se muestra todas las características que fueron encontradas en el modelo.

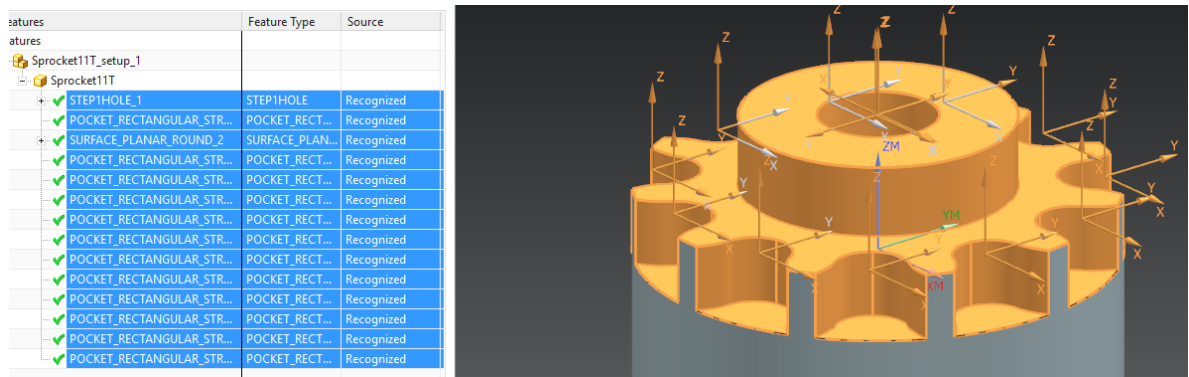


Figura 3-7: Características encontradas en el modelo. Fuente: Autor

Es importante verificar que los parámetros que se definieron por medio de la herramienta *PMI* para las geometrías prismáticas hayan sido registrados por el sistema. Para esto debe seleccionar la característica y revisar los atributos en la parte inferior como muestra la Figura 3-8.

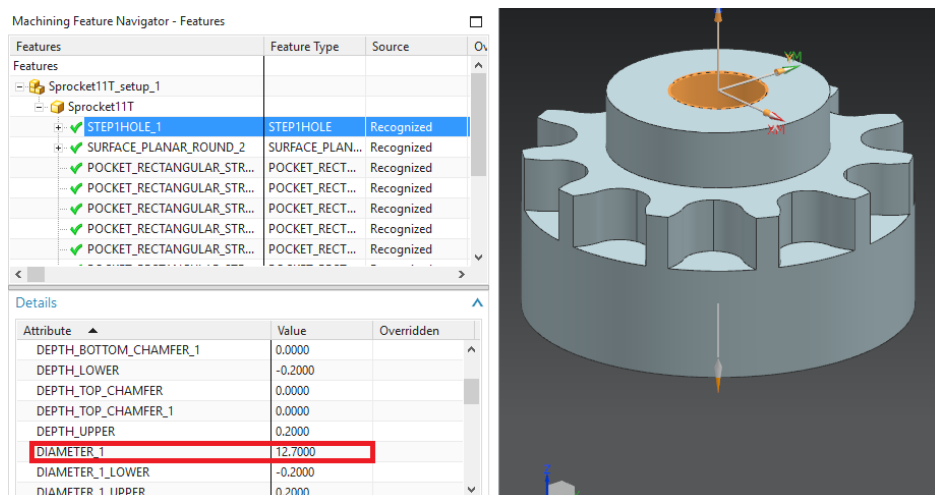


Figura 3-8: Lectura de atributos Fuente: Autor

3.3 DEFINIR ESTRATEGIAS DE MECANIZADO PARA LAS CARACTERÍSTICAS ENCONTRADAS

Antes de entrar a la interface *MKE* para manipular las bases de datos es importante conocer cuáles son las estrategias de mecanizado que el programa plantea previamente, para saber con precisión cuales son las que debe manipular de acuerdo a los recursos disponibles.

Para esto el usuario debe seleccionar las características encontradas en el *Machining Feature Navigator*, desplegar el menú y para poder crear el proceso de característica (*Create Feature Process*) como muestra la Figura 3-9.

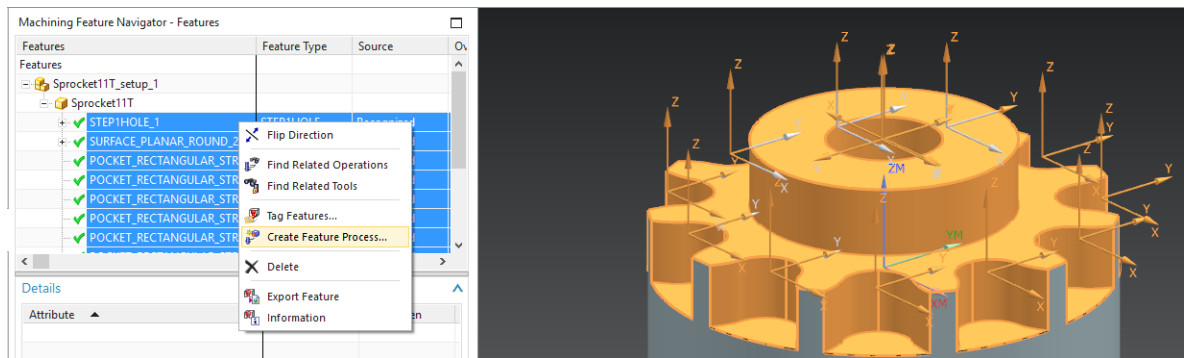


Figura 3-9: Create Feature Process Fuente: Autor

El usuario tendrá que seleccionar la librería de la cual quiere que se evalúen las reglas de mecanizado, como se muestra en la Figura 3-9: Selección de librerías de mecanizado Fuente: Autor

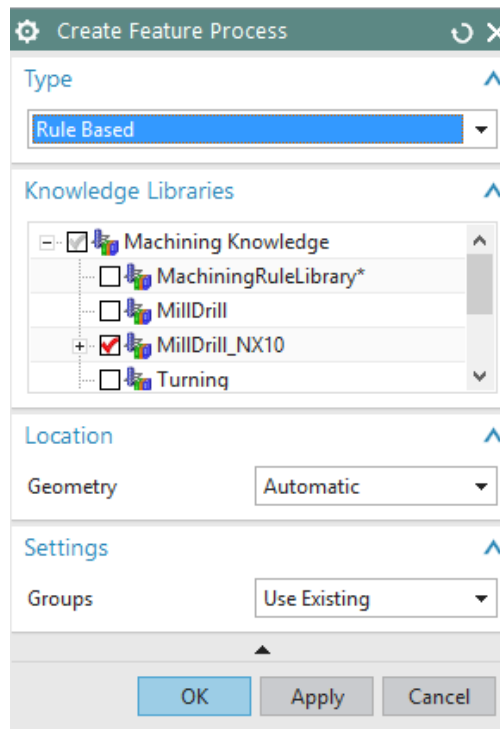


Figura 3-10: Selección de librerías de mecanizado Fuente: Autor

Para este caso de estudio, la librería *MilldrillNx10* incluye las reglas de mecanizado necesarias para maquinar las geometrías prismáticas encontradas en nuestra pieza.

