

FABRICACIÓN DE UN MOTORREDUCTOR HIPOCICLOIDAL

MANUEL RICARDO VARGAS CRUZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C
2021

FABRICACIÓN DE UN MOTORREDUCTOR HIPOCICLOIDAL

MANUEL RICARDO VARGAS CRUZ

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA
DE INGENIERÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR
JORGE ANDRÉS GARCÍA BARBOSA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2021

1. Resumen

Se muestra el desarrollo y fabricación de un prototipo funcional de un motorreductor de accionamiento hipocicloidal, el cual tiene una reducción de velocidad de 9:1. En la etapa de diseño se ilustran las ecuaciones que gobiernan la geometría del mecanismo, así como sus diferentes componentes. Previo a la fabricación se realiza un modelamiento cinemático por medio del módulo Motion del software NX, con el objeto de verificar la funcionalidad del mecanismo. Para manufacturar el prototipo del motorreductor se utilizó tecnología de impresión 3D por deposición de hilo fundido FDM, combinado con tornillería y rodamientos metálicos. Al comprobar el correcto funcionamiento del prototipo, se corrobora la importancia del uso de las nuevas tecnologías CAD/CAM, para el diseño y desarrollo de productos con alto valor agregado.

Contenido

1. Resumen	3
2. Introducción.....	6
3. Objetivos.....	7
3.1. General.....	7
3.2. Específicos	7
4. Marco Teórico	8
4.1. Motorreductor hipocicloidal	8
4.1.1. Relación de transmisión	11
4.1.2. Ventajas	11
4.1.3. Desventajas.....	11
4.1.4. Aplicaciones	12
4.1.5. Ecuaciones de reductor hipocicloidal	12
5. Diseño conceptual y modelación CAD del motorreductor.....	16
5.1. Motor a utilizar para el reductor	16
5.2. Ecuaciones que gobiernan el sistema.....	16
5.3. Reducción en el reductor	17
5.4. Modelación de los componentes CAD del reductor.	17
5.4.1. Verificación en MATLAB	18
5.4.2. Parametrización en NX.....	18
5.4.3. Boceto y extrusión de la pieza.....	19
5.5. Ensamble los componentes CAD del reductor	23
6. Análisis cinemático del sistema.....	24
6.1. Procedimiento para realizar análisis cinemático en CAD/CAM	24
6.1.1. Definición de cuerpos con movimiento (<i>Motion Bodies</i>).....	24
6.1.2. Definición de Articulaciones (<i>Joints</i>).....	25
6.1.3. Definición de restricciones de contacto (<i>Contacts</i>).....	26
6.2. Resultados del análisis cinemático del motorreductor.....	28
6.2.1. Velocidad en el motorreductor	28
6.2.2. Torque en el motorreductor	30

7.	Ensamble general del sistema.....	32
7.1.	Ensamble para presentación de prototipo	33
8.	Fabricación de prototipo en impresión 3D.	36
8.1.	Selección de materia prima de los componentes	36
8.2.	Selección de condiciones de impresión.	36
8.3.	Generación y simulación de impresión.....	37
8.4.	Montaje y fabricación del sistema	38
8.5.	Ensamble de las piezas del sistema.....	40
8.6.	Prueba de funcionamiento	43
9.	Conclusiones.....	51
10.	Bibliografía.....	52
	ANEXOS.....	53

2. Introducción

La producción industrial en Colombia representa el 12% del PIB[1]. Se enfatiza en un gran problema del sector industrial en Colombia donde desde hace tiempo muchos de los productos carecen de valor agregado[2]. Este importante renglón de la economía debe fortalecerse con la generación de productos con dichas características. Algunos productos con alto valor agregado en ingeniería mecánica son utilizados generalmente en la industria de turbomáquinas, prótesis para el cuerpo humano y engranajes para motorreductores, entre otras aplicaciones.

La industria colombiana tiene los equipos e instrumentos necesarios para la generación de productos con un alto valor agregado, pero esto no sucede debido a la falta de iniciativa o conocimiento por parte de las empresas encargadas.

La Universidad Santo Tomás cuenta con herramientas modernas de ingeniería, necesarias para manufacturar múltiples productos de alto valor agregado. Dichas herramientas permiten: generar modelos tridimensionales, ensamblar mecanismos virtuales, realizar análisis cinemáticos y dinámicos, generar trayectorias de herramientas para la fabricación de componentes mecánicos en centros de mecanizado.

Respondiendo a la anterior necesidad y con la meta de sacar máximo provecho a estas tecnologías con el fin de obtener un producto de valor agregado, se fabrica un reductor hipocicloidal, el cual es un equipo que se utiliza para reducir la velocidad angular con la que gira un motor. Los motorreductores de accionamiento hipocicloidal tienen ventajas en comparación con los motorreductores convencionales.

Para la construcción de este reductor se utilizaron los ambientes CAD/ MOTION de NX en donde se pudo generar modelos de piezas a partir de ecuaciones geométricas, ensamblar estas piezas virtualmente y realizar un análisis cinemático para verificar el movimiento del sistema. Para la fabricación se utilizó una simulación virtual de la impresión 3D en el software Z-Suite. Donde finalmente se fabricó en una impresora 3D que utiliza la estrategia deposición de hilo fundido FDM.

El motorreductor posee una gran cantidad de características como: la reducción de 9:1; que es una buena relación de reducción para el tamaño del reductor, la precisión del reductor al fabricarse, la verificación previa a fabricación del movimiento y cinemática, razones que lo identifican como un producto de valor agregado

Sacar el máximo provecho de las herramientas CAD, CAM y CNC disponibles, con el objeto de obtener productos de alto valor agregado, permitirá implementar nuevas metodologías en las etapas de desarrollo de producto y procesos de manufactura, en los departamentos de diseño de las empresas colombianas.

.

3. Objetivos

3.1. General

Fabricar un motorreductor de accionamiento hipocicloidal.

3.2. Específicos

- Generar un prototipo virtual de reductor hipocicloidal para verificar el ensamble entre los componentes y su correcto funcionamiento cinemático
- Obtener un prototipo físico funcional, a partir del modelo virtual, para validar su funcionamiento

4. Marco Teórico

4.1. Motorreductor hipocicloidal

Este elemento mecánico fue desarrollado por el ingeniero alemán Lorenz Konrad, quién trabajaba en una compañía en donde se desarrollaban dispositivos de precisión, basándose en los principios de funcionamiento de un obturador para una máquina fotográfica, en la cual, aplico el principio del reductor hipocicloidal. El concepto surge de una leva que transmite movimiento en un disco el cual describe una curva hipocicloidal [3]

Las partes principales de un reductor hipocicloidal son cuatro como se observa en la imagen 1: para la entrada del movimiento al sistema se usa un eje excéntrico que se conoce como el eje de alta velocidad, la parte principal del sistema disco hipocicloidal, los pines guía de la corona y el eje de salida que será el eje de baja velocidad. Aunque estos sean los elementos principales para el funcionamiento del equipo se pueden tener más componentes dependiendo de los requerimientos de aplicación.

El eje excéntrico impulsa primero un disco hipocicloidal. Los pines guías en el corona que esta fija están dispuestos en un círculo alrededor del eje excéntrico, en el que va acoplado el disco hipocicloidal. A causa del movimiento excéntrico, el disco hipocicloidal se impulsa dentro de estos pasadores para que el disco hipocicloidal gire alrededor de su mismo eje de simetría. Hay agujeros en el disco hipocicloidal que, a diferencia del eje excéntrico, giran en sentido horario. Los pasadores del rodillo que va acoplado al eje de salida encajan en estos orificios. De esta manera, el disco hipocicloidal acciona el disco de salida, y trasmite el movimiento reducido al eje de salida montado centralmente y que es coaxial con el eje de entrada.[4]

- Eje excéntrico de entrada: Este eje es el eje de alta velocidad angular y bajo torque, el motor es el transmisor del movimiento y potencia al eje. Este eje tiene una excéntrica en donde ira acoplado el rodamiento y el disco hipocicloidal

Disco hipocicloidal: Es el elemento más importante del sistema, el perfil es descrito por una curva hipocicloide, va acoplado al eje excéntrico el cual le transmite su movimiento y potencia, mediante su agujero central. Este elemento gira en sentido contrario al eje de entrada. Tiene 3 grados de libertad (DOF'S) se traslada en el plano X, Y y rota en el eje Z. La corona hipocicloidal es la cual guía el movimiento del disco por la periferia del sistema. A su vez, por unos agujeros ubicados en la superficie del disco hipocicloidal se hace la transmisión al eje de salida.

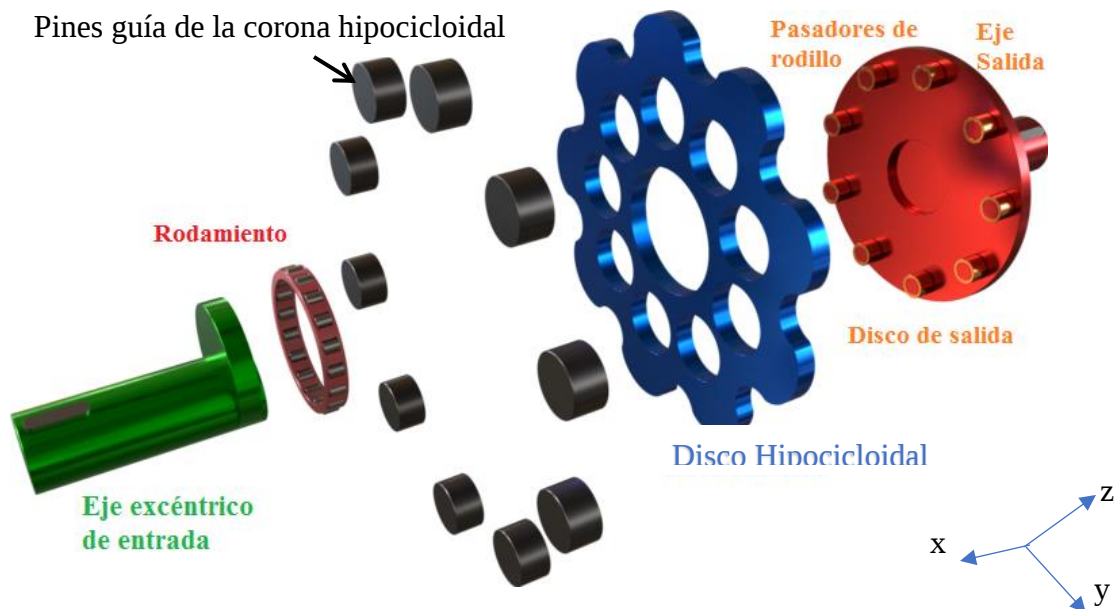


Imagen 1: Partes principales de un reductor hipocicloidal. Fuente: [4]

- Corona hipocicloidal: Este elemento tiene unos pasadores de anillo cerca de la periferia de la corona, los cuales son los encargados de guiar el movimiento del disco hipocicloidal, por esto mismo la cantidad, geometría y ubicación serán asociados al perfil de hipocicloidal.

La cantidad de pasadores o pines en la corona debe ser mayor a los lóbulos que hay en el disco hipocicloidal para que se evidencie la reducción. Preferiblemente y en la gran mayoría de los casos el número de lóbulos debe ser una unidad menor que el número de pines. En cuanto al diámetro de los pines debe ser mucho menor a comparación del diámetro de los valles del disco hipocicloidal. El diámetro del círculo de referencia en donde van los pines guías debe ser mayor al del diámetro del disco de referencia del disco hipocicloidal referencias que se pueden ver en la imagen 3, para que puedan encajar el disco en el sistema y tenga un movimiento restringido para que los contactos, fuerzas y fricción puedan hacer realidad la reducción.[4]



Imagen 2: Demostración del principio de funcionamiento con un disco rodante.
Fuente:[4]

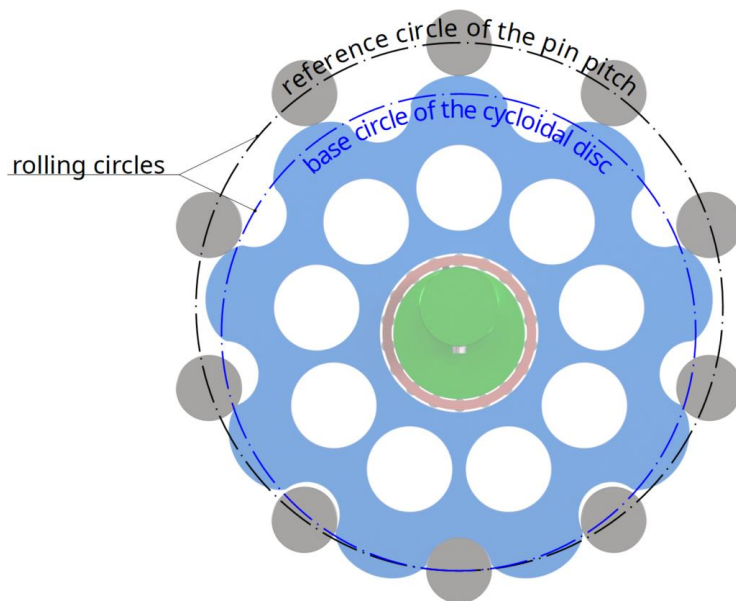


Imagen 3: Relación entre el perfil del engranaje hipocicloidal con los pasadores según sus circunferencias de referencia. Fuente:[4]

- Eje de salida: Es el eje de baja velocidad angular. Está compuesto por tres partes: los pasadores, el disco y el eje. El disco hipocicloidal le transmite la potencia al eje por medio de unos agujeros presentes en el engranaje a los pasadores de rodillo que están ubicados entre dichos agujeros y los cuales son de mucho menor diámetro con el fin de que cada uno de estos haga contacto en ciertas etapas del movimiento. El disco de

este eje de salida gira y hará girar al eje de salida donde está instalado el acople para la aplicación deseada.

