



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

ESEIAAT

Trabajo de Fin de Máster [TFM]

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Memoria del proyecto

Màster Universitari en Enginyeria Industrial (MUEI)

Autor: Ezequiel Moreno Larrea

Director: Rafael Weyler Pérez

Co-directora: Montserrat Sanchez Romero

Fecha de entrega: 30/06/2020

Índice de contenido

1. Introducción	1
1.1. <i>Objeto del proyecto</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Justificación</i>	<i>1</i>
1.3. <i>Alcance</i>	<i>2</i>
1.4. <i>Requerimientos de la ingeniería básica</i>	<i>2</i>
2. Estado del arte	3
2.1. <i>Cajas reductoras, conceptos básicos y aplicaciones</i>	<i>3</i>
2.2. <i>Técnicas de prototipado 3D</i>	<i>5</i>
2.2.1. <i>Prototipado FDM (Fused Deposition Material).....</i>	<i>5</i>
2.2.2. <i>Otras técnicas de prototipado actual.....</i>	<i>6</i>
3. Ensayo previo	7
3.1. <i>Material y elementos del ensayo.....</i>	<i>8</i>
3.2. <i>Diseño del cilindro</i>	<i>9</i>
3.3. <i>Realización del ensayo.....</i>	<i>11</i>
3.4. <i>Modificaciones en el ensayo</i>	<i>13</i>
4. Predimensionado de la caja reductora.....	15
4.1. <i>Cálculo de velocidades y datos de generación</i>	<i>15</i>
4.2. <i>Esquemas de distribución de engranajes</i>	<i>17</i>
5. Cálculo de engranajes y ejes	22
5.1. <i>Engranajes cilíndricos rectos.....</i>	<i>22</i>
5.2. <i>Engranajes cilíndricos helicoidales.....</i>	<i>29</i>
5.3. <i>Cálculo de ejes</i>	<i>34</i>

6. Diseño CAD del conjunto caja reductora	35
6.1 Diseño CAD de engranajes	35
6.1.1 Diseño de engranajes cilíndricos rectos	35
6.1.2 Diseño de engranajes cilíndricos helicoidales.....	39
6.2. Diseño CAD de ejes	42
6.2.1. Diseño del Eje 1.....	43
6.2.2. Diseño del Eje 2, 3 y 4.....	45
6.2.3. Tolerancias del eje, agujeros y rodamientos	47
6.3. Diseño de la carcasa y soporte exterior	48
6.3.1. Diseño del soporte	48
6.3.2. Diseño del bloque inferior	48
6.3.3. Diseño del bloque intermedio y superior.....	49
6.3.4. Diseño de las tapas de rodamientos y motor	50
7. Montaje de la caja reductora	51
7.1. Simulación de funcionamiento	57
8. Conclusiones y recomendaciones de continuidad	60
9. Bibliografía	62

Índice de tablas

Tabla 1: Puntos de perfil envolvente en el engranaje C.....	27
Tabla 2: Puntos de perfil envolvente en el engranaje D	28
Tabla 3: Puntos de perfil envolvente en los engranajes A y B respectivamente	33
Tabla 4: Parámetros de diseño de engranajes cilíndricos rectos.....	35
Tabla 5: Parámetros de diseño de engranajes cilíndricos helicoidales.....	39

Índice de figuras

Figura 1: Tren epicicloidal y tren simple	4
Figura 2: Esquema del ensayo	7
Figura 3: Motor NEMA 17 y CNC Shield V3	8
Figura 4: Cilindro diseñado en SolidWorks	10
Figura 5: Montaje del motor-cilindro	11
Figura 6: Sketch de Arduino	12
Figura 7: Unión entre ejes diseñado en CAD	13
Figura 8: Soporte de rodamiento diseñado en CAD	14
Figura 9: Ensamblaje CAD del ensayo modificado	14
Figura 10: Esquema de engranaje de dos etapas	17
Figura 11: Esquema de engranaje con tronillo sinfín	18
Figura 12: Esquema de engranaje de tres etapas	20
Figura 13: Esquema de distribución de trenes definitivo	21
Figura 14: Esquema de parámetros intrínsecos	22
Figura 15: Condiciones de funcionamiento	23
Figura 16: Esquema de desplazamientos	24
Figura 17: Gráfica perfil envolvente engranaje C	28
Figura 18: Gráfica perfil envolvente engranaje D	28
Figura 19: Generación del perfil helicoidal	29
Figura 20: Gráficas de perfil envolvente de los engranajes A y B	33
Figura 21: Diseño CAD de ángulos y circunferencias de engranaje	36
Figura 22: Introducción de datos en curva XYZ	36
Figura 23: Diseño CAD del perfil evolvente	37
Figura 24: Diseño CAD de los engranajes C & D	38
Figura 25: Diseño croquis de engranaje helicoidal	40
Figura 26: Corte helicoidal	40
Figura 27: Diseño CAD de los engranajes A & B	41
Figura 28: Esquema de ejes en caja reductora	42
Figura 29: Diseño CAD Eje 1	44
Figura 30: Diseño CAD Eje 2 y 3	45
Figura 31: Diseño CAD Eje 4	46
Figura 32: Diseño CAD Soporte	48
Figura 33: Diseño CAD Bloque Inferior	48
Figura 34: Diseño CAD Bloque Intermedio	49
Figura 35: Diseño CAD Bloque Superior	49
Figura 36: Diseño CAD de las Tapas	50
Figura 37: Diseño CAD Soporte motor	50
Figura 38: Diseño CAD Caja reductora y vista en planta	56
Figura 39: Relación de posición mecánica	57
Figura 40: Selección de motor para simulación	58
Figura 41: Simulación calculada en SolidWorks	59