El programa evalúa una variedad de opciones para cada paso en una secuencia de maquinado. La lógica considera los requerimientos de cada función identificada y los compatibiliza con los estados de entrada y salida de las operaciones disponibles en la base de datos de *KBM*. Selecciona aquellos que satisfacen los requerimientos de dimensión, tolerancia y material para los cuales dispone de una herramienta de corte.

Cuando hay varias soluciones posibles, el software selecciona aquella a la que se ha asignado la clasificación de preferencia más alta, tal vez menor costo o menor tiempo de maquinado.

3.4 CONTROL Y ALMACENAMIENTO DE BASES DE DATOS

Esta etapa del proceso consiste en manipular las bases de datos de herramientas y estrategias de mecanizado que contiene el programa *NX*. Por consiguiente, es necesario conocer la ubicación del archivo y la interfaz de administración de las mismas.

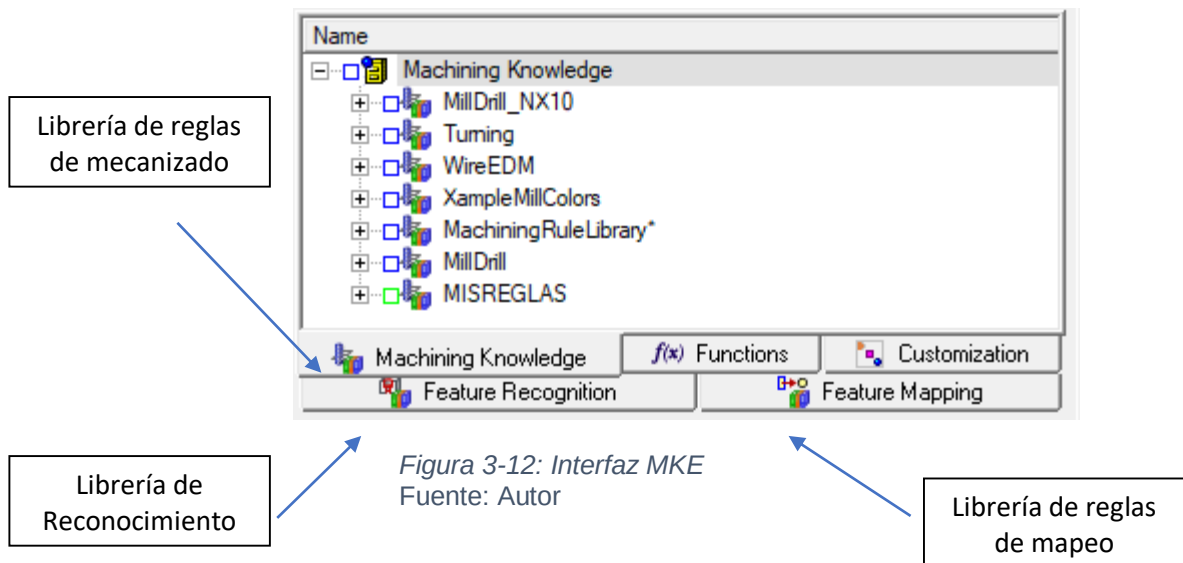
- **Herramientas:** El proyecto debe tener en cuenta las herramientas disponibles en el centro de mecanizado de la Universidad Santo Tomas, por lo tanto, el archivo debe ser modificado y almacenado correctamente para que la herramienta *FBM* haga uso de las herramientas consideradas.
- **Geometrías:** Estas geometrías son aquellas que el programa no reconoce y el usuario debe enseñarlas. Existe un proceso para características determinadas en las que el usuario debe crear una serie de plantillas con las posibles variaciones de la característica y sus parámetros de reconocimiento, para agregarla a la base de datos del software.
- **Estrategias de mecanizado:** Comprenden todos los procesos de mecanizado que puede hacer una maquina CNC. Estos procesos están organizados de acuerdo a una prioridad predeterminada por SIEMENS, distributor del software y unos criterios de aplicación que determinan cual es el proceso que mejor se adapta a las condiciones de la característica.

Siemens NX incluye un programa complementario llamado Editor de Conocimientos de Mecanizado (*Machining Knowledge Editor – MKE*). En este programa se pueden administrar y modificar todos los datos de mecanizado, herramientas y geometrías.

3.5 MACHINING KNOWLEDGE EDITOR – MKE

El propósito principal del editor de conocimiento de manufactura es clasificar las operaciones de mecanizado y asignar herramientas para cada operación. También organiza las operaciones de acuerdo a la característica que son capaces de generar. Para el caso de un agujero, este puede ser mecanizado mediante fresa, escariador o broca. Generalmente existen parámetros como el acabado superficial, la relación diámetro/profundidad y la tolerancia de los diámetros que definen cual es la herramienta apropiada según los criterios del producto.

El *MKE* permite administrar las librerías de operaciones de mecanizado y características. Además, es el medio para programar estrategias, reglas o normas de mecanizado para que una vez sea aplicado el reconocimiento estas se generen de acuerdo a las condiciones del producto. En la interfaz *MKE* se encuentran las librerías de reconocimiento, mecanizado y mapeo de características, como se muestra en la Figura 3-10: Interfaz MKE Fuente: Autor



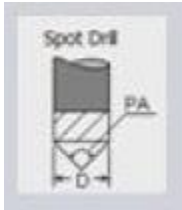
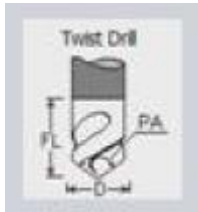
3.5.1 Regla de mecanizado

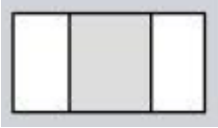
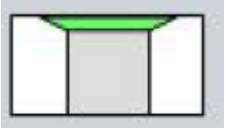
Una regla de mecanizado se define como una característica (*More Worked Feature – mwf.*) puede ser maquinada a partir de otra característica (*Less Worked Feature – lwf.*) a partir de una clase específica de herramienta de corte y determinada operación. Una regla de mecanizado corresponde a una única operación ya sea para cajas, agujeros taladrados o fresados.

Una regla de mecanizado es una operación de fabricación como se muestra en la Tabla 3-6 en donde se describe:

- En qué condiciones se aplica la operación
- Los resultados que se pueden obtener. Tipo de geometría, tolerancia, acabado superficial.
- Herramienta necesaria. Tipo de herramienta y rango de dimensiones.
- Si necesita una operación de mecanizado previa.

Tabla 3-6: Ejemplos de operaciones según la regla de mecanizado. Fuente: Autor

REGLA DE MECANIZADO.	GEOMETRIA INICIAL – lwf.	HERRAMIENTA	GEOMETRIA FINAL – mwf.
Broca de Centro	 BLANK		 POCKET_ROUND_TAPPERED
Taladrado	 POCKET_ROUND_TAPPERED		 STEP1HOLE

Avellanado			
	STEP1HOLE		CHAMFER_S1H

Estos son algunos ejemplos de las operaciones que se pueden realizar de acuerdo a las reglas de mecanizado. El comando *Create Feature Process...* en NX empieza a compilar todas las reglas de mecanizado que logren la característica deseada a partir de la geometría inicial.

Al seleccionar una regla de mecanizado de la librería, el software brinda una ventana de información como se muestra en la Figura 3-13.