4.1.1. Relación de transmisión

La relación de transmisión de este sistema es determinada por el número de lóbulos del disco hipocicloidal n y el número de pasadores ubicados en la corona N . El número de lóbulos n para que haya una reducción debe ser menor al número de pasadores ubicados en la corona N . En la mayoría de casos el número de lóbulos es una unidad menor que el del pasador.[4] La relación de velocidad se da cuando después de que el eje de transmisión da una revolución los lóbulos se mueven únicamente una posición entre los pines de la corona. Para que este lóbulo haga la revolución completa es necesario que entre $N-1$ veces entre en todos los espacios de los pines.[4]

Por ejemplo, en un sistema que tiene $N=10$ pines y $n=9$ lóbulos. El eje de transmisión de potencia debe completar 9 revoluciones para que el lóbulo haga la revolución completa y termine en la posición inicial. Por esto se hace la reducción debido a que mientras que el eje de entrada hace 9 revoluciones, el engranaje hipocicloidal solo hace una revolución y ese le transmite esa revolución al eje de salida. Por lo tanto, la reducción es de 9:1

Se puede decir entonces que la relación de velocidad r es:

$$r = \frac{n}{N-n} \quad (1)$$

4.1.2. Ventajas

Los puntos a favor que tiene este sistema de reducción hipocicloidal a comparación de sistemas de reducción como trenes de engranajes, epicicloides entre otros sistemas son [3][5]:

- 95% Eficiencia energética en la relación.
- 1/3 de contacto menos que otros sistemas, esto disminuye el esfuerzo en el contacto
- Compacto y versátil
- Transmite fuerza por movimiento no por corte, lo que genera menos vibración y bajo nivel de ruido
- Bajo mantenimiento
- Longevidad
- Reducción en una etapa desde 6:1 hasta 81:1
- Reducción en dos etapas desde 102:1 a 7569:1
- Reducción en tres etapas 658603:1 dependiendo del tamaño

4.1.3. Desventajas

Las desventajas de este tipo de reductor son las siguientes

- Altos costos
- Precisión en la fabricación de las piezas
- Al tener una sola etapa vibra con altas velocidades, por tener un desequilibrio en el sistema

4.1.4. Aplicaciones

Las principales aplicaciones de estos motorreductores son las siguientes:

- Robótica
- Mesas rotativas
- Centrifugadoras
- Industria alimenticia
- Industria de tratamiento de fluidos
- Industria aeroespacial

4.1.5. Ecuaciones de reductor hipocicloidal

- Hipocicloide

Una curva hipocicloidal es el lugar geométrico de un punto fijo cualquiera de una circunferencia que rueda interiormente, sin resbalar, sobre otra circunferencia fija [6].

Se deducen las ecuaciones paramétricas de la hipocicloide en el caso en que la circunferencia fija tenga su centro en el origen y posición del punto que describa la curva positiva en el eje X y sobre la circunferencia fija como se ve en la imagen 4.

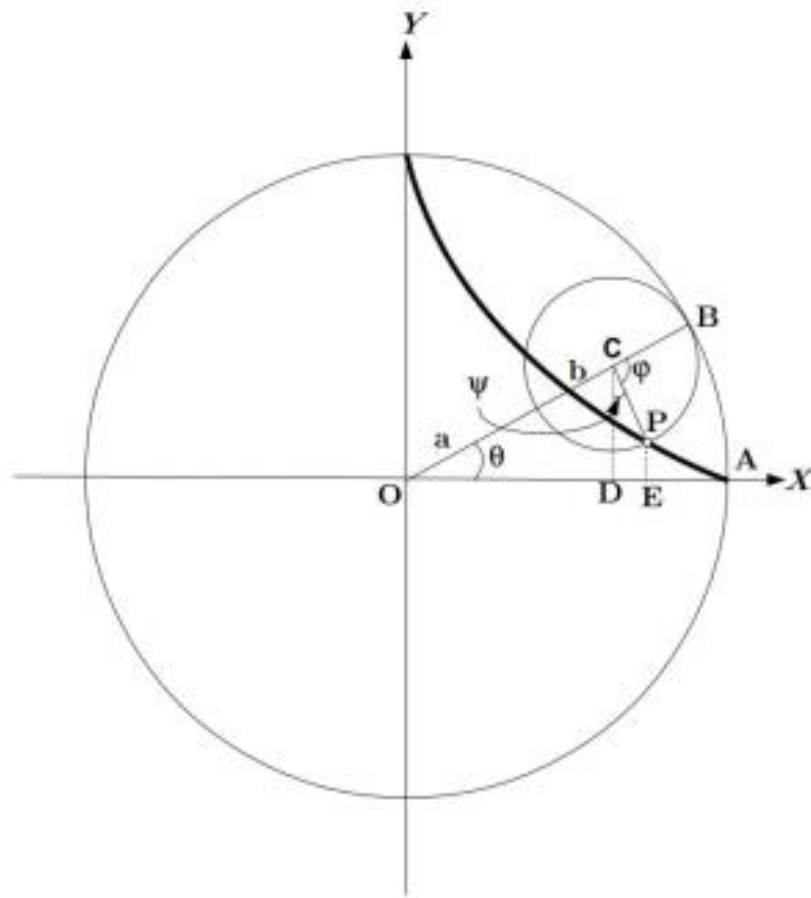


Imagen 4: Geometría para la deducción de las ecuaciones paramétricas de una hipocicloide. Fuente: [7]

Sea $P(x,y)$ un punto cualquiera del lugar geométrico; siendo a y b , respectivamente, los radios de las circunferencias fija y rodante, y C el centro de la circunferencia rodante o generatriz. Se considera como parámetro el ángulo θ que forma la recta de los centros OC con la parte positiva del eje X . A es el punto sobre el eje X que representa la posición inicial del punto P que describe la curva hipocicloide, y B el punto de tangencia de las dos circunferencias. Desde C y P se trazan dos perpendiculares CD y PE , respectivamente, al eje X . El ángulo ϕ al comprendido por los segmentos de recta BCP y el ángulo ψ por PCD [8]. Considerando ambos ángulos medidos en radianes y que la circunferencia generatriz rueda, sin resbalar de A a B tenemos:

$$ARCO AB = ARCO PB \quad (2)$$

Es decir,

$$a\theta = b\varphi \quad (3)$$

Así que,

$$\frac{a\theta}{b} = \varphi \quad (4)$$

Por esto podemos decir que

$$\psi = \pi - \varphi - \text{ánguloOCD} = \pi - \frac{\pi}{2} + \theta - \varphi = \frac{\pi}{2} + \theta - \varphi \quad (5)$$

Por tanto,

$$\text{sen } \psi = \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} + \theta - \varphi \right) = \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} \right) \cos(\theta - \varphi) + \text{sen}(\theta - \varphi) \cos \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

$$\text{sen}(\psi) = \cos \left(\frac{b-a}{b} \theta \right) \quad (6)$$

$$\cos \psi = \cos \left(\frac{\pi}{2} + \theta - \varphi \right) = \cos \left(\frac{\pi}{2} \right) \cos(\theta - \varphi) - \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} \right) \text{sen}(\theta - \varphi)$$

$$\cos(\psi) = -\text{sen} \left(\frac{b-a}{b} \theta \right) \quad (7)$$

Para las coordenadas (x,y) del punto P , tenemos:

$$x = OE = OD + DE = OC \cos \theta + CP \text{sen}(\psi) \quad (8)$$

$$y = EP = CD - CP \cos(\psi) = OC \text{sen}(\theta) - CP \cos(\psi) \quad (9)$$

Pero, se nota que $OC = a-b$, $CP=b$ y sustituyendo las expresiones encontradas para el seno y el coseno de ψ obtenemos:

$$x = (a-b) \cos(\theta) + b \cos \left(\frac{b-a}{b} \theta \right) \quad (10)$$

$$y = (a-b) \text{sen}(\theta) - b \left[-\text{sen} \left(\frac{b-a}{b} \theta \right) \right] \quad (11)$$

Si se considera que el seno es una función impar y el coseno es una función par, es decir: $\text{sen}(x) = -\text{sen}(-x)$ y $\cos(x) = \cos(-x)$ obtendremos finalmente las ecuaciones paramétricas para una hipocicloide:[8]

$$x = (a - b)\cos(\theta) + b\cos\left(\frac{a-b}{b}\theta\right) \quad (12)$$

$$y = (a - b)\sin(\theta) - b\sin\left(\frac{a-b}{b}\theta\right) \quad (13)$$

Nota: Se debe realizar el cambio de signo en el eje Y antes del segundo término de la ecuación (13) para un reductor hipocicloidal con el fin de tener una geometría utilizable.

5. Diseño conceptual y modelación CAD del motorreductor

5.1. Motor a utilizar para el reductor

El reductor a fabricar ira acoplado a un motor eléctrico utilizado para la robótica e ira acoplado mediante un eje hembra al motor de la imagen 5.



Imagen 5: Motor eléctrico para el motorreductor.

La velocidad angular y otras magnitudes del motor varían dependiendo del voltaje al cual sea conectado el motor.[9]

Voltaje	V	12	24	40
Torque Nominal	Nm	0.01	0.01	0.01
Velocidad Nominal	Rpm	360	375	435
Velocidad Sin Carga	Rpm	580	625	675

Tabla 1: Valores del motor

5.2. Ecuaciones que gobiernan el sistema

La base para la construcción del disco hipocicloidal son las ecuaciones parametrizadas (12) y (13). A la ecuación (13) se le debe hacer un ajuste al signo negativo y transformarlo a positivo para que la gráfica no tenga valles si no picos. Además, se debe hacer un ajuste a los valores de los radios a y b , para tener una tolerancia de movimiento y así un buen funcionamiento del sistema. Los valores para esta corrección son hallados con una

calculadora de figuras hipocicloidales para reductores que está dispuesta en la bibliografía [10]. Considerando:

- Radio del disco $R_1 = a = 35\text{mm}$
- Radio de pines $R_2 = b = 2.5\text{mm}$
- Número de pines $N=10$
- Excentricidad $e=2\text{mm}$
- Ángulo entre pines $=36$

Las ecuaciones que se obtienen como resultado en los ejes (x, y, z) son:

$$X = (31.5 + 3.5) * \cos((\theta)) + 2 * \cos((31.5 + 3.5) * (\theta) / 3.5) \quad (14)$$

$$Y = (31.5 + 3.5) * \sin(\theta) + 2 * \sin((31.5 + 3.5) * (\theta) / 3.5) \quad (15)$$

$$Z = 0 \quad (16)$$

5.3. Reducción en el reductor

La reducción del reductor se basa en el número de pines en la base y lóbulos en el disco hipocicloidal. La relación se calcula remplazando los valores de

- Número de pines $N=10$
- Número de lóbulos $n=9$

En la ecuación (1)

$$r = \frac{9}{10-9}$$

La relación de transmisión es de:

$$\mathbf{9:1}$$

5.4. Modelación de los componentes CAD del reductor.

En este apartado se muestra cómo se modeló la pieza compleja del motorreductor, llamada disco hipocicloidal. Las demás piezas por tener una dificultad moderada de modelación se podrán encontrar en forma de planos en la sección de Anexos.

Con el fin de modelar el disco hipocicloidal el cual será el encargado del movimiento en el sistema, se insertan las ecuaciones de la hipocicloide (14)(15)(16) en el ambiente de modelado CAD de NX.

5.4.1. Verificación en MATLAB

Ingresamos las ecuaciones (14) (15) (16) en el software Matlab. Para verificar que las ecuaciones den la geometría para la hipocicloide deseada.

Para esto se plantea el código con las ecuaciones como se muestra en la imagen 6.

```
1 - t=0:0.01:1;  
2 - x=(31.500 + 3.500) * cos( t*2*pi()) +2.000 * cos((31.500 + 3.500) * ( t*2*pi()) / 3.500);  
3 - y=(31.500 + 3.500) * sin( t*2*pi()) + 2.000 * sin((31.500 + 3.500)*( t*2*pi())/ 3.500);  
4 -  
5 - plot(x,y);  
6 -  
7 -
```

Imagen 6: Ecuaciones de la hipocicloide en Matlab.

Como resultado al correr el programa y obtener el resultado de la función plot tenemos la imagen 7.