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

1. Introducción

1.1. Objeto del proyecto

El objeto de este proyecto es crear un prototipo de caja reductora funcional, el funcionamiento será el de una caja reductora normal donde a partir de una velocidad angular elevada obtenida de un motor en el eje de entrada se pueda reducir esta velocidad para así obtener un mayor par torsor y una menor velocidad a la salida.

En esta memoria se describirá detalladamente el proceso de cálculo, diseño en ordenador y construcción de un prototipo de caja reductora. Además de esta memoria se utilizará software CAD (SolidWorks) para el diseño y ensamblaje virtual que proporcionará una información detallada del proyecto.

En la fase de prototipaje se hará uso de una impresora 3D para crear las piezas modeladas en el software CAD, a partir de las piezas impresas se redactará un manual de construcción del prototipo de caja reductora definitiva

1.2. Justificación

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar, diseñar y fabricar un prototipo que pueda ser construido mediante tecnología de impresión 3D, que cumpla satisfactoriamente con los requerimientos de ingeniería básica establecidos inicialmente.

El proyecto se compondrá de una parte de ingeniería mecánica donde se deberán hacer montajes de ensayos, cálculos diversos, diseños, planos y bocetos, ensamblaje, impresión de piezas en 3D, construcción y montaje de un prototipo final. Con la realización se estudiarán técnicas de prototipado existentes actualmente y conocer las ventajas y limitaciones de estas técnicas.

Además para realizar los distintos ensayos se deberán tener conocimientos básicos de electrónica y programación ya que se utilizarán motores de corriente continua compatibles con Arduino como herramienta para el control de los motores.

El fin principal del proyecto es poder aplicar toda la materia adquirida durante la formación universitaria y poder plasmarlo en un proyecto de ingeniería que combine conocimientos mecánicos y electrónicos para desarrollar un mecanismo que sea funcional.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

1.3. Alcance

El alcance de este proyecto es finalizar el proyecto básico de la construcción de una caja reductora; para la consecución de este se deberán completar los siguientes puntos durante el proyecto.

La primera etapa serán pruebas que se ejecutaran con un montaje electrónico con un motor de corriente continua donde se extraerán los datos básicos de entrada en la caja reductora.

A partir de los datos de entrada obtenidos del ensayo, se ejecutará la segunda etapa donde se harán unos primeros bocetos y un pre-dimensionado con esquemas de engranajes para obtener una relación de velocidades deseada a la salida de la caja hasta encontrar la solución óptima. Una vez decidida la solución y que tipos de engranajes se van a utilizar en cada caso se harán los cálculos básicos de engranajes y ejes teniendo en cuenta tolerancias y juegos entre dientes.

En la etapa de diseño no solamente se harán los diseños de los engranajes calculados sino que también se modelarán todos los componentes como pueden ser ejes, y soportes. La última etapa de diseño que se ejecutará será el ensamble donde se juntaran todas las piezas creadas y se incluirán otros elementos como rodamientos o tornillos de unión para hacer el montaje virtual del mecanismo. Acabado el diseño final se extraerán todos los planos acotados y normalizados y si hará una simulación para comprobar el funcionamiento de la caja reductora antes del proceso de fabricación por impresión 3D

1.4. Requerimientos de la ingeniería básica

- Caja reductora compacta, dimensiones máximas aproximadas de 20x20cm,
- Relación de reducción de la caja reductora $i=20$,
- Caja reductora que pueda ser montable y desmontable fácilmente

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

2. Estado del arte

2.1. Cajas reductoras, conceptos básicos y aplicaciones

Una caja reductora es un mecanismo compuesto principalmente por trenes de engranajes cuya función principal es la de reducir las revoluciones o velocidad de giro a la salida del mecanismo. Normalmente las cajas reductoras en la entrada toman el par y las revoluciones de un motor, el motor tiene una velocidad angular elevada pero un par limitado, con la caja reductora se reduce la velocidad de giro y se puede conseguir una mayor par salida que permite aumentar la fuerza útil y accionar una aplicación determinada a la salida del eje.