Name	FRESADO_AGUJEROS	OutputFeatures (mwf.)	STEP1POCKET
OperationClass (oper.)	hole_making.HOLE_MILLING	InputFeatures (lwf.)	BLANK
Priority	2	Resources (tool.)	'End Mill (non indexable)'

Figura 3-13: Información de la estrategia de mecanizado Fuente: Autor

Aquí se puede leer el nombre de la regla, el tipo de operación, la geometría inicial y final, el tipo de herramienta. La casilla de prioridad determina el valor jerárquico de la regla de mecanizado sobre otras reglas. Por ejemplo, el valor más alto se les da a operaciones que tengan menor costo, así resulta más conveniente para la empresa.

3.5.1.1 Características de la regla de mecanizado

Para cada regla o estrategia de mecanizado se establecen una serie de criterios que definen las condiciones en las que se pueden aplicar la regla, los atributos de la herramienta, los parámetros de la geometría inicial y los atributos de la operación, como se muestra en la Figura 3-14.

Conditions	Constants	Materials	Machines	Explanation	Image	Add-ons
REM Application Criteria ← Criterios de aplicación						
\$\$ Rule rejected because condition FALSE						
REM Tool Attributes ← Atributos de herramienta						
REM Less Worked Feature Attributes ← Atributos característica antes de mecanizado						
REM Operation Attributes ← Atributos de operación						

Figura 3-14: Vista de condiciones regla MKE Fuente: Autor

Para este proyecto se estableció que los agujeros de centro de los *sprockets* de diámetro mayor a 16mm. Serán agujeros maquinados con escariador. Por lo tanto será agujeros fresados. Para agujeros de diámetro menor o igual a 16, deberán ser taladrados y luego rimados, tal como se muestra en la Figura 3 -15: Criterios de aplicación para agujeros de centro.

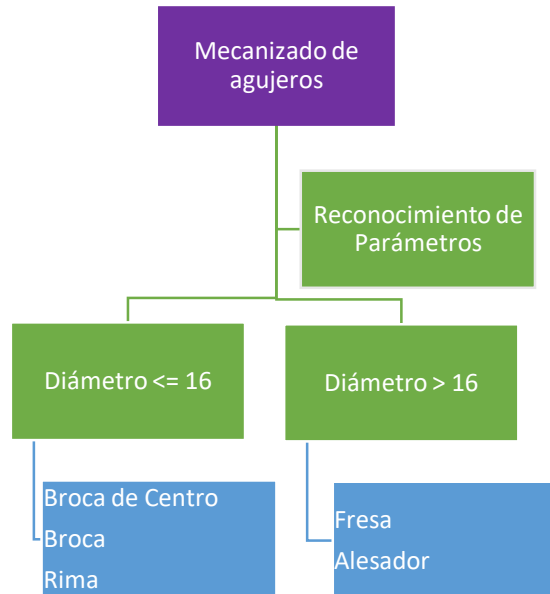


Figura 3 -15: Criterios de aplicación para agujeros de centro Fuente: Autor

Criterios de Aplicación (*Applicacion Criteria*)

Los criterios de aplicación son los parámetros que definen cuando una estrategia de mecanizado es la indicada para la operación. Generalmente están relacionados con la calidad (rugosidad y tolerancias) y la geometría final – *mwf*.

Name	FRESADO_AGUJEROS
OperationClass (oper.)	hole_making.HOLE_MILLING
Priority	2
Conditions Constants Materials Machines Explanation Image Add-ons	
<pre> REM Application Criteria mwf.DIAMETER_1 > 16 </pre>	

Figura 3-16: Criterio de aplicación fresado de agujeros. Fuente: Autor

En la Figura 3-16 muestra el criterio de aplicación para el ejemplo de agujeros de diámetro mayor a 16mm. De lo contrario seguirá evaluando otras estrategias.

Atributos de herramientas (*Tool Attributes*)

Los atributos de herramienta definen el tamaño de la herramienta. En la Figura 3-13 se ve una casilla de *Resources (tool)* donde el usuario debe definir qué clase de herramienta utilizar para determinado proceso. Estos atributos de herramienta se refieren al rango de diámetros y longitudes propias de la herramienta de corte. Generalmente todos los parámetros relacionados con las herramientas son indicados con los parámetros de la geometría (*mwf.* – *lwf.*) como muestra la Figura 3-17.

```
REM Tool Attributes
tool.Diameter <= mwf.DIAMETER_1*0.9
tool.FluteLength > mwf.DEPTH + constant.Thru_Hole_Clearance
tool.TaperAngleB = 0.0
```

Figura 3-17: Atributos de herramienta para operación de fresado de agujeros Fuente: Autor

Atributos de características antes de mecanizado (*Less Worked Feature Attributes*)

Cuando la operación inicia en blanco no hay necesidad de definir ningún atributo, si la operación se inicia a partir de otra geometría se deben especificar los parámetros. En la Figura 3-18 se muestran los atributos que se definieron para la operación de taladrado, luego de la operación de broca de centro.

```
REM Less Worked Feature Attributes
lwf.DIAMETER_1 = mwf.DIAMETER_1 * 0.22
lwf.DIAMETER_2 = 0
lwf.DEPTH = lwf.DIAMETER_1/1.5
```

Figura 3-18: Atributos de geometría inicial (*.lwf*) Fuente: Autor

Atributos de operación (*Operation Attributes*)

Se deben especificar los atributos de la operación tales como movimientos de la herramienta o patrones de trayectorias de acuerdo a los parámetros de la geometría, como se muestra en la Figura 3-19.

REM Operation Attributes

```
oper.Maximum_Depth_Distance = mwf.DEPTH
```

Figura 3-19: Atributos de operación Fuente: Autor

Constantes

Las constantes están representadas en letra gris clara como en la Figura 3-17 'constant.Thru_Hole_Clearance'. Se refieren a valores específicos para valores condicionados. Por ejemplo, para agujeros mayores a 8mm de diámetro, siempre debe utilizar operación previa de broca centro.

Luego de establecer los criterios de aplicación para las estrategias de mecanizado deseadas, el usuario debe volver a la interfaz CAM de NX para verificar que dichas estrategias se apliquen correctamente a las geometrías del modelo y, además, la selección de herramientas sea la más consecuente con las disponibles en el taller de mecanizado.

Todas las reglas de mecanizado fueron basadas en los tutoriales y documentos guías que se presentan en el archivo de ayuda del MKE [20].