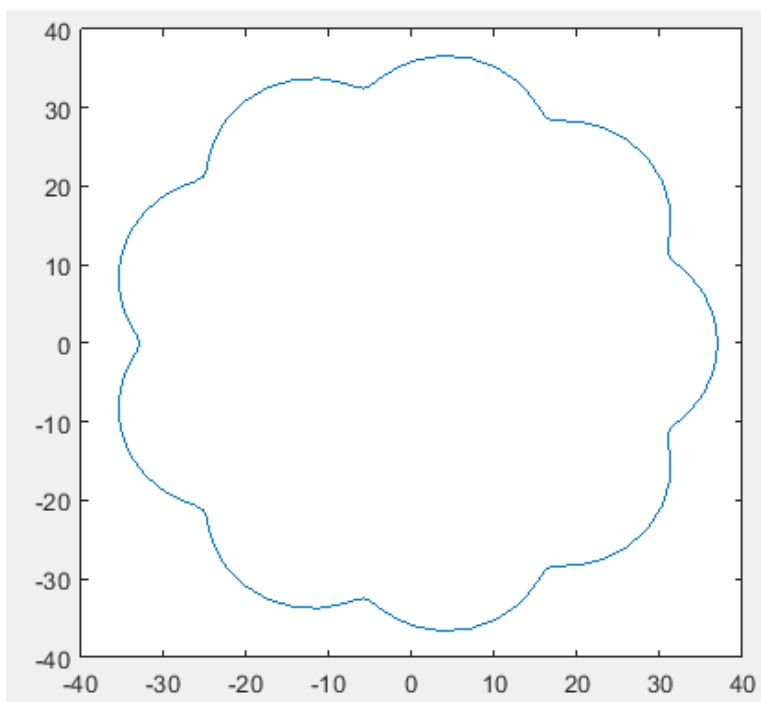


Imagen 7: Resultado al graficar la curva hipocicloide en Matlab. Dimensiones en mm.

5.4.2. Parametrización en NX

Para ingresar las ecuaciones en el software NX se utilizará la función *expressions* encontrada en *tools* como en la imagen 8

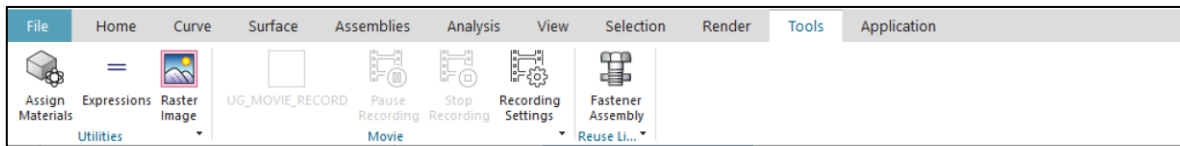


Imagen 8: Ubicación comando expressions en NX.

Insertándolas ecuaciones como (xt la del eje x),(yt la del y) y (zt la del eje z) de imagen 9:

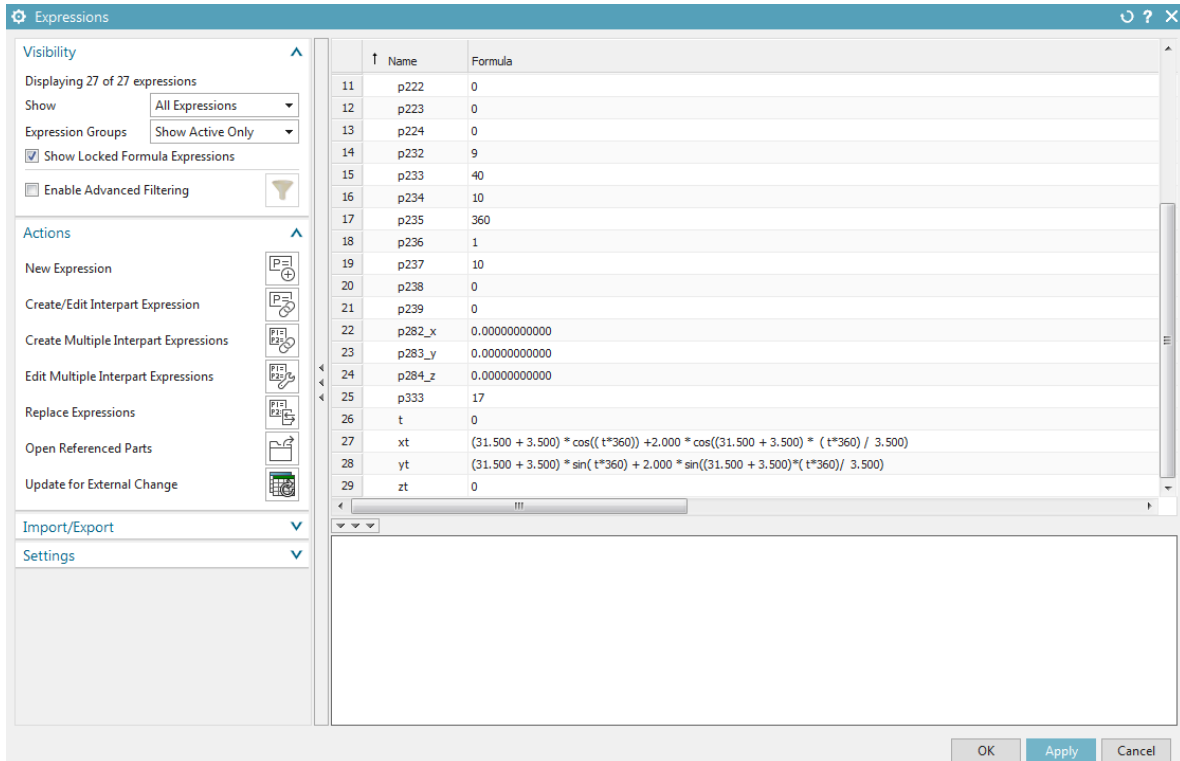


Imagen 9: Ecuaciones en expressions NX.

Y de esta manera se tiene parametrizadas las ecuaciones en los tres ejes.

5.4.3. Boceto y extrusión de la pieza

Para plasmar el boceto se utiliza el comando *Law Curve* con especificaciones como se muestra en la imagen 10. Este comando llama las ecuaciones (xt, yt, zt) introducidas en *Expressions*.

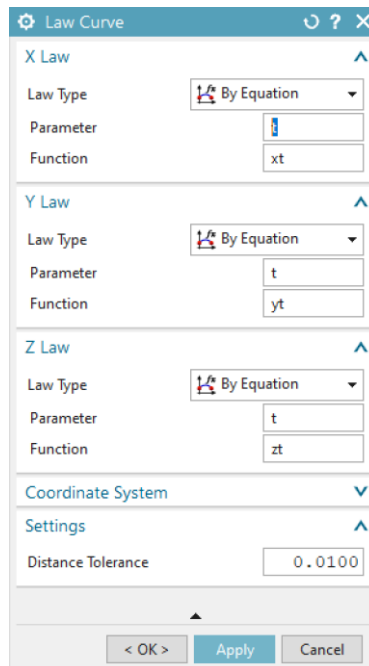


Imagen 10: Law Curve NX.

Obteniendo así el boceto de la imagen 11:

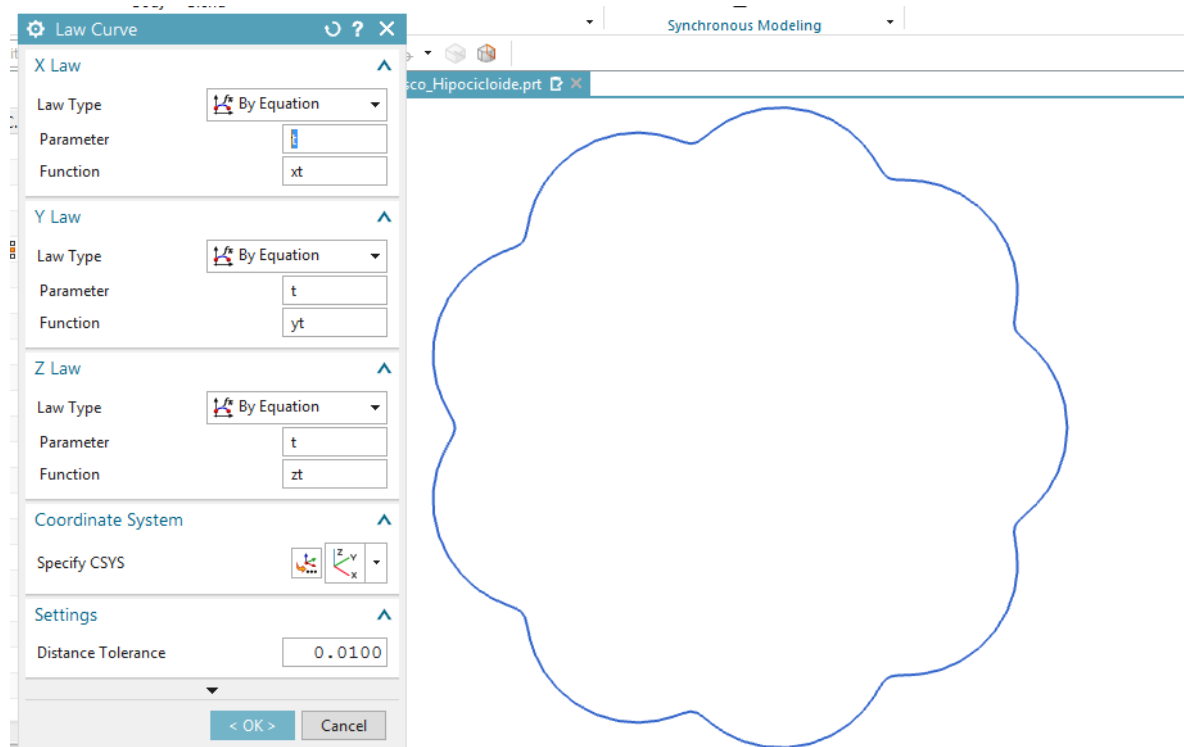


Imagen 11: Resultado de la curva de Law Curve en NX.

El resultado de la curva obtenida no es de utilidad debido a que el valle de la hipocicloide no tiene el radio necesario para que los pines de la base puedan guiar el movimiento del disco. Por lo tanto, se crea una curva con el comando *Offset* a partir de la curva inicial. Se utiliza un offset de -2.7 (-2.5 para el radio del pin y -0.2 para una tolerancia de movimiento) Como se muestra en la imagen 12

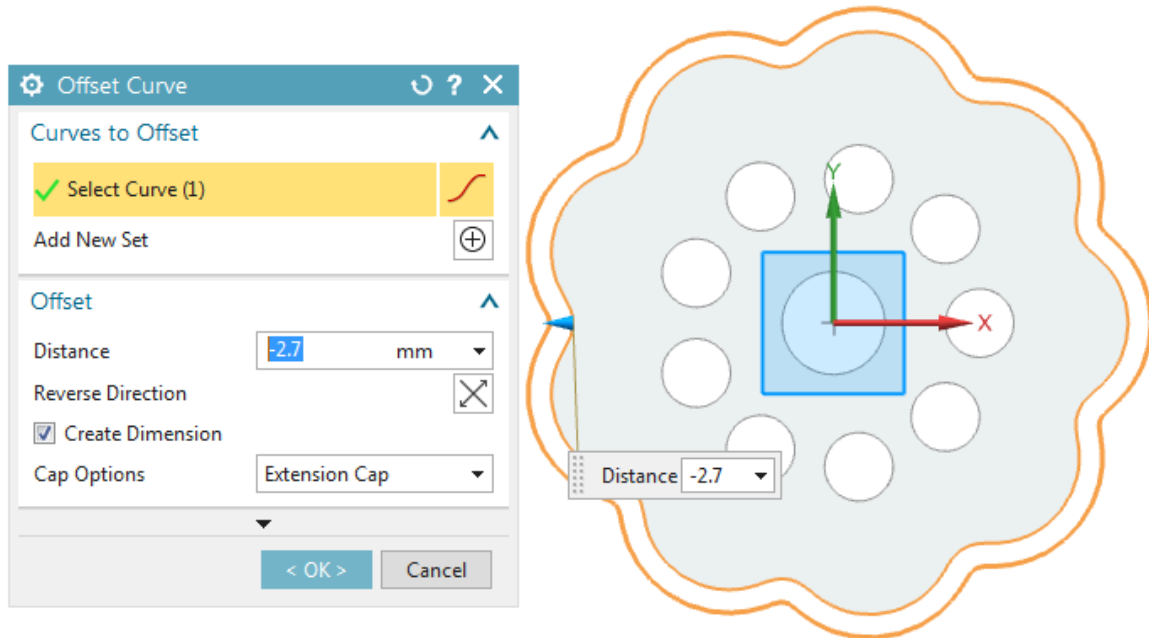


Imagen 12: Creación del boceto con offset de la curva de Law Curve en NX.