La relación de transmisión viene dada por el cociente de velocidad de salida entre entrada.

$$\mu = \frac{w_2}{w_1}$$

La relación de reducción o índice de reducción es la inversa de μ , este es el parámetro más común que relaciona la velocidad de entrada entre la salida.

$$i = \frac{1}{\mu} = \frac{w_1}{w_2}$$

En una caja reductora ideal la potencia en el eje de entrada es igual a la potencia en el eje de salida, ya que las revoluciones y el par varían de forma inversamente proporcional y no se hay pérdidas.

En el caso de una reductora real se producen pérdidas por el contacto entre dientes o pérdidas de fricción por rodadura en los cojinetes, por lo tanto la potencia transmitida en el eje de salida es menor al de entrada, las pérdidas se pueden cuantificar en porcentaje mediante el rendimiento que se define como:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

En cuanto a tipo de reductoras no hay unas tipologías definidas pero se pueden diferenciar en función de la distribución o de las características del tren de engranajes, se deben conocer los tipos de distribución para así poder escoger la mejor solución.

Los más comunes son los reductores de velocidad de engranajes donde la transmisión mecánica se produce mediante pares de engranajes, donde los engranajes pueden ser cilíndricos o helicoidales, la ventaja de este tipo de mecanismo es su simplicidad y eficiencia. Otro tipo son los reductores sinfín el engranaje es característico ya que tiene forma de husillo que al girar hace avanzar un diente de una rueda dentada, este sistema es de gran sencillez, tiene mayores pérdidas que conlleva a una peor transmisión y rendimiento.

El tren epicicloidal es otro tipo de tren que se compone de un planeta, satélites, porta satélites y una corona exterior como se puede observar en la *Figura 1*. En este sistema es imprescindible que todos los elementos del planetario se estén tocando entre sí para esto los satélites deben tener el mismo tamaño y deben estar unidos entre sí por el porta satélites, la gran ventaja de este tren es que al haber un número determinado de satélites el esfuerzo se reparte proporcionalmente a los satélites y hace que el mecanismo sufra menos si se tiene un par elevado.



Figura 1: Tren epicicloidal y tren simple

En la industria la caja reductora es un elemento que se utiliza en todo tipo de maquinaria con aplicaciones muy distintas como puede ser reductores para sistemas de bombeo, tornos, retroexcavadoras y vehículos en general o también mecanismos muchos más pequeños. Los principales fabricantes que comercializan cajas reductoras son Rexroth, Leroy Sommer o John Deere.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

En este proyecto es de interés observar alguna aplicación concreta de caja reductora alimentada por un motor de corriente continua con baja potencia que pueda poner en contexto el trabajo que se va a realizar. El proyecto no tendrá una aplicación en concreto ya que no está en el alcance definido, tan solo se hará un prototipo funcional que con una instalación adecuada podría llegar a funcionar en una aplicación específica.

Un ejemplo de aplicación para este proyecto podría ser la apertura o cerramiento de una compuerta de entrada y salida de aire de ventilación, las compuertas son accionadas por un pequeño motor de corriente continua en un sistema de climatización. Esta compuerta varía de posición en función de la diferencia de temperaturas entre el exterior y la sala a climatizar, donde siempre se intenta climatizar cuando las condiciones climáticas son favorables, este sistema también es conocido como free-cooling.

En otros proyectos hechos en la ESEIAAT también se utilizó motores paso a paso con una reducción de tornillo sinfín y engranaje acoplado a un eje cuyo movimiento orientaba una antena seguidora de satélites.

Estas dos soluciones ingenieriles son ejemplos donde un motor eléctrico debe proporcionar un par y variar la posición y se hace necesario la aplicación de una caja reductora donde el fin más importante es la precisión de movimiento y no el tiempo de ejecución.

2.2. Técnicas de prototipado 3D

2.2.1. Prototipado FDM (*Fused Deposition Material*)

Este proceso consiste en la extrusión de material termo-plástico en estado de semifusión a través de una boquilla que deposita material capa a capa sobre una base sólida, esta base puede tener precalentamiento previo o no. La mayoría de impresoras 3D comerciales son FDM ya que los filamentos son muy comunes y tienen un precio asequible. Los materiales más utilizados son compuestos plásticos como ABS, PLA, PET, Nylon, entre otros. La temperatura de fusión puede variar de 60°C a 250°C aproximadamente y dependerá en función del material utilizado para la impresión.