3.6 DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE AUTOMATIZADO EN NX

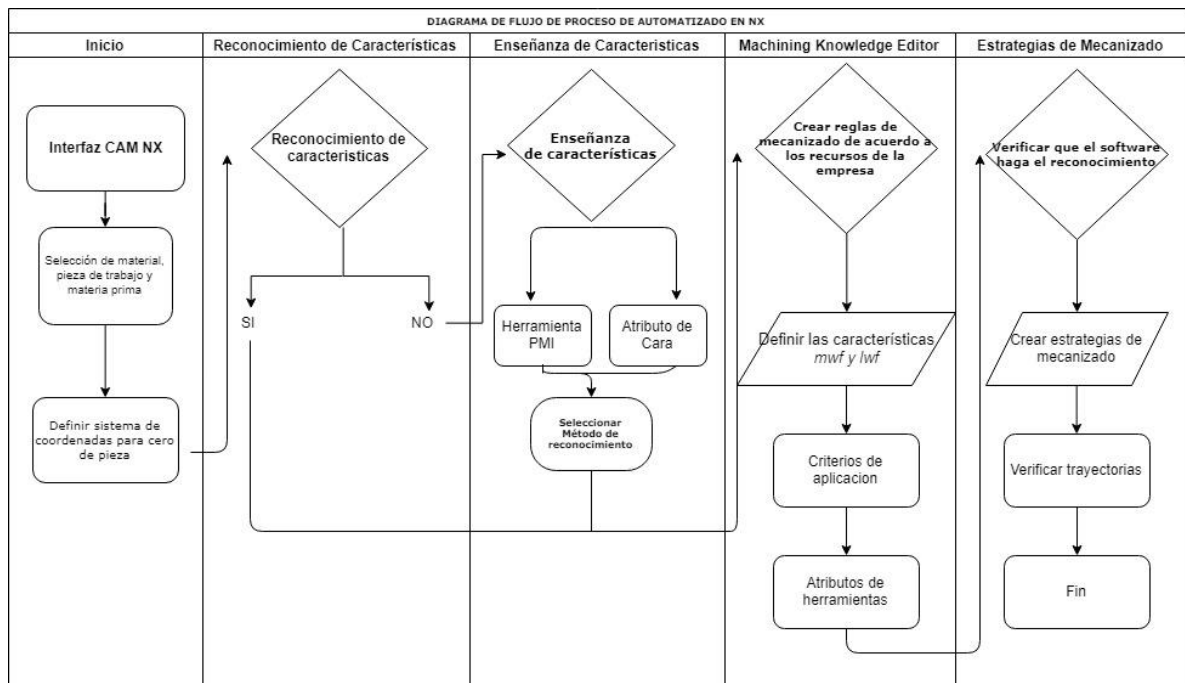


Figura 3-20: Diagrama de flujo proceso de automatizado en NX. Fuente: Autor

En la Figura 3-20 se muestra como es el procedimiento para generar las estrategias de mecanizado basado en las características reconocidas en nuestro elemento a maquinar.

3.7 TRAYECTORIAS FBM

En la Figura 3-21 se muestran las trayectorias que el software definió para realizar el proceso de desbaste de la manzana y el tallado de los dientes.

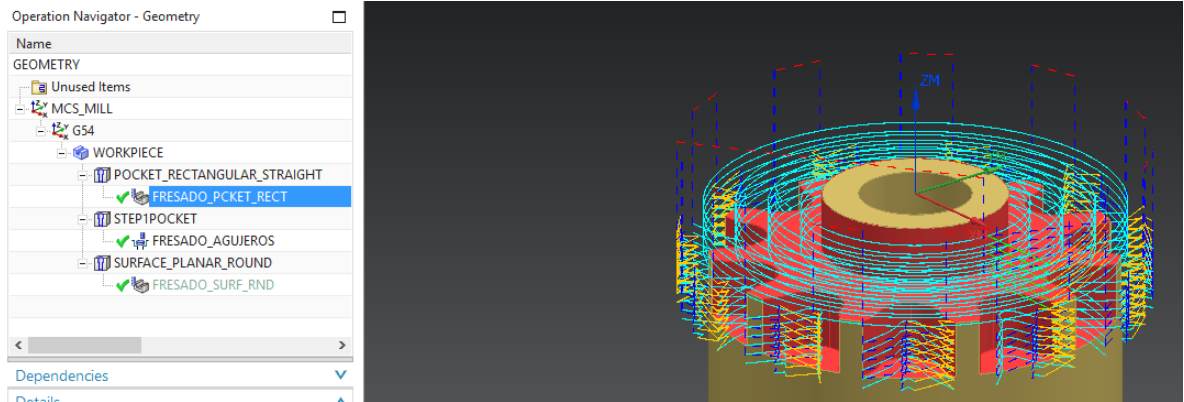


Figura 3-21: Trayectorias para un sprocket de 11 dientes ANSI 60. Fuente: Autor

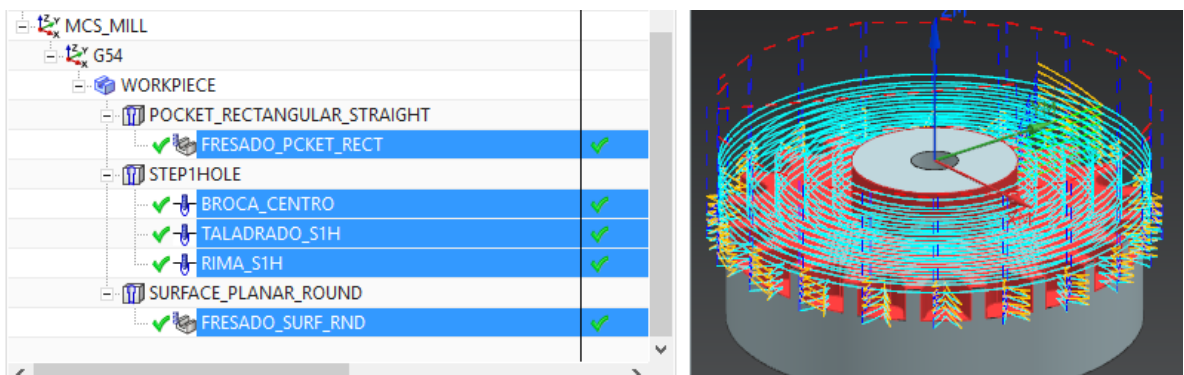


Figura 3-22: Trayectorias para un sprocket de 20 dientes ANSI 40. Fuente: Autor

En la implementación de la metodología, los resultados son muy positivos pues el programa reconoce todas las geometrías prismáticas del elemento, hace la lectura de información *PMI* y en la secuencia de estrategias se hace evidente que el cambio de herramienta es mínimo y el orden de las operaciones está de acuerdo a la jerarquización de las reglas de mecanizado. En la Figura 3-22, se evidencia como el programa aplica otra estrategia de mecanizado para el agujero centro del sprocket.

4 VALIDACIÓN DEL CODIGO NUMÉRICO GENERADO AUTOMÁTICAMENTE

El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una pieza de trabajo, de tal manera que el material remanente sea el elemento con la topología deseada. Es uno de los procesos de manufactura más importantes, se puede aplicar a una amplia gama de materiales, se pueden generar cualquier tipo de geometrías regulares en la superficie y con variaciones en las trayectorias y en la herramienta se pueden crear formas geometrías irregulares como cuerdas de tornillos y ranuras T. La precisión dimensional del maquinado puede producir elementos con tolerancias muy estrechas de $\pm 0.025\text{mm}$, además de crear acabados superficiales muy finos que pueden ser mejores que 0.4micras . En general estos procesos requieren mayor tiempo, desperdician material en forma de viruta y pueden tener efectos adversos en las superficies producidas [2].

4.1 PARÁMETROS DE CORTE

La característica común del proceso de maquinado es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta, que corresponde al material que remueve de la materia prima. Para realizar esta operación se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado velocidad de corte - V_c , y un movimiento secundario denominado avance - f . La forma de la herramienta y la profundidad de corte, combinada con estos movimientos, produce la forma deseada en la superficie resultante del elemento [21].