Al obtener la curva interior se extruye 10 mm para la obtención de la pieza como se evidencia en la imagen 13

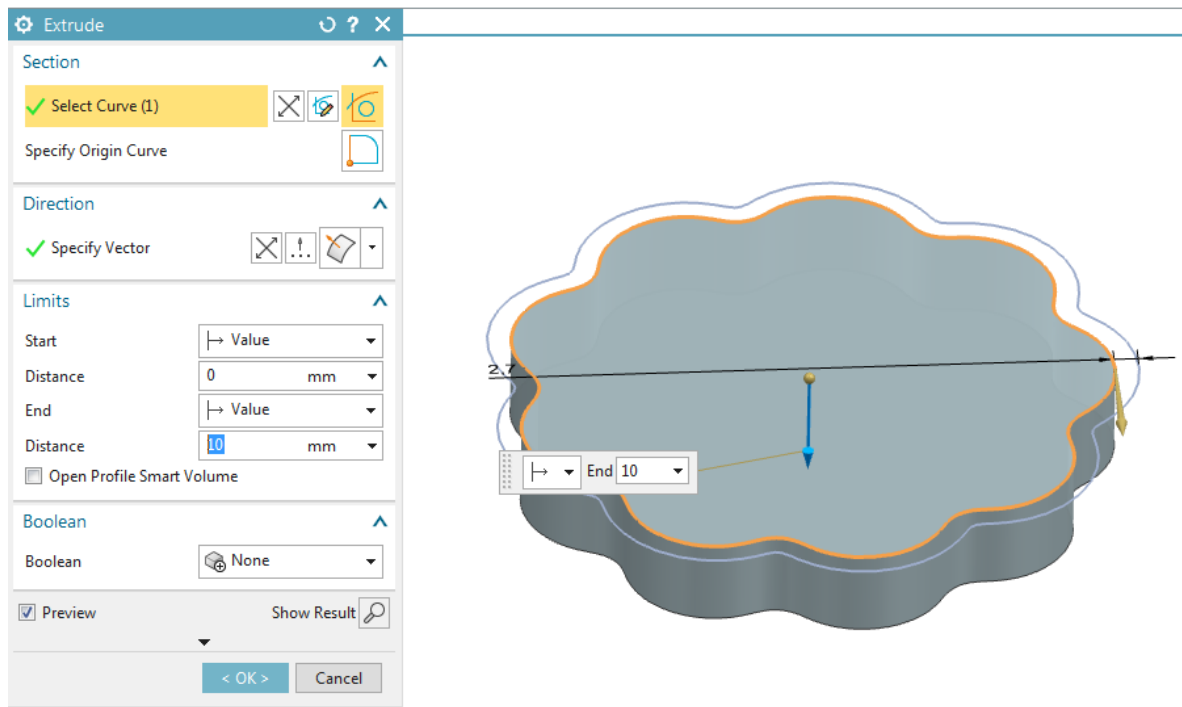


Imagen 13: Extrusión de la pieza en NX.

Para finalizar se realizan 10 agujeros en la pieza, en el centro de la pieza es donde va el eje de entrada del sistema, este mide 12mm de diámetro, los otros 9 agujeros es donde van acopados los pines del eje de salida para la transmisión de movimiento y potencia al eje de salida, los diámetros de estos son de 8mm. Se decide colocar 9 agujeros para tener siempre un contacto entre las piezas ya que en ciertos momentos no estarán todos los pines en contacto con los agujeros, esto ayuda a que la velocidad en el eje de salida sea constante a lo largo del movimiento. Obteniendo así la pieza que se evidencia en la imagen 14.

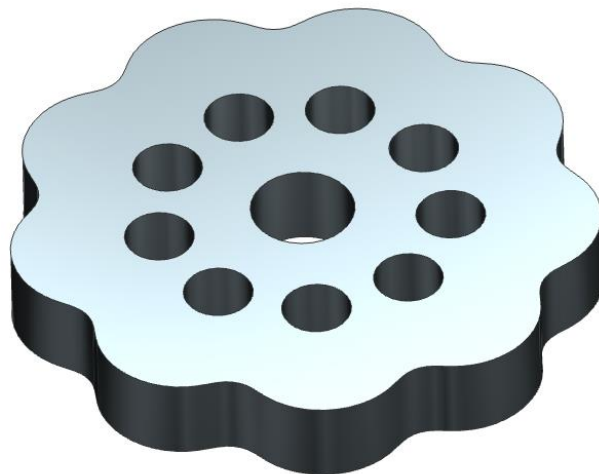


Imagen 14: Disco hipocicloidal en NX.

5.5. Ensamble los componentes CAD del reductor

Se realiza primero el ensamble de los componentes funcionales como se evidencia en la imagen 15, esto para realizar el análisis cinemático con estas piezas las cuales son las involucradas en el movimiento.

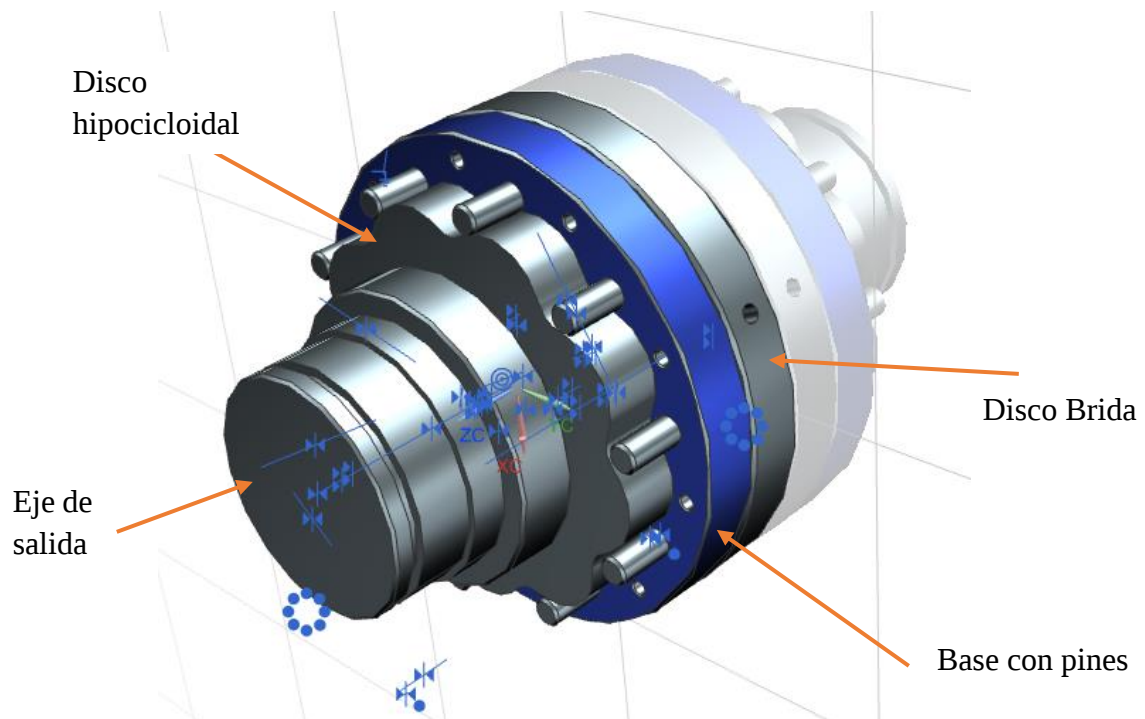


Imagen 15: Ensamble sin carcasa ni motor de las piezas en NX.

6. Análisis cinemático del sistema

6.1. Procedimiento para realizar análisis cinemático en CAD/CAM

Para realizar el análisis cinemático en NX, se crea un archivo *motion* sobre el ensamble que se desea analizar.

En el cuadro de dialogo *Solution* se configura el tipo de análisis y parámetros a utilizar como se ve en la imagen 16. Para el caso actual se utiliza el análisis dinámico.

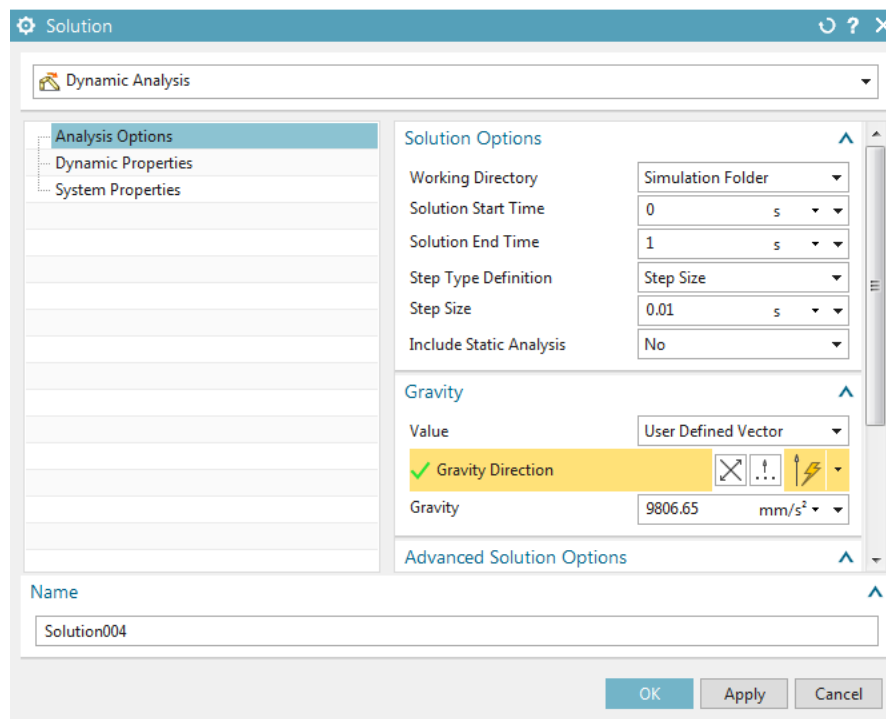


Imagen 16: Parámetros para el motion en NX.

6.1.1. Definición de cuerpos con movimiento (*Motion Bodies*)

Se seleccionan los cuerpos del ensamble involucrados en el movimiento del sistema que estarán ubicados en el árbol de navegación en el motion. A su vez se denominan como Motion Bodies. Estos motion Bodies se pueden ver en la imagen 17.

Para el caso del análisis del motorreductor es necesario comprender el mecanismo y las piezas comprometidas en el movimiento. Por eso seleccionamos las siguientes piezas: Base, Disco Hipocicloidal, Eje de entrada y de salida. Se debe elegir al menos un cuerpo rígido que

tendrá 6 restricciones a DOF (Degrees Of Freedom), que en el caso del reductor es la pieza denominada base ya que esta no se traslada ni rota.



Imagen 17: Motion Bodies en el motion de NX.

6.1.2. Definición de Articulaciones (Joints)

Para una simulación dinámica debemos tener en cuenta la restricción de grados de libertad (DOF'S) del sistema. Esto nos ayuda a que los cuerpos no floten en el espacio y representa el correcto funcionamiento de las piezas en el sistema. Como ya se había aclarado en el capítulo anterior la base por ser el elemento rígido del sistema tendrá 6 restricciones de grados de libertad DOF, el disco hipocicloidal se traslada en el plano XY y rota sobre el eje Z por lo que este disco tiene 3 DOF. En tanto los ejes únicamente tienen un grado de libertad debido a que solo rota sobre el eje z

Construimos el primer joint que proporciona el movimiento al sistema por medio del eje de entrada. Este joint será de revolución debido a que solo tiene un DOF. El resultado se ve en la imagen 18.

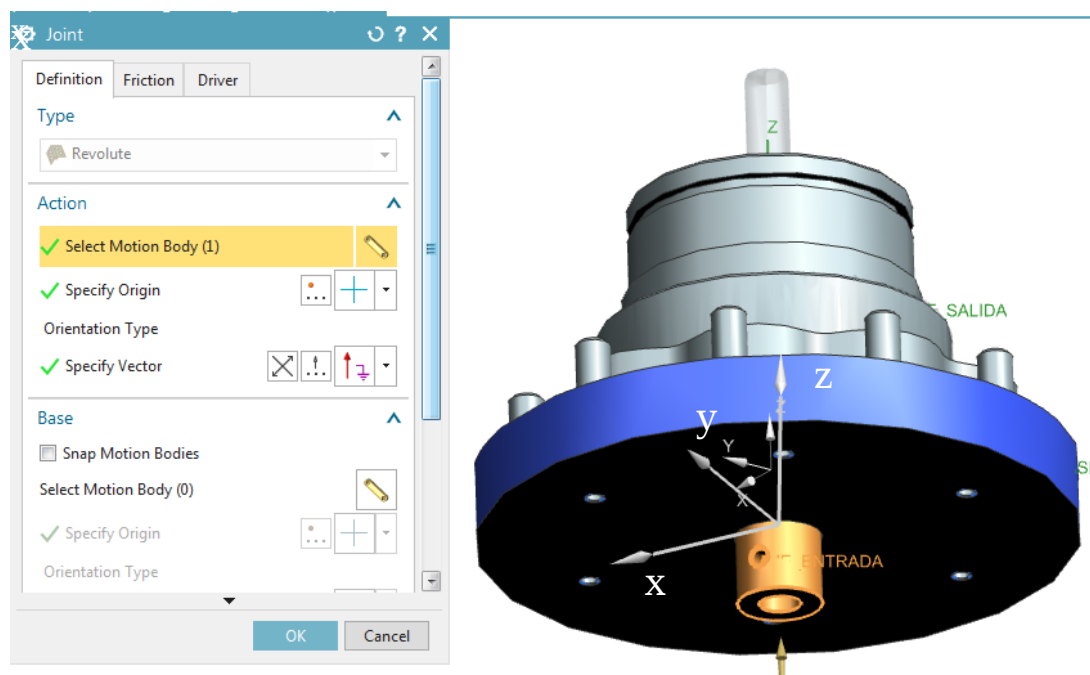


Imagen 18: Junta para el eje de entrada.

En donde sus parámetros se evidencian en la imagen 19.