La impresora que se utilizará durante el proyecto será de moldeo por deposición fundida (FDM) y más avanzado el proyecto se deberá escoger el material y la temperatura de fusión para realizar el conjunto de piezas diseñadas.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

2.2.2. Otras técnicas de prototipado actual

SLA (Estereolitografía)

Es un proceso de impresión 3D que permite crear piezas de plástico muy complejas de gran precisión. El proceso empieza con un baño de resinas acrílicas o epoxy, mediante la acción de un láser solidifica la parte superior de la cama de resinas creando una capa de material ya solidificado, el proceso se repite solidificando la resina capa a capa hasta obtener una pieza tridimensional.

SLS (Sinterizado Laser Selectivo)

El proceso de sinterizado en 3D se puede realizar con material plástico o metálico es un material granulado de pequeño tamaño en forma de polvo. Un rodillo añade una capa de material sinterizado que se solidifica mediante la acción de un haz láser,

En el caso de ser un material metálico el haz láser crea microsoldaduras que compactan la pieza tridimensional, luego este elemento impreso debe ser sometido a tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades mecánicas.

Tecnología PolyJet

El proceso de impresión PolyJet emplea la tecnología de inyección de tinta de alta resolución para producir piezas de forma rápida, económica, con elevada precisión y buen acabado superficial. La característica diferenciadora de este proceso de impresión 3D es la utilización de capas de fotopolímero líquido muy delgadas de 16 micras que son solidificadas mediante luz ultravioleta.

Permite construir modelos y prototipos con geometrías complejas y superficies lisas. Además permite la posible combinación de varios materiales, con distintos colores y durezas.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

3. Ensayo previo

Antes de poder pre-dimensionar una caja reductora se debe conocer los datos de transmisión en la entrada del sistema para poder definir y regular correctamente los datos de velocidad de salida. Durante este primer proceso del proyecto se harán distintos ensayos donde se concretará un motor y se explicará qué tipos de pruebas se harán para conocer estos datos de entrada como puede ser la potencia del motor par o velocidad de giro.

Para poder encontrar la potencia desarrollada por el motor a una carga determinada, se pensó en hacer un ensayo donde el motor debería levantar una masa de peso conocido y calcular el trabajo desarrollado a lo largo de un tiempo para así encontrar la potencia real transmitida del motor.

Para conseguir levantar el peso se pensó en diseñar un cilindro acoplado al eje del motor en el que unir una cuerda que levantaría la masa tal como se ilustra en la *Figura 2*.

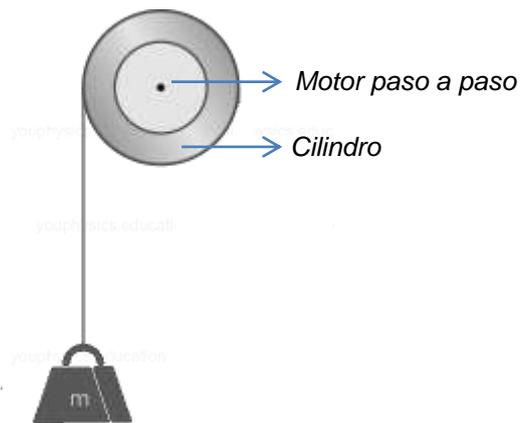


Figura 2: Esquema del ensayo

En los siguientes apartados se describirá el material utilizado para realizar el experimento así como también el proceso de diseño del cilindro y el estudio experimental realizado.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

3.1. Material y elementos del ensayo

Para realizar el ensayo se tuvo que adquirir el material necesario descrito a continuación.

El motor de corriente continua que ejercerá el par en el mecanismo será un motor paso a paso NEMA 17. Este motor paso a paso funciona con bobinas bipolares que van alternando su polaridad para realizar un paso. Estos motores se caracterizan por tener una alta precisión de giro, y es posible aumentar la precisión ya que pueden girar a 1/4 o 1/8 de paso si son controlados correctamente. El motor NEMA 17 tiene un ángulo de paso de $1,8^\circ$; para completar una vuelta de 360° mínimo necesita hacer 200 pasos.

Estos motores funcionan controlados por una placa Arduino UNO junto a un driver llamado CNC Shield V3, que es una placa especialmente diseñada para la conexión y el control de los motores paso a paso. En la *Figura 3* se puede observar las unidades utilizadas en el ensayo.



Figura 3: Motor NEMA 17 y CNC Shield V3

También es necesario un ordenador con el software de Arduino IDE, en el cual se escriben los códigos de control del motor, estos códigos son traspasados vía USB a la placa de Arduino UNO.

La placa Arduino conectada por USB proporciona un voltaje de 5V, que no es suficiente como para alimentar el motor NEMA 17, por lo tanto, también es necesaria una fuente continua que proporcione 12V para el uso de estos motores.