4.1.1 Velocidad de corte - v_c

La velocidad de corte se define como la distancia que recorrerá un punto de la circunferencia de la herramienta en un minuto, es decir la velocidad lineal de la periferia de la pieza que está en contacto con la herramienta [22]. La velocidad de corte se expresa en milímetros por minuto (mm/min) y depende especialmente de la calidad y tipo de herramienta, de la profundidad de la pasada, de la dureza y maquinabilidad que tenga la materia prima.

La velocidad de corte generalmente es un parámetro que nos da el fabricante de la herramienta para determinar la velocidad angular del husillo portaherramientas a partir de la ecuación (23).

$$V_c = \frac{n * \pi * D_c}{1000} \quad (23)$$

4.1.2 Avance - f

El avance (*Feed* – f) es la distancia que la herramienta avanza hacia la pieza de trabajo en cada revolución. Los avances pueden expresarse en decimales, fracciones de pulgada o milímetros. La velocidad de avance por lo general se determina por:

- El diámetro de la herramienta
- El material de la pieza de trabajo
- El estado de la maquina

Para validar el código numérico generado para maquinar el *sprocket* es necesario ingresar la máquina virtual al software y configurar los parámetros de la operación como velocidad de corte, avance y profundidad de corte como se muestra en la Figura 4-1.

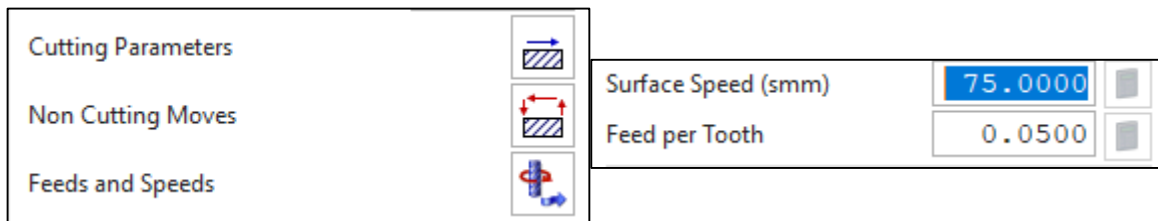


Figura 4-1: Cuadro de dialogo parámetros de corte NX. Fuente: Autor

4.2 POSTPROCESADOR

Finalmente se debe verificar que las operaciones de mecanizado sean generadas en el código con sus respectivos ciclos. Por ejemplo, para el caso de la rima corresponde el ciclo G86 y para la broca centro corresponde el ciclo G81. Para esto debe configurar el método de maquinado y definir el ciclo como muestra la Figura 4-2, según la operación,

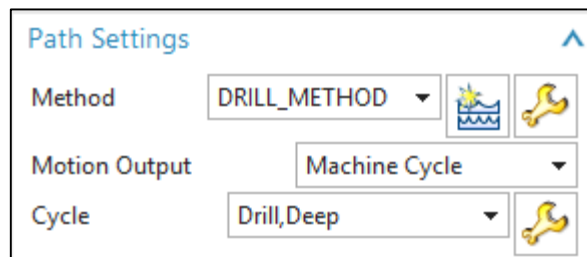


Figura 4-2: Definir ciclo de la operación. Fuente: Autor

4.3 PRUEBAS DE MECANIZADO

Para las pruebas de mecanizado se utilizaron probetas de duraluminio 7075 de 60mm y 80mm, como se muestra en la Figura 4-3, para producir un *sprocket* ANSI 40 de 13 dientes y un *sprocket* ANSI 60 de 11 dientes.



Figura 4-3: Materia prima para pruebas de mecanizado. Fuente: Autor

El software no reconoce la superficie de la circunferencia como una cara maquinable, por lo que se hace un proceso de cilindrado previo a las probetas, como se muestra en la Figura 4-4.

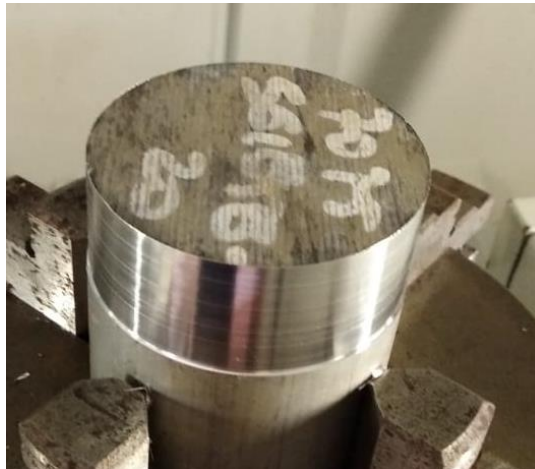


Figura 4-4: Proceso de cilindrado. Fuente: Autor

Posteriormente se ejecuta el código generado por el software con el *sprocket* de menor tamaño, con agujero de centro de 8mm, como se muestra en la Figura 4 5.



Figura 4 5: Sprocket ANSI 40 de 11 dientes. Fuente: Autor

Luego se realiza la prueba de mecanizado para el *sprocket* de mayor tamaño, con un agujero de centro de 21mm, por lo tanto, el software aplicó otra estrategia de mecanizado y el agujero fue maquinado con una fresa de 10mm. Como se muestra en la Figura 4-6.



Figura 4-6: Sprocket ANSI 60 de 11 dientes. Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

Implementar las tablas de potencia de la ACA en una herramienta para automatizar la búsqueda de datos, incidió positivamente en el proceso de selección de transmisión por cadenas, suministrando la información geométrica necesaria para la construcción del *sprocket*, a partir de las condiciones iniciales de diseño como la potencia y la velocidad angular.

Para la formación del perfil del diente fue necesario comprender el comportamiento dinámico del rodillo en mecanismos de transmisión por cadena, que da lugar a la ecuación (19). Este análisis, permitió reconocer los parámetros que componen la ecuación del perfil del diente.

Ejecutar la ecuación (19) como una curva paramétrica en *NX*, resulto indispensable para la creación del perfil del diente. Sin embargo, por la complejidad de la ecuación fue necesario realizar simplificaciones y reducción de términos para reproducirla correctamente. Además, fue preciso incluir información geométrica de fabricantes a la base de datos para obtener un *CAD* completamente paramétrico.

Identificar geometrías prismáticas fue esencial para definir los parámetros correspondientes a las características del *sprocket*, asimismo continuar con el procedimiento de enseñanza de características por medio de la herramienta *PMI*.

La enseñanza de características fue primordial para que el software reconociera los atributos de la geometría al momento de aplicar *FBM*. Estos atributos, serán los parámetros que definen las dimensiones de la característica, en consecuencia, serán los criterios para la selección de herramienta.

El reconocimiento de características por medio del comando *Find Features*, en ocasiones tenía en cuenta un eje coordenado contrario al establecido, lo que representaba un problema para generar la estrategia de mecanizado a través de la función *Create Features Process*. Por lo tanto, fue necesario aplicar un proceso iterativo de ensayo y error con los diferentes tipos de reconocimiento de características propuestos por *NX* para identificar que reconocimiento resultaba conveniente de acuerdo a la geometría del elemento y al sistema coordenado.

Es necesario manipular las estrategias de mecanizado *FBM* a través de *MKE* para que los criterios de aplicación se ajusten a las características de la geometría y a las especificaciones del cliente. A través del *MKE* también se pueden ordenar, clasificar y jerarquizar estrategias de mecanizado de acuerdo al tipo de operación, tipo de herramienta o los recursos disponibles.