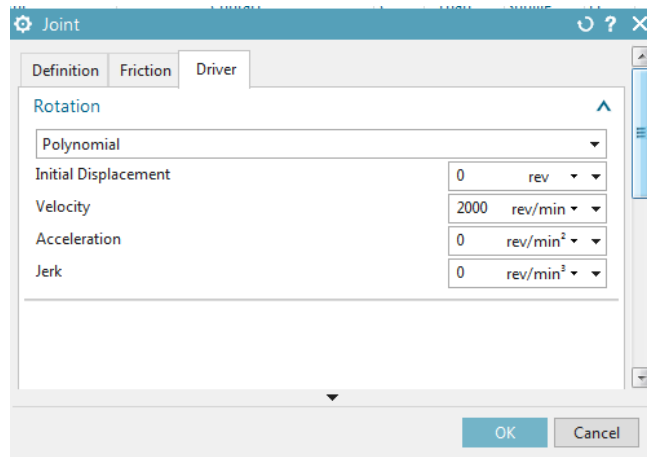


Imagen 19: Parámetros de movimiento en el joint para el eje de entrada.

Se crea otro joint de revolución para la transmisión de la potencia del eje de entrada al disco hipocicloidal y una cilíndrica con el fin de que el eje de salida no se traslade en el x,y y solo pueda girar en el eje z.

La lista de Joint se evidencia en la Imagen 19.1



Imagen 19.1: Joints utilizados en la simulación.

6.1.3. Definición de restricciones de contacto (*Contacts*)

Debido a que el sistema funciona por medio de contactos entre el engranaje hipocicloidal-base y, entre el engranaje hipocicloidal-eje de salida. Se crean dos relaciones de contacto respectivamente para cada una de estas conexiones. Como se ven en la imagen 20 y 21. Enlistándolas en la imagen 22

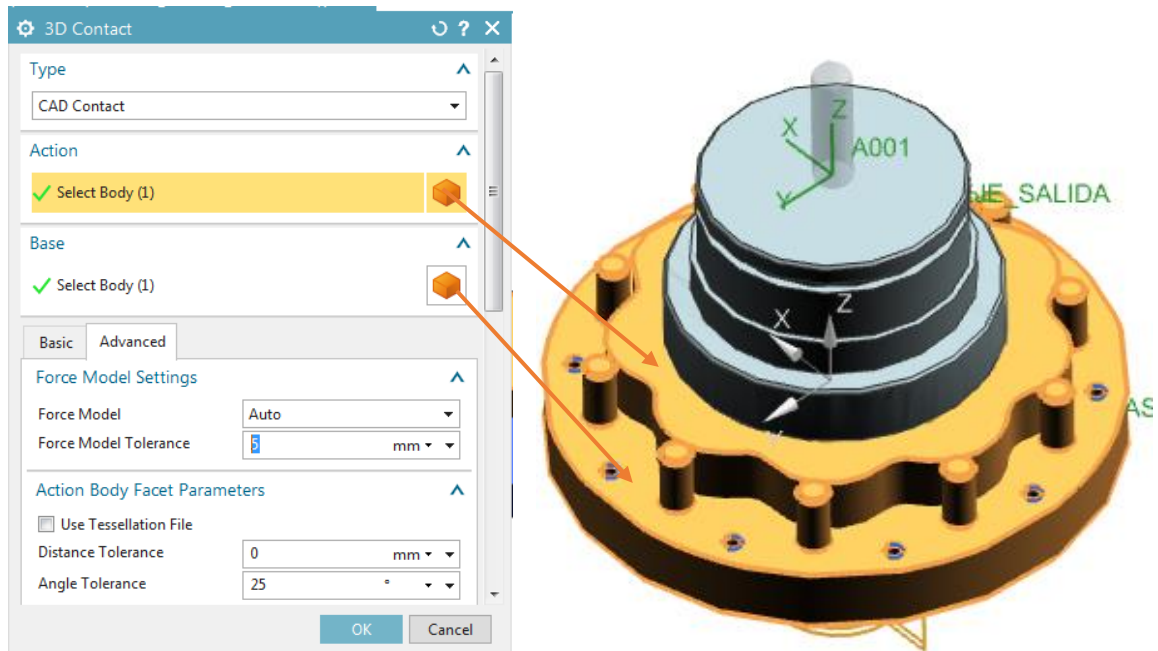


Imagen 20: Contacto G001 entre engranaje-base

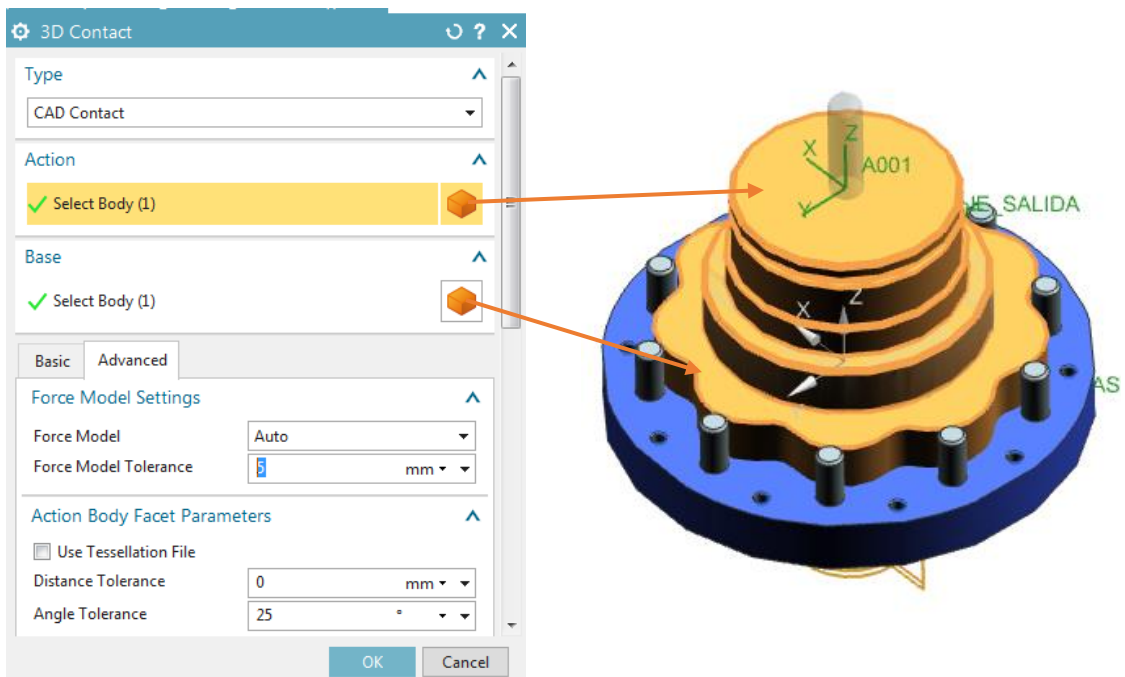


Imagen 21: Contacto G002 entre eje de salida- Engranaje

☒	☒	Contacts		
☒	☒	G001		
☒	☒	G002		

Imagen 22: Contacts utilizados en la simulación.

Y en la imagen 23 se ve el árbol completo del motion.

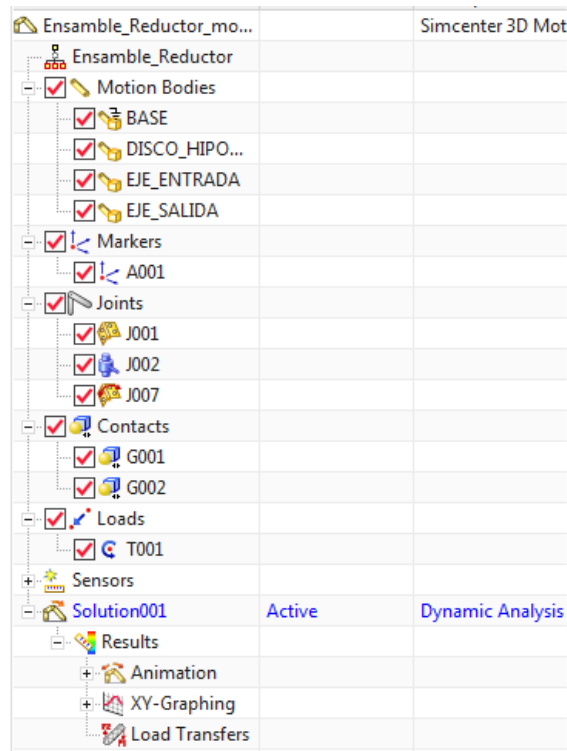


Imagen 23: Árbol del motion

6.2. Resultados del análisis cinemático del motorreductor

Los resultados de interés para el motorreductor son la velocidad y torque que entran al sistema y estas mismas variables a su salida

6.2.1. Velocidad en el motorreductor

La velocidad a la entrada en el eje como fue especificada en el joint es de 2000 rpm. En XY results el NX graficará los resultados de velocidad. En donde la imagen 24 se ve la ruta para graficar

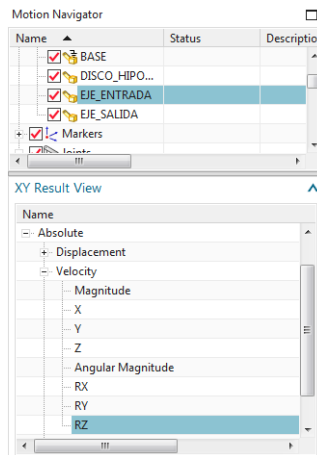


Imagen 24: Ruta para graficar la velocidad

El resultado de graficar la velocidad del eje de entrada se evidencia en la imagen 25

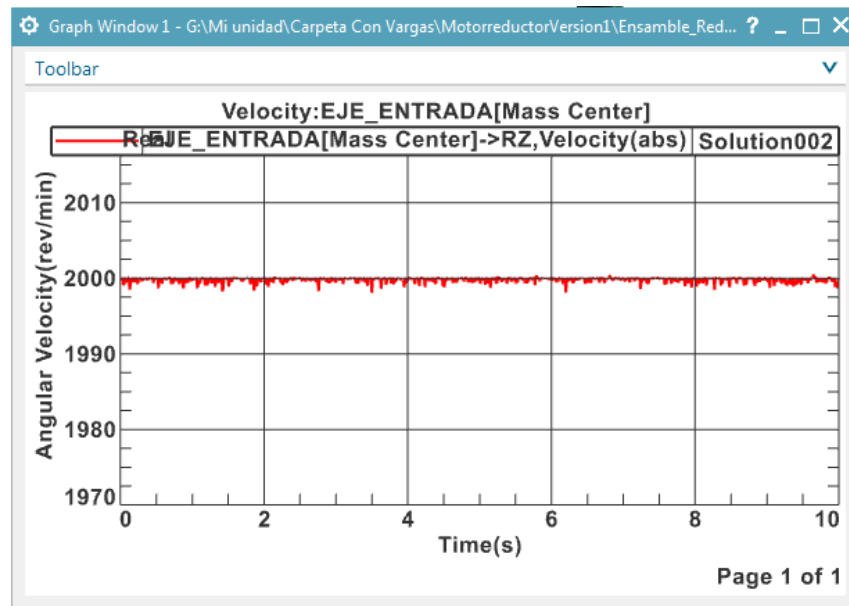


Imagen 25: Velocidad del eje de entrada

Así mismo graficamos la velocidad angular en el eje de salida, donde el resultado se evidencia en la imagen 26

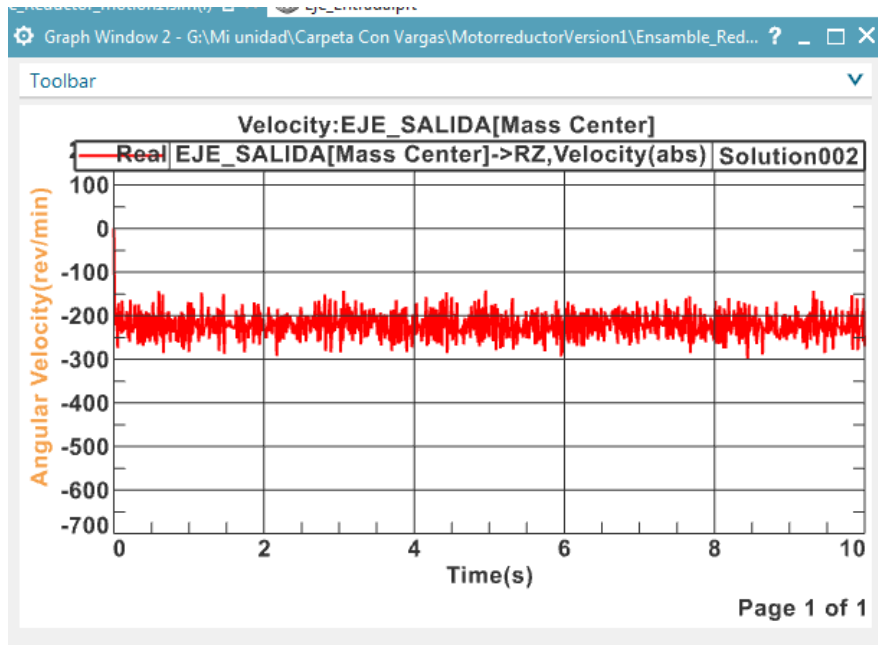


Imagen 26: Velocidad del eje de salida

Se toman los valores del eje de salida de velocidad angular contra tiempo y se exportan en un Excel con el fin de hallar el promedio, dado que los resultados los exporta en $^{\circ}/s$ se convierte a rpm dando como resultado. -221.334 rpm como se ve en la tabla 2. La oscilación de los datos se atribuye a la tolerancia que hay entre los pines del eje de salida y el disco hipocicloidal y entre el perímetro de este ultimo con los pines guías.