Además se necesitará diseñar e imprimir en 3D un cilindro acoplado al eje que sea capaz de levantar una masa mediante una cuerda.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

3.2. Diseño del cilindro

Para conseguir un ensayo correcto con resultados válidos el cilindro a diseñar debe de cumplir los siguientes requisitos:

El cilindro ira en un principio directamente conectado al eje del motor por lo que la cavidad de unión a diseñar debe de ser precisa, aunque se hará algo mayor contando las tolerancias de impresión $\pm 0,4\text{mm}$ aproximadamente.

Al ser una pieza de impresión 3D mediante FDM con moldeado por deposición fundida capa a capa si se le somete a una carga que va en la dirección de los mismos hilos puede llegar a fracturar la pieza, por lo tanto se harán cavidades donde irán emplazados unos tronillos que servirán como refuerzos para la estructura impresa.

El cilindro debe tener la masa uniformemente repartida, es decir si se diseñan cavidades internas para el refuerzo del cilindro deben ser simétricas y del mismo diámetro. Esto es fundamental ya que si no están las masas equilibradas en el cilindro los cálculos que se aplicarán no serán válidos.

Para comenzar a diseñar el cilindro se empezó por definir el diámetro exterior, por catálogo se sabe que el motor NEMA 17 tiene un par de arranque máximo de $0,59\text{ N}\cdot\text{m}$.

Se puede definir el par de fuerzas como el producto de la fuerza tangencial aplicada multiplicado por la distancia en ángulo recto del centro de masas al punto donde está aplicada el peso, esta distancia coincide con el radio del cilindro, que cumple la siguiente expresión.

$$T_{m\acute{a}x} = F_t \cdot r = m \cdot g \cdot D/2$$

Sabiendo el par de catálogo de arranque del motor y suponiendo que el mecanismo puede levantar una masa máxima de 3kg se puede aislar el diámetro de la ecuación anterior y definir un diámetro externo.

$$D_{ext} = \frac{T_{m\acute{a}x} \cdot 2}{m \cdot g} = \frac{0,59\text{ Nm} \cdot 2}{3\text{ kg} \cdot 9,8\text{ m/s}^2} = 0,04\text{m} = 40\text{mm}$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

El diseño se realiza en el software SolidWorks y se escoge el diámetro calculado de 40mm de diámetro exterior y se hace una extrusión de 48mm que equivaldrá a la altura del cilindro.

Al cilindro modelado se le practica un taladrado y se hacen agujeros pasantes lisos, ya que en impresión 3D no permite hacer rosca. Se ejecuta un agujero central donde se alojara el eje motor de 5mm y cuatro perforaciones más que servirán como refuerzos y se pondrán tornillos para reforzar la pieza. Además se incluye una perforación en el lateral del cilindro en el cual irá también un tornillo. El agujero lateral tendrá doble función; una primera de sujeción del eje del motor para que evitar que deslice en el interior y también será útil para acometer la sujeción de la cuerda.

Una vez completadas estas perforaciones queda un modelo en el software como se observa en la *Figura 4*. Para un mayor detalle geométrico de la pieza se puede consultar el Anexo el plano acotado de la pieza.

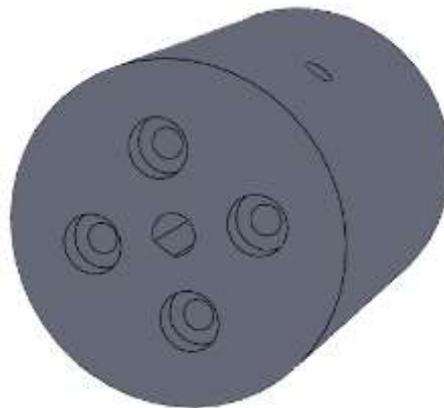


Figura 4: Cilindro diseñado en SolidWorks

El modelo de SolidWorks cumple con todos los requisitos impuestos al inicio de la etapa diseño, por lo tanto, se guarda el modelo en formato .STL y se crea el prototipo en la impresora 3D.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

3.3. Realización del ensayo.

En este apartado se describirá el procedimiento seguido en el laboratorio de electrónica hasta obtener los resultados de las pruebas realizadas

Para empezar con el ensayo se realiza el montaje básico del motor paso, primero se introduce el cilindro impreso en 3D en el eje del motor; el cilindro ya ha sido reforzado con ocho tronillos para soportar la carga colgante.