Finalmente, la integración de una herramienta para automatizar la selección de las características geométricas del *sprocket*, el modelo paramétrico *CAD* de acuerdo a la ecuación del perfil del diente y las estrategias de mecanizado basado en

características que generan trayectorias automáticamente para la manufactura corresponde a la automatización del proceso de selección, diseño y manufactura de un elemento mecánico a partir del análisis cinemático del sistema. Por lo tanto, significa un avance hacia la apropiación de herramientas tecnológicas, con el propósito de brindar mayor autonomía y eficiencia en el ciclo de vida del desarrollo de un producto.

6. RECOMENDACIONES

Para solventar los desafíos en apropiación tecnología, se espera que las empresas adopten este tipo de metodologías, pues es evidente que representa una ventaja competitiva frente a otras alternativas de manufactura. Cabe resaltar que un centro de mecanizado de 3 ejes corresponde a la mejor opción, en cuanto a precisión dimensional, para replicar un perfil sujeto a una ecuación, como lo es el diente del *sprocket*. Por lo tanto, aplicar la combinación de herramientas computacionales para asistir el proceso de selección, diseño y manufactura representa la integración tecnológica hacia una producción eficiente en el contexto actual de industria 4.0.

Se recomienda continuar la exploración de *FBM* y la herramienta *MKE*, debido a que son herramientas muy poderosas que permiten manipular los recursos de la empresa de acuerdo a las necesidades. Gracias a la flexibilidad en el diseño se obtiene casi que una producción personalizable de acuerdo a las especificaciones del cliente.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. P. Groover, "Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing," *Prentice Hall*, p. 815, 2007.
- [2] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 2002.
- [3] Z. Yingjie, "New approach to process planning using feature-based techniques," *2008 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1–6, 2008.
- [4] T. Dodok, N. Čuboňová, M. Císar, I. Kuric, and I. Zajačko, "Utilization of Strategies to Generate and Optimize Machining Sequences in CAD/CAM," *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 113–118, 2017.
- [5] K. Mahmood, T. Karaulova, T. Otto, and E. Shevtshenko, "Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS)," *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 424–429, 2017.
- [6] B.-T. Sheen and C.-F. You, "Machining feature recognition and tool-path generation for 3-axis CNC milling," *Comput. Des.*, vol. 38, no. 6, pp. 553–562, Jun. 2006.
- [7] SIEMENS, "NX CAM Feature-Based Machining," p. 23139, 2011.
- [8] J. Velosa and L. Sánchez, "Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmecánicas : una metodología de evaluación," *Rev. EAN*, vol. 72, no. 1, pp. 128–147, 2012.
- [9] ANDI, "Balance 2017 Perspectvas 2018," 2017.
- [10] SIEMENS, "Elevada Productividad en la Fabricacion de Piezas - NX CAM: Una solucion completa para fabricar piezas mejores en menos tiempo," p. 8, 2011.
- [11] K. Dwijayanti and H. Aoyama, "Basic study in process planning for Turning-Milling Center based on machining feature recognition," *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–14, 2014.
- [12] J. D. Rofriguez Morales, "Automatización de la planeación del proceso de mecanizado de productos a partir de la generación de estrategias (FBM) y (KBM) empleando la herramienta Siemens NX," p. 88, 2018.
- [13] R. Bydunas and K. Nisbet, "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley," no. Cadenas de rodillos, p. 887, 2014.
- [14] R. Mott, *Diseño de Elementos de Maquinas*, Cuarta Edi. Pearson Education, 2006.
- [15] Norelem, "Norelem Datasheet Discos de Pinoñes Simples," vol. Descrip. d.

- [16] I. P. Ratings, "The American Chain Association Improved Power Ratings," 1961.
- [17] Autodesk Knowledge Network, "Propiedades de diseño de geometría de cadenas de rodillo." [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/Inventor-Help/files/GUID-DCB5BD38-6092-4ADA-86E0-8D1B3DBC74F6-hm.html>.
- [18] Y. Wang, D. Ji, and K. Zhan, "Modified sprocket tooth profile of roller chain drives," *Mech. Mach. Theory*, vol. 70, pp. 380–393, 2013.
- [19] Intermec S.A., "Transmisión De Potencia Piñones Y Cadenas," vol. sexta edic, p. 130, 2015.
- [20] Siemens NX, "Machining Knowledge Editor Training NX7.5," 2010.
- [21] M. Groover, *Fundamentos De Manufactura Moderna*. 2007.
- [22] S. KRAR and A. CHECK, *Tecnologia De Las Maquinas Herramientas*. 2005.

ANEXOS

ANEXO 1: Capacidad de potencia cadena ANSI 40

40 HORSEPOWER RATINGS -- SINGLE STRAND ROLLER CHAIN NO. 40 -- 2001

No. of Teeth	0.500 inch Pitch															
	10	25	50	100	180	200	300	500	700	900	1000	1200	1400	1500	1800	2100
11	0.06	0.14	0.27	0.52	0.91	1.00	1.48	2.42	3.34	4.25	4.70	5.60	6.49	5.57	4.66	3.70
12	0.06	0.15	0.29	0.56	0.99	1.09	1.61	2.64	3.64	4.64	5.13	6.11	7.09	6.34	5.31	4.22
13	0.07	0.16	0.31	0.61	1.07	1.19	1.75	2.86	3.95	5.02	5.56	6.62	7.68	7.15	5.99	4.76
14	0.07	0.17	0.34	0.66	1.15	1.28	1.88	3.08	4.25	5.41	5.98	7.13	8.27	7.99	6.70	5.31
15	0.08	0.19	0.36	0.70	1.24	1.37	2.02	3.30	4.55	5.80	6.41	7.64	8.86	8.86	7.43	5.89
16	0.08	0.20	0.39	0.75	1.32	1.46	2.15	3.52	4.86	6.18	6.84	8.15	9.45	9.76	8.18	6.49
17	0.09	0.21	0.41	0.80	1.40	1.55	2.29	3.74	5.16	6.57	7.27	8.66	10.04	10.69	8.96	7.11
18	0.09	0.22	0.43	0.84	1.48	1.64	2.42	3.96	5.46	6.95	7.69	9.17	10.63	11.65	9.76	7.75
19	0.10	0.24	0.46	0.89	1.57	1.73	2.56	4.18	5.77	7.34	8.12	9.68	11.22	12.64	10.59	8.40
20	0.10	0.25	0.48	0.94	1.65	1.82	2.69	4.39	6.07	7.73	8.55	10.18	11.81	13.42	11.44	9.07
21	0.11	0.26	0.51	0.98	1.73	1.91	2.83	4.61	6.37	8.11	8.98	10.69	12.40	14.10	12.30	9.76
22	0.11	0.27	0.53	1.03	1.81	2.01	2.96	4.83	6.68	8.50	9.40	11.20	12.99	14.77	13.19	10.47
23	0.12	0.28	0.55	1.08	1.90	2.10	3.10	5.05	6.98	8.89	9.83	11.71	13.58	15.44	14.10	11.19
24	0.12	0.30	0.58	1.12	1.98	2.19	3.23	5.27	7.28	9.27	10.26	12.22	14.17	16.11	15.03	11.93
25	0.13	0.31	0.60	1.17	2.06	2.28	3.36	5.49	7.59	9.66	10.69	12.73	14.76	16.78	15.98	12.88
26	0.13	0.32	0.63	1.22	2.14	2.37	3.50	5.71	7.89	10.04	11.11	13.24	15.35	17.45	16.95	13.45
28	0.14	0.35	0.67	1.31	2.31	2.55	3.77	6.15	8.50	10.82	11.97	14.26	16.53	18.79	18.94	15.03
30	0.15	0.37	0.72	1.41	2.47	2.74	4.04	6.59	9.11	11.59	12.82	15.28	17.71	20.14	21.01	16.67
32	0.16	0.40	0.77	1.50	2.64	2.92	4.31	7.03	9.71	12.36	13.68	16.30	18.89	21.48	23.14	18.37
35	0.18	0.43	0.84	1.64	2.88	3.19	4.71	7.69	10.62	13.52	14.96	17.82	20.67	23.49	26.30	21.01
40	0.21	0.50	0.96	1.87	3.30	3.65	5.38	8.79	12.14	15.45	17.10	20.37	23.62	26.85	30.06	25.67
45	0.23	0.56	1.08	2.11	3.71	4.10	6.06	9.89	13.66	17.39	19.24	22.92	26.57	30.30	33.82	30.63