Promedio	-1328	$^{\circ}/s$
	-221.333	rpm

Tabla 2: Velocidad promedio

Como resultado del análisis cinemático se puede decir que la velocidad se ve reducida 9 veces (de 2000 rpm a 222rpm) como se muestra en las gráficas. Esto obedeciendo a la relación **9:1** la cual se calculó con la ecuación (1) en un capítulo anterior basándose en el diseño conceptual del motorreductor.

NOTA: Gira negativo porque es sentido contrario

6.2.2. Torque en el motorreductor

Para el análisis del torque en el reductor, se toma como par de entrada el torque de salida del motor eléctrico ($T_{in} = 0.01Nm$). La relación del torque de entrada en el reductor con respecto al torque de salida, se realiza a partir de las ecuaciones (17) y (18) [11].

$$T_{dh} = \frac{T_{in} * N}{2} \quad (17)$$

$$T_{out} = T_{dh} * 2 \quad (18)$$

T = Torque

N=Número de pines en la base

T_{in} = Torque a la entrada del reductor

T_{dh} = Torque del disco hipocicloidal

T_{out} = Par a la salida del reductor

$$T_{dh} = \frac{0.01Nm * 10}{2} = 0.05Nm$$

$$T_{out} = 0.05Nm * 2 = 0.1Nm$$

Se evidencia que el par de salida es mayor respecto al par de entrada, lo cual confirma la multiplicación del par cuando se reduce la velocidad. El par a la salida es 10 veces mayor al que se tiene a la entrada del reductor.

7. Ensamble general del sistema

Además de las piezas que cumplen una función en la cinemática del sistema, se añade otras piezas con el fin de realizar el diseño en detalle del reductor.

Se realiza una pieza para el acople con el motor, la cual es un disco brida, además se necesita una serie de rodamientos, anillos y tornillería. Con cada una de las modificaciones en las piezas para su ensamblaje. En donde el ensamble entero se ve en la imagen 27, las restricciones del ensamble se evidencian en la imagen 28

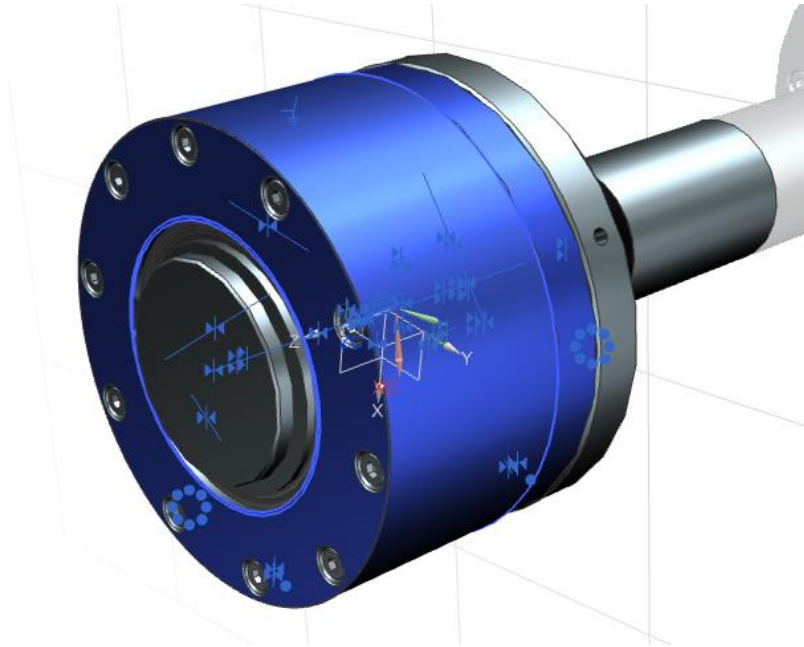


Imagen 27: Ensamble general del motorreductor

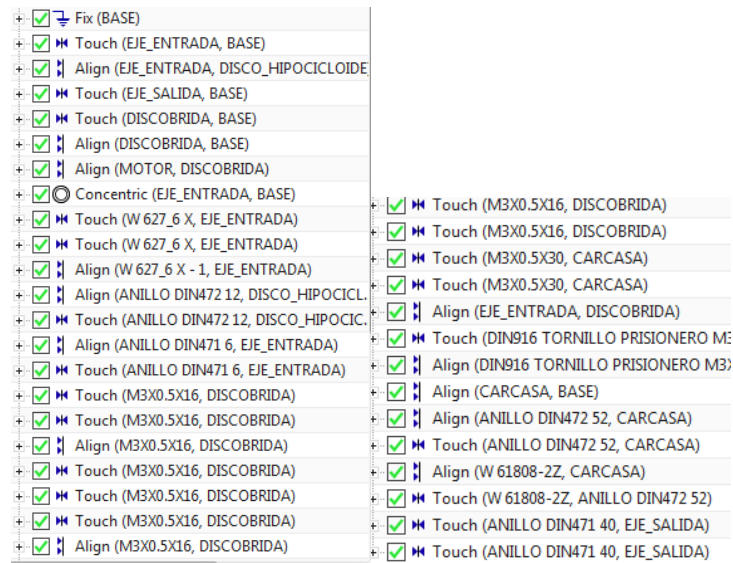


Imagen 28: Restricciones del ensamble en NX.

7.1. Ensamble para presentación de prototipo

El motorreductor es diseñado para manufacturarse en material metálico con la estrategia de arranque de viruta, para la verificación del movimiento se realiza el prototipo funcional en impresión 3D utilizando la estrategia de deposición de hilo fundido (FDM). Para el funcionamiento de este prototipo se realizan unos ajustes a las piezas del reductor debido a la no posibilidad de hacer el acople con el motor y de la ensamblabilidad con la tortillería. Se realiza el prototipo funcional del reductor en la impresora Zortrax M200 de la Universidad Santo Tomás en material Z-ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). El cual presenta una adecuación al ensamble, ya que no es posible utilizar el motor debido a que puede fallar el sistema debido a que el plástico no resiste los esfuerzos y velocidad del motor DC, caso contrario del duraluminio, para el cual fue diseñado.

Se realizó una modificación al eje de entrada, ya que, el acople con el eje de salida del motor no se hace forma prevista con un tornillo prisionero. Por esto se le hace una modificación en donde la transmisión de potencia se utiliza con una manivela. El resultado del cambio de esta pieza se ve evidenciado en la imagen 29

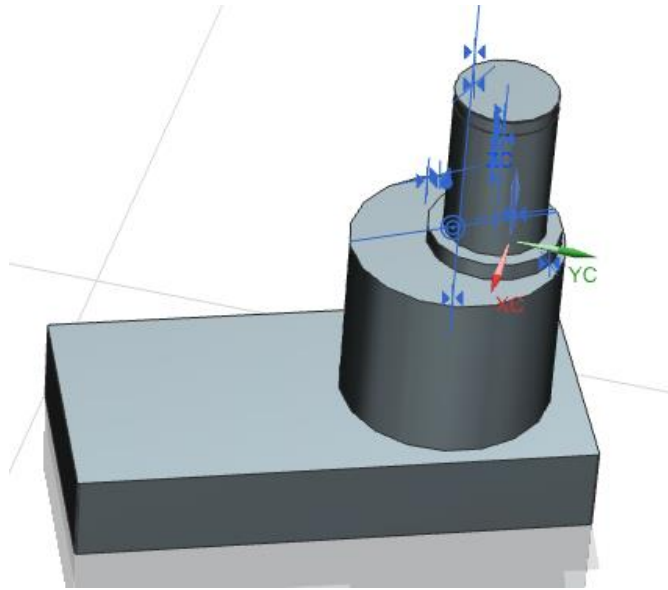


Imagen 29: Eje de salida con modificación en NX.

Se le realiza una modificación a la pieza base, con el fin de poder ensamblar las piezas y poder unir la base con la carcasa. Como en el polímero no se pueden realizar roscas para que el tornillo pudiese sujetar el sistema, se le sustrajo a la base por el lado exterior del sistema un espacio con forma de hexágono con el fin de colocar una tuerca M3. Como se evidencia en la imagen 30

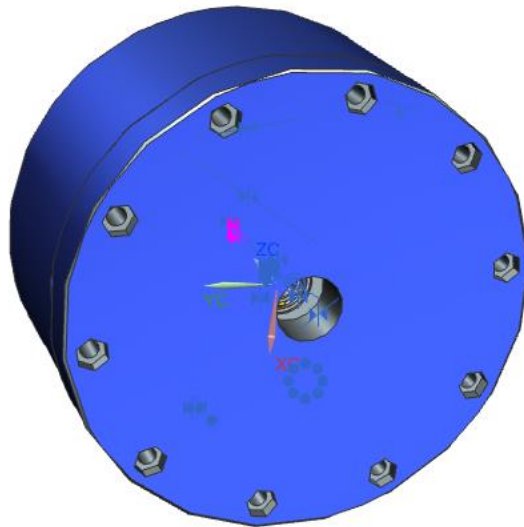


Imagen 30: Ensamble con modificación en NX.

Se le quita el disco brida al ensamble de polímero ya que, este era un accesorio para el acople con el motor. Así el ensamble final se ve como en la imagen 31 e imagen 32

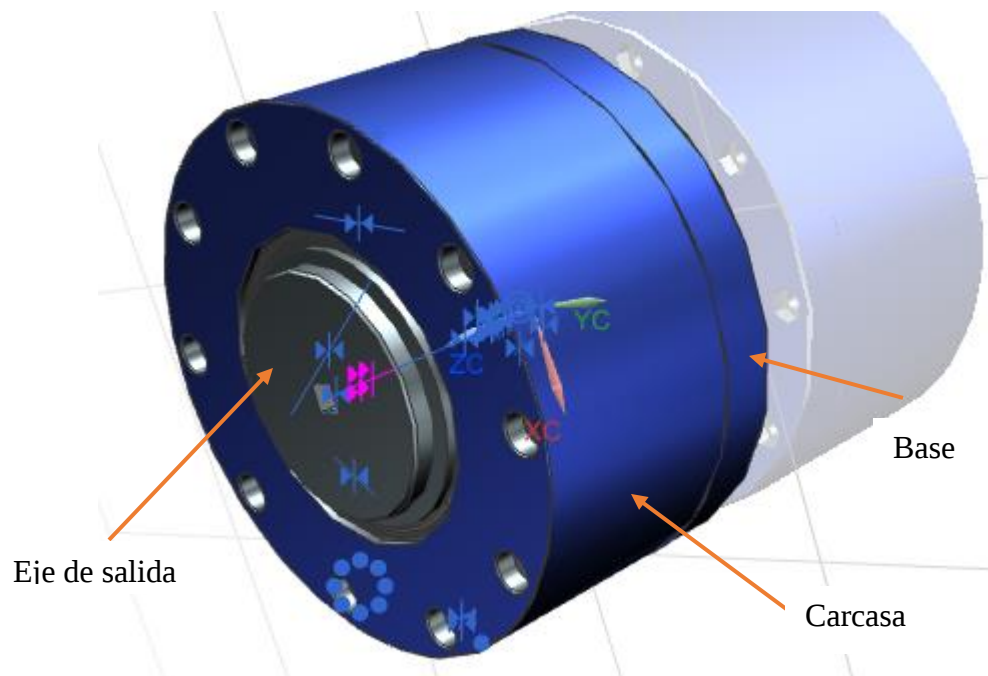


Imagen 31: Ensamble con modificación en NX.

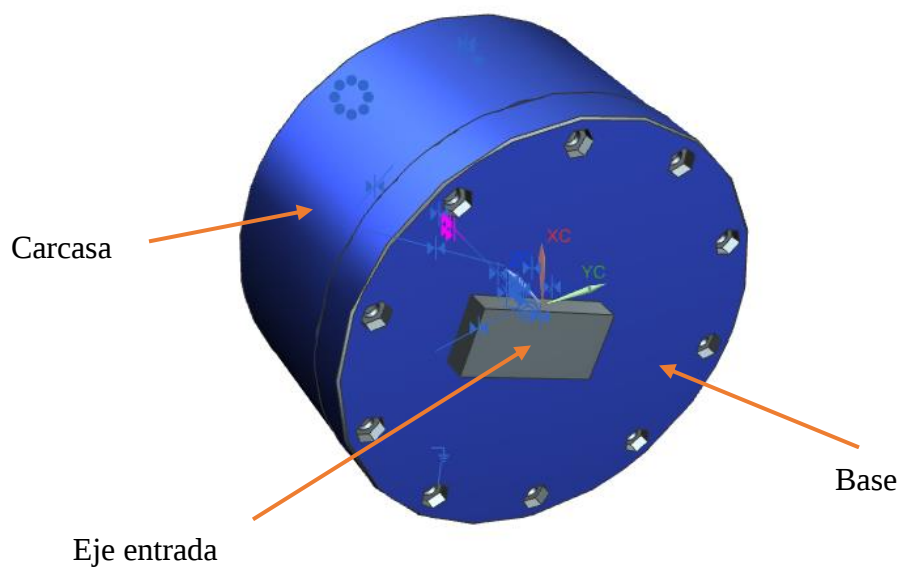


Imagen 32: Ensamble con modificación en NX.