Una vez montado el conjunto motor-cilindro se procede a montar la parte de alimentación, primero se conecta la clavija del motor paso a paso al controlador CNC Shield V3 y la placa Arduino, es importante hacer este paso sin ningún elemento alimentado. El siguiente paso es alimentar la placa Arduino mediante un cable USB que va conectado al ordenador, este cable da un voltaje de 5V que hace funcionar la placa y el controlador, también a través de este cable se transfieren los programas de control del ordenador a la placa. Para acabar se debe hacer la conexión de los motores a través de la fuente continua regulable, es muy aconsejable antes de conectar los motores utilizar un multímetro para regular y asegurar que la fuente este realmente a 12 voltios y evitar sobretensiones o picos de intensidad al regularla.

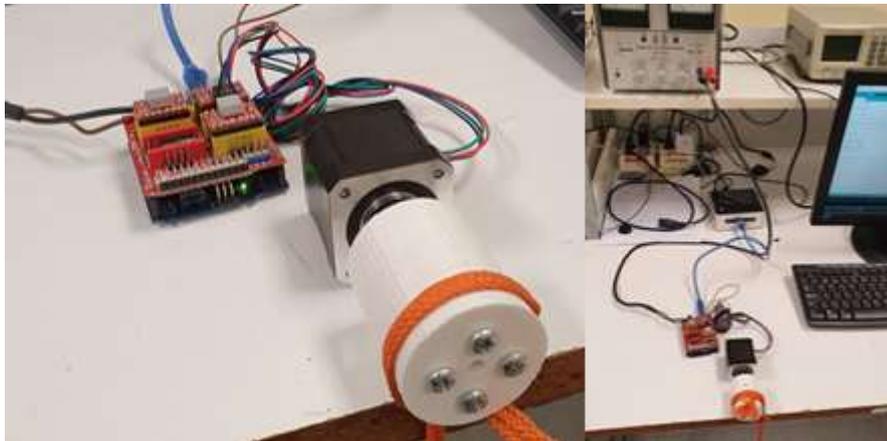


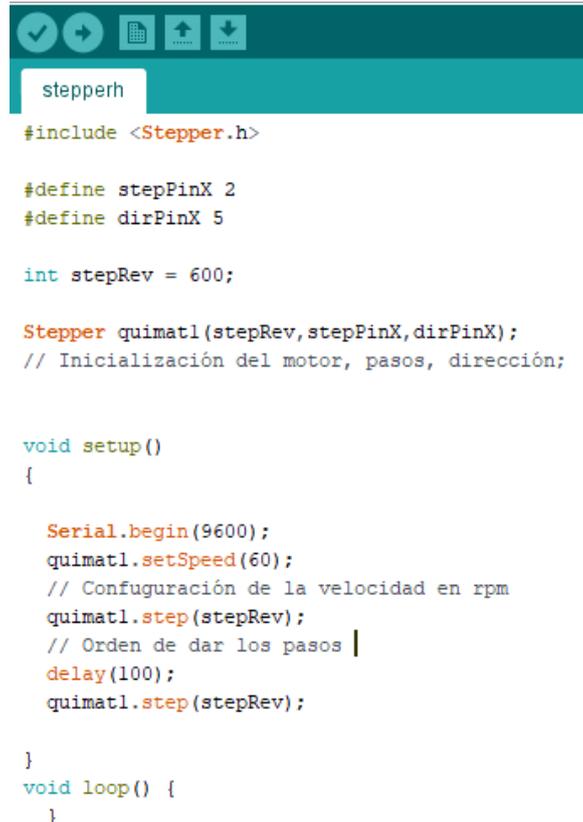
Figura 5: Montaje del motor-cilindro

El montaje ya acabado con todos los elementos ya conectados es el que se observa en la *Figura 5*.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Para hacer girar el motor NEMA 17 se necesita un programa de control, el software es Arduino IDE, este programa tiene una librería que incluye funciones especiales para el control de motores paso a paso llamada <Stepper.h>.

Con esta librería se hace un código básico para hacer girar el motor, el código se muestra en la *Figura 6*.



```
stepperh
#include <Stepper.h>

#define stepPinX 2
#define dirPinX 5

int stepRev = 600;

Stepper quimat1(stepRev, stepPinX, dirPinX);
// Inicialización del motor, pasos, dirección;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    quimat1.setSpeed(60);
    // Configuración de la velocidad en rpm
    quimat1.step(stepRev);
    // Orden de dar los pasos |
    delay(100);
    quimat1.step(stepRev);
}
void loop() {
}
```

Figura 6: Sketch de Arduino

Al poner en marcha en montaje se observa que el montaje sin carga en el eje motor el ensayo funciona perfectamente y gira los pasos indicados por el programa de Arduino.