Type C

Type B

Type A

Type A: Manual or Drip Lubrication
Type B: Bath or Disc Lubrication
Type C: Oil Stream Lubrication

ANEXO 2: Capacidad de potencia cadena ANSI 60

60 HORSEPOWER RATINGS -- SINGLE STRAND ROLLER CHAIN NO. 60 -- 2001

No. of Teeth	0.750 inch Pitch															Type A	Type B	Type C								
	10	25	50	100	120	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1400	1600				1800	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
11	0.19	0.46	0.89	1.72	2.05	3.35	4.95	6.52	8.08	9.63	12.69	15.58	11.85	9.41	7.70	6.45	5.51	3.94	3.00	2.38	1.95	1.63	1.39	1.21	0.00	
12	0.21	0.50	0.97	1.88	2.24	3.66	5.40	7.12	8.82	10.51	13.85	17.15	13.51	10.72	8.77	7.35	6.28	4.49	3.42	2.71	2.22	1.86	1.59	1.38	0.00	
13	0.22	0.54	1.05	2.04	2.43	3.96	5.85	7.71	9.55	11.38	15.00	18.58	15.23	12.08	9.89	8.29	7.08	5.06	3.85	3.06	2.50	2.10	1.79	0.00	0.00	
14	0.24	0.58	1.13	2.19	2.61	4.27	6.30	8.30	10.29	12.26	16.15	20.01	17.02	13.51	11.05	9.26	7.91	5.66	4.31	3.42	2.80	2.34	0.41	0.00	0.00	
15	0.26	0.62	1.21	2.35	2.80	4.57	6.75	8.90	11.02	13.13	17.31	21.44	18.87	14.98	12.26	10.27	8.77	6.28	4.77	3.79	3.10	2.60	0.00	0.00	0.00	
16	0.27	0.66	1.29	2.51	2.99	4.88	7.20	9.49	11.76	14.01	18.46	22.87	20.79	16.50	13.51	11.32	9.66	6.91	5.26	4.17	3.42	1.78	0.00	0.00	0.00	
17	0.29	0.70	1.37	2.66	3.17	5.18	7.65	10.08	12.49	14.88	19.62	24.30	22.77	18.07	14.79	12.40	10.58	7.57	5.76	4.57	3.74	0.00	0.00	0.00	0.00	
18	0.31	0.75	1.45	2.82	3.36	5.49	8.10	10.68	13.23	15.76	20.77	25.73	24.81	19.69	16.11	13.51	11.53	8.25	6.28	4.98	4.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
19	0.33	0.79	1.53	2.98	3.55	5.79	8.55	11.27	13.96	16.63	21.92	27.16	26.91	21.35	17.48	14.65	12.50	8.95	6.81	5.40	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	
20	0.34	0.83	1.61	3.13	3.73	6.10	9.00	11.86	14.70	17.51	23.08	28.59	29.06	23.06	18.87	15.82	13.51	9.66	7.35	5.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
21	0.36	0.87	1.69	3.29	3.92	6.40	9.45	12.46	15.43	18.38	24.23	30.02	31.26	24.81	20.31	17.02	14.53	10.40	7.91	6.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
22	0.38	0.91	1.77	3.45	4.11	6.71	9.90	13.05	16.17	19.26	25.39	31.45	33.52	26.60	21.77	18.25	15.58	11.15	8.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23	0.40	0.95	1.85	3.61	4.29	7.01	10.35	13.64	16.90	20.13	26.54	32.88	35.84	28.44	23.28	19.51	16.66	11.92	9.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24	0.41	0.99	1.93	3.76	4.48	7.32	10.80	14.24	17.64	21.01	27.69	34.31	38.20	30.31	24.81	20.79	17.75	12.70	9.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
25	0.43	1.04	2.01	3.92	4.67	7.62	11.25	14.83	18.37	21.89	28.85	35.74	40.61	32.23	26.38	22.11	18.87	13.51	10.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26	0.45	1.08	2.09	4.08	4.85	7.93	11.70	15.42	19.11	22.76	30.00	37.17	43.07	34.18	27.98	23.44	20.02	14.32	10.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
28	0.48	1.16	2.26	4.39	5.23	8.54	12.60	16.61	20.58	24.51	32.31	40.03	47.68	38.20	31.26	26.20	22.37	16.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
30	0.52	1.24	2.42	4.70	5.60	9.15	13.50	17.79	22.05	26.26	34.52	42.89	51.09	42.36	34.67	29.06	24.81	17.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
32	0.55	1.33	2.58	5.02	5.98	9.76	14.40	18.98	23.52	28.01	36.92	45.75	54.50	46.67	38.20	32.01	27.33	19.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
35	0.60	1.45	2.82	5.49	6.54	10.67	15.75	20.76	25.72	30.64	40.39	50.03	59.60	53.38	43.69	36.62	31.26	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
40	0.69	1.66	3.22	6.27	7.47	12.20	18.00	23.73	29.39	35.02	46.16	57.18	68.12	65.22	53.38	44.74	38.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
45	0.77	1.86	3.63	7.05	8.40	13.72	20.25	25.69	33.07	39.39	51.92	64.33	76.63	77.83	63.70	53.38	12.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Type A: Manual or Drip Lubrication
Type B: Bath or Disc Lubrication
Type C: Oil Stream Lubrication