8. Fabricación de prototipo en impresión 3D.

8.1. Selección de materia prima de los componentes

Para la fabricación del prototipo funcional que no soporta tantos esfuerzos debido a que no se emplea un motor, es utilizado el material Z-ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). El cual tiene buenas propiedades para la fabricación del prototipo como lo son[12]:

- El acrilonitrilo proporciona: Resistencia térmica, resistencia química, resistencia a la fatiga y dureza y rigidez.
 - El butadieno proporciona: Ductilidad a baja temperatura, resistencia al impacto y resistencia a la fusión.
 - El estireno proporciona: Facilidad de procesamiento (fluidez), brillo, dureza y rigidez.
- Densidad: 1,03 a 1,38 g/cm³
 - Módulo de elasticidad (Young): 1.7 a 2.8 GPa
 - Elongación a la rotura: 3% al 75%
 - Módulo de flexión: 2.1 a 7.6 GPa
 - Resistencia a la flexión: 69 a 97 MPa
 - Temperatura de transición vítrea: 100°C
 - Temperatura de deflexión del calor (a 455 kPa): 84 a 118°C
 - Capacidad calorífica específica: 1080 a 1400 J/kg-K
 - Relación fuerza-peso: 31 a 80 kN-m/kg
 - Resistencia a la tracción (UTS): 33 a 110 MPa
 - Expansión térmica: 83 a 95 $\mu\text{m/m-K}$

Las cuales aportan los valores necesarios para el correcto funcionamiento del equipo en prototipo.

8.2. Selección de condiciones de impresión.

Debido a que para que el correcto funcionamiento del reductor se necesita mucha precisión a la hora de los agujeros, ejes, lóbulos del disco y pines guías, se realizan varias pruebas, ya que, el ABS sale de la impresora ZORTRAX M200 con una temperatura elevada y el polímero se contrae al enfriarse. Por esto, en estas pruebas se variaron parámetros tales como: tolerancia en los agujeros, tamaño de los ejes y otras piezas en los archivos CAD, además de condiciones de la impresión como lo son relleno, capas, calidad, entre otras. Con el fin de que a la hora de realizar la medición de las piezas, los valores tomados sean muy aproximados con las dimensiones de los planos, para tener una ensamblabilidad y accionamiento funcional.

En la imagen 33 se evidencia las condiciones de impresión empleadas:

Printer: Zortrax M200	
Profile: Last settings	
Support type: Automatic	
Support: 20°	
Material: Z-ABS	
Nozzle diameter: 0.4 mm	
Layer: 0.19 mm	
Quality: High	
Infill: 50%	First layer Print speed: 100%
Fan speed: Auto	First layer Flow ratio: 100%
Seam: Normal	First layer gap: 0.21 mm
Outer contours: 0.00	Raft Enabled: Yes
Holes: 0.20	Raft layers: 6
Surface layers Top: 4	Platform-raft gap: 0.20 mm
Surface layers Bottom: 3	Raft Density: 100%
Support Lite: No	Raft Print speed: 100%
Smart bridges: Yes	Raft Flow ratio: 100%
Support offset: No	Support Density: 4.00 mm
First layer Density: 100%	Gap XY: 0.31

Imagen 33: Condiciones de impresión en Zortrax.

8.3. Generación y simulación de impresión

Se realiza el ajuste de posición de las piezas sobre la cama de la impresora, colocándolas de tal forma que sea la forma más fácil de imprimir y donde calcule la menor cantidad de soportes. La representación del montaje se evidencia en la imagen 34

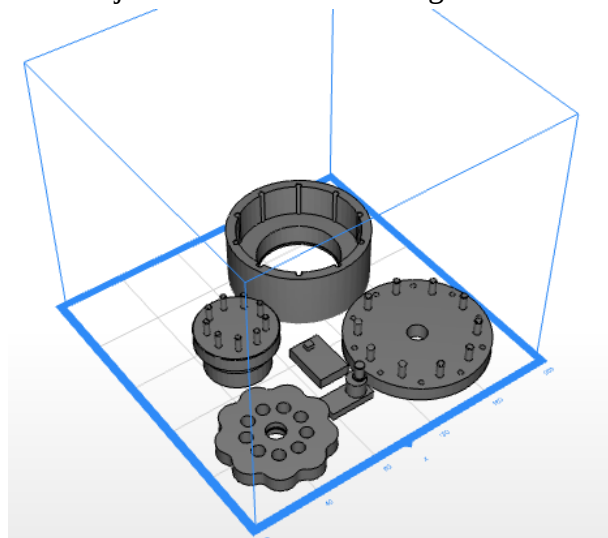


Imagen 34: Montaje de impresión en Zortrax.

Luego se simulan las trayectorias de impresión y muestra cual es la vista previa de las piezas a la hora de la impresión. Obteniendo la vista previa de la impresión como se ve en la imagen

35

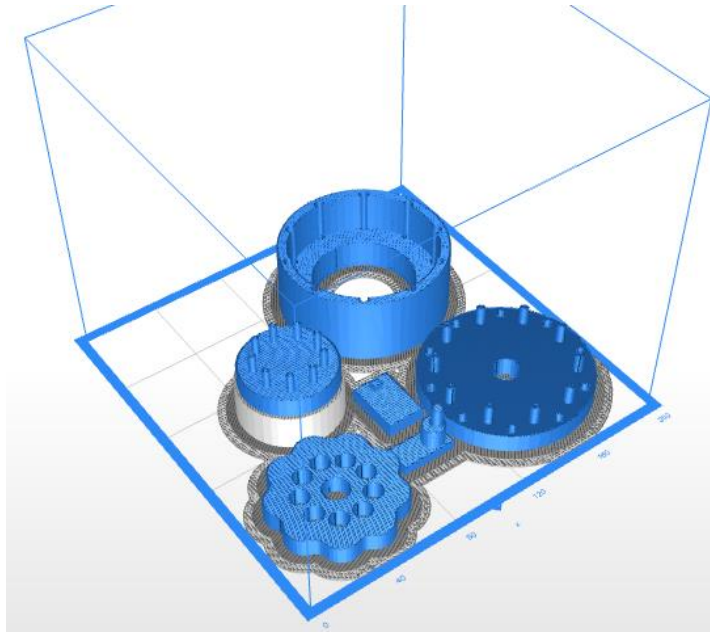


Imagen 35: Vista previa de impresión en Zortrax.

8.4. Montaje y fabricación del sistema

El código que genera el programa Z-Suite parametrizado con los valores previamente evidenciados son lenguajes de programación que sirven para la impresora y material de ZORTRAX M200 Y Z-ABS a utilizar. La impresora ZORTRAX M200 está ubicada en el laboratorio de metrología de la Universidad Santo Tomás. Se muestra la impresora empleada en la imagen 36.



Imagen 36: impresora Zortrax.

Al montaje que se evidencia en la imagen 34 le es generado en el programa Z-SUITE un código Z-CODE, el cual se introduce en la impresora por medio de una tarjeta SD. Se obtiene el resultado de todas las piezas que se utilizan en la máquina (A excepción de rodamientos y tornillería), como se evidencia en la imagen 37.

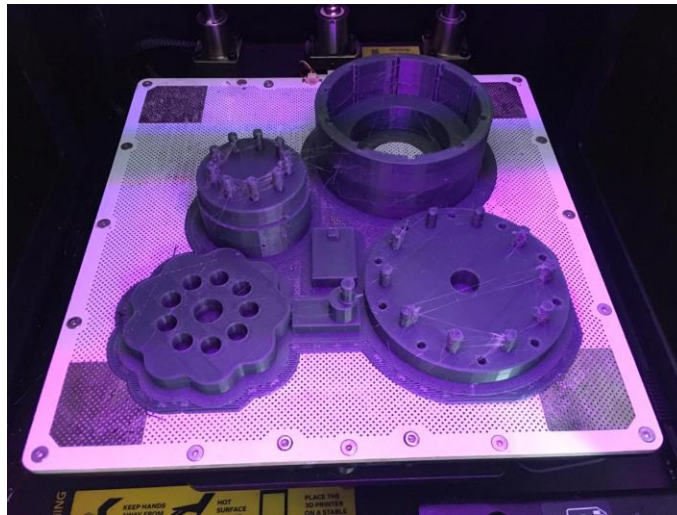


Imagen 37: Resultado de la impresión en Zortrax.

Se obtiene en la impresión 3D el disco hipocicloidal (imagen 38), Base (imagen 39), Eje entrada (imagen 40), Eje salida (imagen 41), Carcasa (imagen 42), Palanca (imagen 43).



Imagen 38: Disco hipocicloide



Imagen 39: Base



Imagen 40: Eje de entrada



Imagen 41: Eje de salida

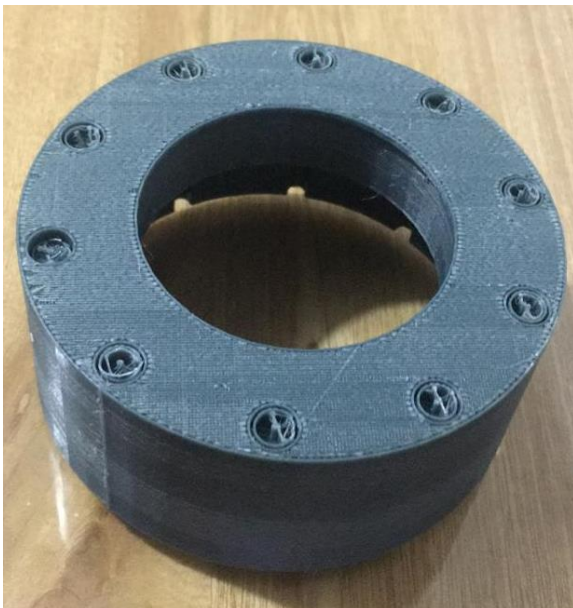


Imagen 42: Carcasa



Imagen 43: Palanca

8.5. Ensamble de las piezas del sistema

Como en el plástico no se pueden realizar roscas para que el tornillo pudiese sujetar el sistema se le sustrajo a la base por el lado exterior un espacio con forma de hexágono para colocar una tuerca M3. Como se evidencia en la imagen 44:

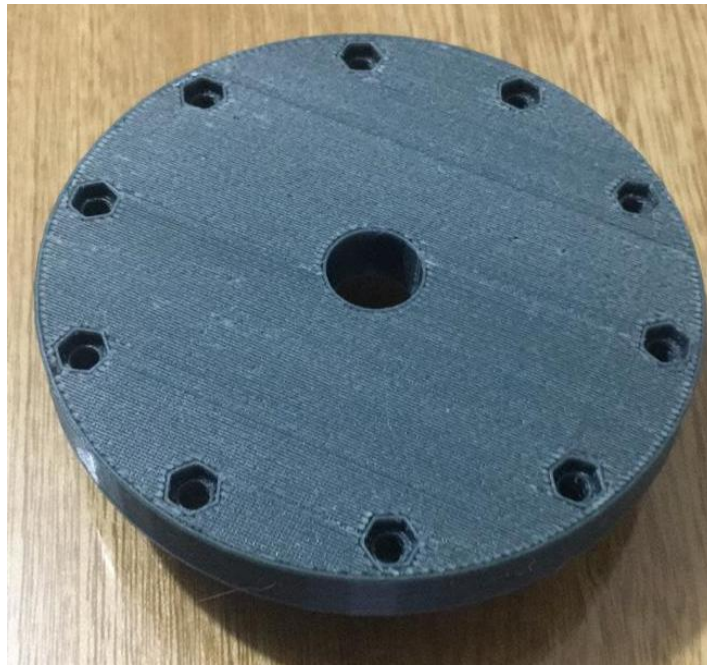


Imagen 44: Pieza base con modificación

Luego se ensambla los rodamientos dentro del agujero central del disco hipocicloidal, para después insertar el disco hipocicloidal en la base como se ve en la imagen 45.



Imagen 45: Primer paso de ensamble

Se inserta los pines del eje de salida sobre los agujeros del disco hipocicloidal como se ve en la imagen 46



Imagen 46: segundo paso de ensamble

Luego la parte gruesa del eje de salida la insertamos en el rodamiento que esta previamente insertado en la carcasa. Como se ve en la imagen 47



Imagen 47: Tercer paso de ensamble

Colocamos la palanca para ver el correcto funcionamiento de la reducción, Ajustamos la carcasa y tornillería y el resultado final del ensamble se muestra en la imagen 48, en donde además se compara el prototipo virtual con el prototipo.