Al insertar una carga colgante de 0,5 kg se observa que el motor comienza a vibrar y si se aumenta el peso el motor paso a paso no es capaz de levantar la carga debido a las grandes vibraciones producidas por el peso, por lo tanto el primer ensayo no es válido y no se pueden obtener resultados.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

3.4. Modificaciones en el ensayo.

Para conseguir realizar el ensayo se deben aplicar cambios de tal manera que el motor paso a paso tenga las vibraciones mínimas. Después de realizar el primer ensayo se observa que el motor produce una fuerte vibración debido a que tiene acoplada una carga vertical directamente acoplada al eje motor que está en posición horizontal. Esta carga vertical probablemente produce una pequeña desviación del eje respecto las bobinas bipolares y hace que el paso del motor no se produzca correctamente y el motor vibre.

Para un correcto funcionamiento se debe evitar tener un momento flector sobre el eje del motor, para que el motor pueda entregar solamente par torsor al cilindro. La solución pensada es hacer que el eje motor sea pasante al cilindro diseñado y en cada extremo del cilindro poner un rodamiento con apoyos que garantice que tan solo el motor entrega par torsor, evitando así las vibraciones.

El eje del motor paso a paso tiene una longitud de tan solo 22mm, y el cilindro diseñado es de 48mm de longitud, por lo tanto no es posible que pueda ser pasante el eje motor ya que la longitud del eje es insuficiente y se descarta hacer otro cilindro de tamaño más reducido ya que se tendría que diseñar un cilindro nuevo sin ser necesario.

La solución que se propone es prolongar el eje del motor mediante una pieza intermedia diseñada que pueda unir el eje del motor con un nuevo eje de mayor longitud y mismo diámetro.



Figura 7: Unión entre ejes diseñado en CAD

La pieza de unión de eje diseñada de la *Figura 7* es un cilindro con una cavidad interior y dos agujeros en el lateral del cilindro uno para collar el eje del motor y otro para el nuevo cilindro de extensión, que al collar en ambos extremos girarán solidariamente.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

También se diseñan en CAD unos soportes que serán alojados en ambos extremos del cilindro, estos soportes tiene una cavidad cilíndrica interior para albergar el rodamiento, estos soportes serán claves para hacer que el eje motor no absorba los momentos flectores de la carga vertical y así reducir la vibración. El diseño del soporte descrito, y el ensamblaje del ensayo modificado antes descrito se muestran a continuación en la *Figura 8*:

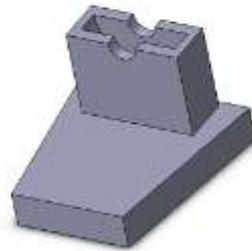


Figura 8: Soporte de rodamiento diseñado en CAD

A partir de las piezas diseñadas se hace un ensamblaje en CAD reflejado en la Figura 9 y se simula el montaje del ensayo con las modificaciones propuestas.

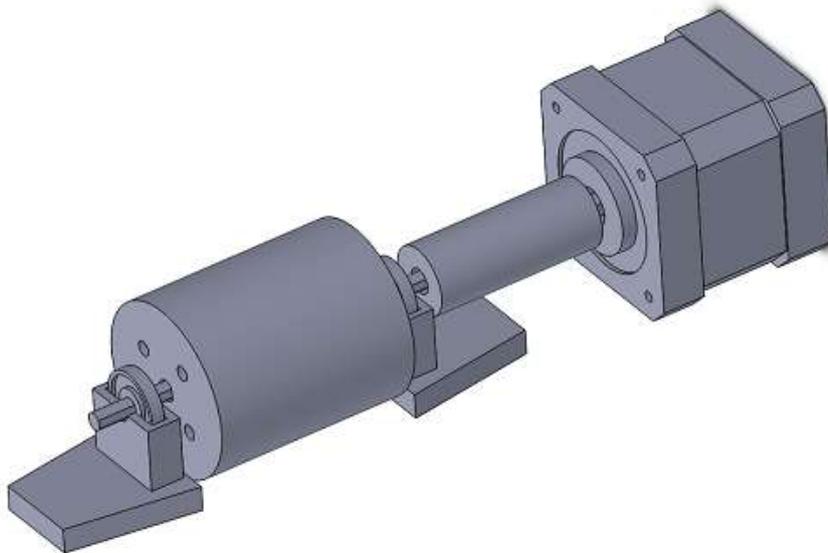


Figura 9: Ensamblaje CAD del ensayo modificado

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

4. Predimensionado de la caja reductora

El objetivo de esta fase del proyecto es valorar las distintas distribuciones de trenes de engranajes posibles que cumplan con los requisitos básicos de ingeniería impuestos y escoger entre las opciones desarrolladas la mejor solución.

Antes de empezar con la fase de cálculo y diseño es imprescindible definir correctamente el número de dientes y el tamaño de cada rueda dentada, y que tipo de engranaje emplear en cada caso.