ANEXO 3: Capacidad de potencia cadena ANSI 80

80 HORSEPOWER RATINGS -- SINGLE STRAND ROLLER CHAIN NO. 80 -- 2001

No. of Teeth	1,000 inch Pitch								Speed, min ⁻¹ , Small Sprocket																
	10	25	50	75	88	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2500	3000	3500	4000	4500
11	0.44	1.06	2.07	3.05	3.56	4.03	7.83	11.56	15.23	18.87	22.48	26.07	27.41	22.97	19.61	14.92	11.84	9.69	8.12	6.93	4.96	3.77	3.00	2.45	0.00
12	0.48	1.16	2.26	3.33	3.88	4.39	8.54	12.61	16.62	20.59	24.53	28.44	31.23	26.17	22.35	17.00	13.49	11.04	9.25	7.90	5.65	4.30	3.41	2.79	0.00
13	0.52	1.26	2.45	3.61	4.21	4.76	9.26	13.66	18.00	22.31	26.57	30.81	35.02	29.51	25.20	19.17	15.21	12.45	10.43	8.91	6.37	4.85	3.85	3.15	
14	0.56	1.35	2.63	3.89	4.53	5.12	9.97	14.71	19.39	24.02	28.62	33.18	37.72	32.98	28.16	21.42	17.00	13.91	11.66	9.96	7.12	5.42	4.30	3.52	
15	0.60	1.45	2.82	4.16	4.86	5.49	10.68	15.76	20.77	25.74	30.66	35.55	40.41	36.58	31.23	23.76	18.85	15.43	12.93	11.04	7.90	6.01	4.77	0.00	
16	0.64	1.55	3.01	4.44	5.18	5.86	11.39	16.81	22.16	27.45	32.70	37.92	43.11	40.30	34.41	26.17	20.77	17.00	14.25	12.16	8.70	6.62	5.25	0.00	
17	0.68	1.64	3.20	4.72	5.50	6.22	12.10	17.86	23.54	29.17	34.75	40.29	45.80	44.13	37.68	28.66	22.75	18.62	15.60	13.32	9.53	7.25	0.00		
18	0.72	1.74	3.39	5.00	5.83	6.59	12.81	18.91	24.93	30.88	36.79	42.66	48.49	48.08	41.05	31.23	24.78	20.29	17.00	14.51	10.39	7.90	0.00		
19	0.76	1.84	3.57	5.28	6.15	6.95	13.53	19.96	26.31	32.60	38.84	45.03	51.19	52.15	44.52	33.87	26.88	22.00	18.44	15.74	11.26	0.36	0.00		
20	0.80	1.93	3.76	5.55	6.47	7.32	14.24	21.01	27.70	34.32	40.88	47.40	53.88	56.32	48.08	36.58	29.03	23.76	19.91	17.00	12.16	0.00			
21	0.84	2.03	3.95	5.83	6.80	7.69	14.95	22.07	29.08	36.03	42.92	49.77	56.58	60.59	51.73	39.36	31.23	25.56	21.42	18.29	13.09	0.00			
22	0.88	2.13	4.14	6.11	7.12	8.05	15.66	23.12	30.47	37.75	44.97	52.14	59.27	64.97	55.47	42.20	33.49	27.41	22.97	19.61	14.03				
23	0.92	2.22	4.33	6.39	7.45	8.42	16.37	24.17	31.85	39.46	47.01	54.51	61.97	69.38	59.30	45.11	35.80	29.30	24.55	20.97	15.00				
24	0.96	2.32	4.52	6.66	7.77	8.78	17.09	25.22	33.24	41.18	49.06	56.88	64.66	72.40	63.21	48.08	38.16	31.23	26.17	22.35	15.99				
25	1.00	2.42	4.70	6.94	8.09	9.15	17.80	26.27	34.62	42.89	51.10	59.25	67.35	75.42	67.20	51.12	40.57	33.20	27.83	23.76	8.16				
26	1.04	2.51	4.89	7.22	8.42	9.52	18.51	27.32	36.01	44.61	53.14	61.62	70.05	78.43	71.27	54.22	43.02	35.22	29.51	25.20	0.00				
28	1.12	2.71	5.27	7.77	9.06	10.25	19.93	29.42	38.78	48.04	57.23	66.36	75.44	84.47	79.65	60.59	48.08	39.36	32.98	28.16	0.00				
30	1.20	2.90	5.64	8.33	9.71	10.98	21.36	31.52	41.55	51.47	61.32	71.10	80.82	90.50	86.33	67.20	53.33	43.65	36.58	31.23					
32	1.28	3.09	6.02	8.89	10.36	11.71	22.78	33.62	44.32	54.91	65.41	75.84	86.21	96.53	97.31	74.03	58.75	48.08	40.30	5.65					
35	1.40	3.38	6.58	9.72	11.33	12.81	24.92	36.78	48.47	60.05	71.54	82.95	94.29	105.58	111.31	84.68	67.20	55.00	28.15	0.00					
40	1.61	3.97	7.53	11.11	12.95	14.64	28.48	42.03	55.40	68.63	81.76	94.80	107.77	120.67	133.51	103.46	82.10	40.16	0.00						
45	1.81	4.35	8.47	12.49	14.57	16.47	32.04	47.28	62.32	77.21	91.98	106.65	121.24	135.75	150.20	123.45	72.28	0.00							
	Type A								Type B								Type C								

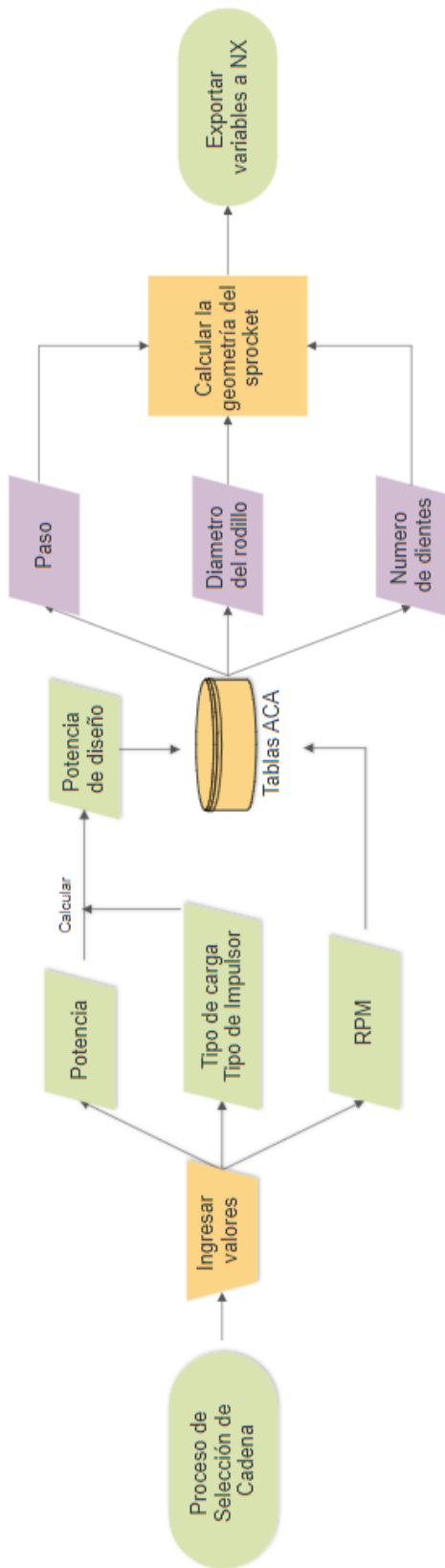
Type C

Type B

Type A

Type A: Manual or Drip Lubrication
Type B: Bath or Disc Lubrication
Type C: Oil Stream Lubrication

ANEXO 4: Diagrama de flujo proceso de selección de cadena



ANEXO 5: Diagrama de flujo automatización CAM en NX