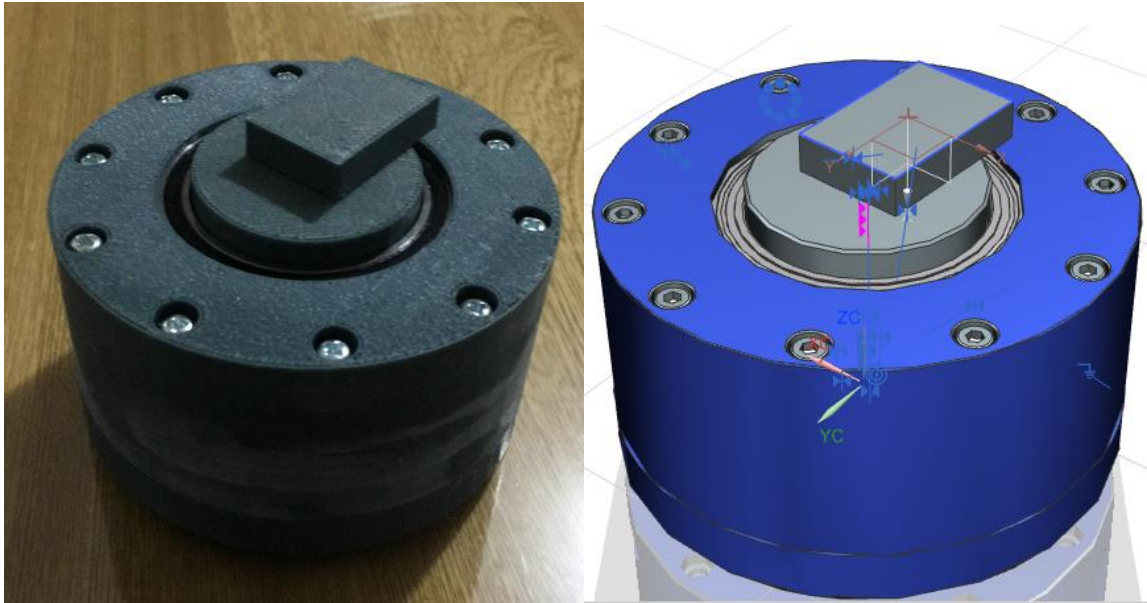


Imagen 48: Tercer paso de ensamble – Comparación modelo virtual

8.6. Prueba de funcionamiento

Para verificar la relación entre el torque de entrada y salida en el prototipo funcional en material Z-ABS se utiliza el dinamómetro de la Universidad Santo Tomás el cual se ve en la imagen 49. Este dispositivo utiliza la ley de elasticidad de Hooke para medir fuerzas en N y masas en g.



Imagen 49: Dinamómetro de la Universidad Santo Tomás

Para medir la fuerza aplicada con la mano al eje de entrada, el dinamómetro es utilizado haciéndole el acople con una puntilla en la pieza del eje de entrada; el cual está a un radio r del centro del eje, la puntilla estira el gancho del dinamómetro que a su vez hace lo propio con el resorte. Así mide la fuerza aplicada.

Para medir el toque de entrada al reductor se multiplica la fuerza aplicada que muestra el dinamómetro por el radio r al que esta la puntilla, cabe aclarar que la fuerza debe ser aplicada en el mismo radio de la puntilla. Dicho radio r es de 16.55 como se muestra en la imagen 50.



Imagen 50: Radio entre el centro del eje entrada y la puntilla

Con el fin de poder cuantificar el torque a la salida y a la entrada del reductor, se coloca una masa en el eje de la salida a un radio R del centro al eje de la salida sobre una puntilla. Este radio R es de 15.33mm como se ve en la imagen 51, la masa a levantar es de 0.5 kilogramos, esta masa se puede ver en la imagen 52.



Imagen 51: Radio entre el centro del eje salida y la puntilla que sostiene el peso.



Imagen 52: Masa de 500g

El acople del eje de entrada con el dinamómetro y la puntilla se muestra en la imagen 53, el acople del eje de salida con el peso se ve en la imagen 54.



Imagen 53: Acople Dinamómetro- eje de entrada



Imagen 54: Acople eje de salida - masa de 500 g

Se busca hallar la relación del torque en el reductor, para esto se busca el toque necesario en el eje de entrada para mover la masa de 0.5 kg ubicada a 15.33 mm del centro en el eje de salida. Entonces se halla el torque en el eje de salida.

$$T_{out} = m * g * R \quad (19)$$

$$T_{out} = 0.5kg * 9.8m/s^2 * 15.33mm$$

$$T_{out} = 75.215Nmm$$

Luego hacemos el montaje del reductor. Para hallar la fuerza y torque en el eje de entrada necesario para mover la masa en el eje de salida. El montaje en el punto inicial tiene la masa en una posición paralela a la gravedad. Como se muestra en la imagen 55.



Imagen 55: Posición 0 del montaje

Luego se le aplica una fuerza al eje de entrada a un radio de 16.55 del centro, Según el resorte al elongarse la fuerza requerida para poder mover la masa del eje de salida es de 5.1N como se muestra en la imagen 56, además podemos ver una segunda posición donde la masa esta perpendicular al eje de salida.



Imagen 56: Posición 1 del montaje

Basándose en la fuerza aplicada de 5.1N se calcula el torque que se requiere para mover la masa del eje de salida de la siguiente forma.

$$T_{in} = F * r \quad (20)$$

$$T_{in} = 5.1N * 16.55mm$$

$$T_{in} = 8.275Nmm$$

Donde la relación de torque es;

$$R_{Torque} = \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (20)$$

$$R_{Torque} = 9.1$$

La diferencia en la relación del torque teórico y el experimental puede darse con base al error al tomarse las medidas de radios, fuerza en el nivel del dinamómetro y pérdidas en el reductor.

Para verificar la relación de velocidad en la imagen 57 se puede evidenciar 9 momentos, en el transcurso de estos 9 momentos, el lápiz que sirve para visualizar la velocidad del eje de entrada (Parte posterior), la posición de este eje en cada uno de los momentos se puede diferenciar con la ayuda de un triángulo blanco. Este eje da 9 revoluciones mientras que la palanca que se ve en la parte frontal solo completa una revolución, el círculo naranja que aparece también en la imagen 57 acompaña el movimiento de la palanca en los 9 momentos. Por lo que se muestra la relación 9:1.

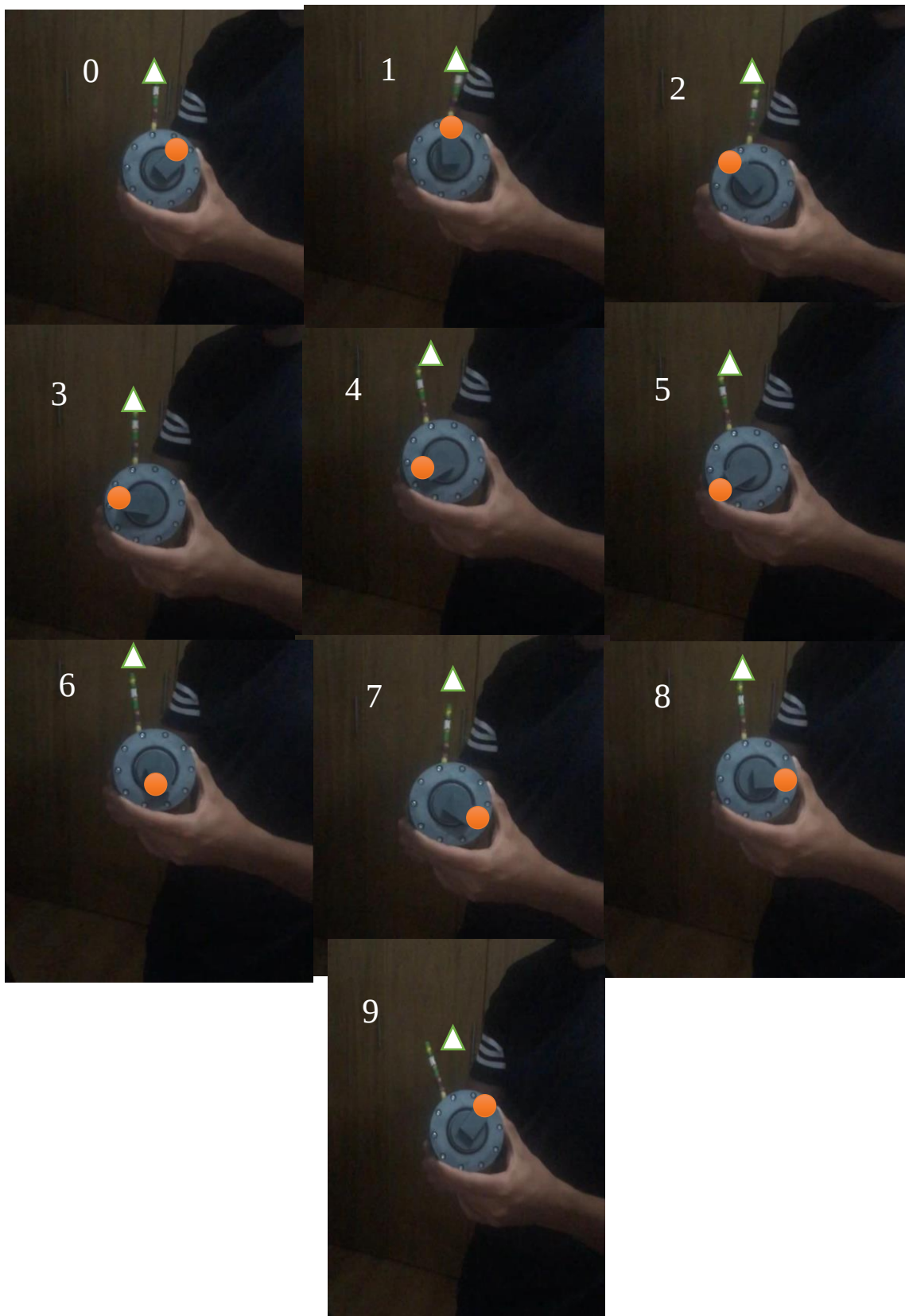


Imagen 57: Prueba de funcionamiento de la relación de transmisión

9. Conclusiones.

- El ambiente Motion de NX sirvió de gran ayuda, pues no solo generó un prototipo virtual en donde se puede corroborar el movimiento, sino también la velocidad de entrada y salida del dispositivo en donde por cálculos de dicha herramienta comprobó que la reducción del movimiento es 9:1, a raíz de la tolerancia que maneja el dispositivo entre la curva hipocicloidal y los pines se genera una varianza en la gráfica de velocidad de salida, dando como resultado promedio de esta varianza un valor aproximado de velocidad angular en el eje de salida, también se verificó que las piezas se movieran con las restricciones de grados de libertad previstas para cada una, teniendo en cuenta diferentes parámetros como vectores de gravedad, fricción y demás, donde satisfactoriamente los resultados de los valores calculados por el software cumplen con los datos teóricos.
- Con la fabricación del dispositivo en el material ABS, se garantiza una buena precisión en el mecanismo, aunque no tan precisa como en un proceso de manufactura por arranque de viruta. Como es de suma importancia la precisión en algunas partes del reductor, se realizaron varias impresiones 3D variando parámetros de la impresión y tamaños de las piezas en agujeros y ejes desde los archivos CAD, debido a que estos se expandían o contraían al enfriarse luego de la impresión y tenían dimensiones cercanas al valor, pero no en el rango de tolerancia necesario, por esto se realizaron varias pruebas hasta obtener un resultado funcional.
- Con este proyecto factible se demuestra que se puede sacar provecho máximo a herramientas como CAD, CAM y de fabricación disponibles en el país, para implementar nuevas tecnologías y metodologías para el desarrollo de un producto. Se consigue un producto el cual se puede llevar a la práctica, donde complementando con estudios de ingeniería de diseño en detalle con esfuerzos en tecnología de análisis de elementos finitos y selección de materiales se puede llegar a producir a un nivel industrial donde el producto cumpla totalmente con los requerimientos del cliente y poder así de aumentar las ganancias para el sector industrial manufacturera del país con un nuevo producto en el mercado y en donde este producto por sus características como precisión en la fabricación, reducción de velocidad de 9:1 para su tamaño se puede considerar como producto con valor agregado.

10. Bibliografía.

- [1] DANE, “Anexos_produccion_constantes_IV_2018,” Bogota D.C, 2019.
- [2] C. L. Montaña, “Los grandes problemas de la industria en Colombia son viejos,” *portafolio*, 2019.
- [3] G. R. Martínez, “TESIS: DISEÑO DE UN REDUCTOR CICLOIDAL PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO.,” 2013.
- [4] Tec-scienc, “How does a cycloidal drive work?,” *tec-scienc*, vol. 1, 2019.
- [5] Sumitomo, “Catalogo Sumitomo Drives. Cycloidal Reducers,” 2020. [Online]. Available: <https://us.sumitomodrive.com/en/product/cyclo-6000-gearmotor>.
- [6] C. H. Lehman, *Geometria analitica*, Editorial. 1999.
- [7] Proof, “Equation of hypocycloid,” 2019. [Online]. Available: [https://proofwiki.org/wiki/Equation_of_Hypocycloid#:~:text=Let H be the hypocycloid traced out by the point P.&text=The point P%3D\(x%2C,a-bb\)theta](https://proofwiki.org/wiki/Equation_of_Hypocycloid#:~:text=Let H be the hypocycloid traced out by the point P.&text=The point P%3D(x%2C,a-bb)theta).
- [8] C. De Gante González, “Generación y Comparación de patrones de difracción de Aberturas Poligonales e Hipocicloides,” pp. 1–63, 2014.
- [9] Dunkermotoren, “Techinal Catalog Motor DC G30.2.”
- [10] OTVINTA, “Hypocycloid Gear Calculator,” *OTVINTA.COM*, 2018. [Online]. Available: <http://www.otvinta.com/cycloid.html>.
- [11] M. I. A. Z. Sánchez, “Diseño y Construcción de un Reductor de Velocidad Cicloidal con Cadenas de Rodillos,” 2017.
- [12] MAKEITFORM, “PROPERTIS ABS,” *WEB*, 2019. [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene-ABS/>.

ANEXOS