Los trenes a dimensionar deben cumplir con los siguientes requisitos básicos:

Caja reductora con un índice de reducción $i=20$. La reducción se ejecutará en dos o tres etapas. Se decide fijar la reducción mínimo en dos etapas antes de hacer ningún cálculo ya que la reducción en una etapa puede hacer que la relación de tamaño entre los engranajes sea demasiado grande y cree problemas ya sea por el tamaño o las vibraciones, más de tres etapas de reducción también se descarta ya que se tendrían demasiados componentes y no es necesario para este tipo de reducción.

El tamaño máximo de la caja de reducción debe de ser de 20x20cm, y en el caso de los engranajes la superficie que deben ocupar 15x15cm como máximo que son las dimensiones del área máxima de impresión o la cama de las impresoras 3D, ya que se quiere hacer el soporte y la carcasa de la caja de una pieza en la impresora 3D. En consecuencia se deberán diseñar unas ruedas dentadas que no sobrepasen estas medidas límite especificadas.

4.1 Cálculo de velocidades y datos de generación

Los prediseños propuestos se compondrán de trenes dentados con la siguiente relación de velocidades y distribución; en el caso de un sistema con dos trenes actuará un primer tren compuesto por los engranajes A y B con entrada en A con un número de dientes Z_A y que gira a velocidad w_1 , este engranará con una rueda dentada Z_B que gira a w_2 , mediante un mismo eje se unen la rueda dentada B con la C. El segundo tren se compone de las ruedas C y D donde Z_C engrana con Z_D , en este eje se encuentra el eje de salida de la caja reductora con la velocidad de salida w_4 .

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Las relaciones de velocidades expresadas de forma matemática son las siguientes:

$$w_1 \cdot z_A = w_2 \cdot z_B ; \quad w_3 = w_2 ; \quad w_3 \cdot z_C = w_4 \cdot z_D$$

Despejando entre las ecuaciones entre pares de trenes se puede encontrar la relación de velocidades de entrada y salida:

$$w_2 = \frac{w_1 \cdot z_A}{z_B} \quad y \quad w_2 = w_3 ; \quad w_3 \cdot z_C = w_4 \cdot z_D \quad \rightarrow \quad \frac{w_1 \cdot z_A}{z_B} \cdot z_C = w_4 \cdot z_D$$

$$\mu = \frac{w_4}{w_1} = \frac{z_A}{z_B} \cdot \frac{z_C}{z_D} = \frac{1}{20} ; \quad i = \frac{1}{\mu} = 20$$

Con esta relación de transmisión es posible hacer unos primeros cálculos de relación de dientes y tamaños de radios de generación de los engranajes. Los radios de generación de un engranaje que son calculados mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{1}{2} \cdot m \cdot z ; \quad 2\pi R = z \cdot p \quad \rightarrow \quad m = \frac{p}{\pi} = \frac{2 \cdot R}{z}$$

Donde m es el módulo del engranaje, el módulo de un engranaje es una forma de expresar el paso p que permite simplificar los cálculos en engranajes. Para calcular el radio de generación es necesario escoger un módulo que será el que defina el paso entre dientes.

Los módulos están normalizados por la ANSI en la tabla UNI 3521, consultar en el **Anexo 1.1: Módulos Normalizados UNI**. Entre los módulos normalizados de la tabla se decide escoger un módulo $m = [2mm - 1,5mm]$. Se escoge este rango de módulos porque es el más adecuado y además es común en engranajes, escoger un módulo más grande supondría un paso mayor y por lo tanto un radio primitivo más elevado haciendo que las dimensiones aumenten, en cambio un módulo más pequeño haría que el espesor del diente sea menor por lo tanto obtener dientes y engranajes más frágiles y además con un módulo pequeño se necesitara una gran precisión a la hora de imprimir los engranajes ya que las tolerancias de la impresora 3D podrían influir en el acabado de la pieza final.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

4.2. Esquemas de distribución de engranajes

Con el módulo de 2mm y la relación de transmisión de 1/20 ya definidos se crean posibles configuraciones de engranajes:

$$\frac{w_4}{w_1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} = \frac{7}{28} \cdot \frac{7}{35} = \frac{1}{20} \quad R_A = R_C = 7mm; \quad R_B = 28mm; \quad R_D = 35mm$$

La relación de dientes mínimos más equilibrada de reducción es $\mu_1=1/4$ y $\mu_2=1/5$ pero no es posible de aplicar ya que no se puede hacer una rueda dentada de un diente así que se buscan múltiples de estos número. Escogidos los dientes es sencillo calcular los radios primitivos de cada engranaje, a partir de este radio se pueden estimar unas dimensiones del tren de engranajes del que se extrae un esquema de engranajes que se observa en la *Figura 10*:

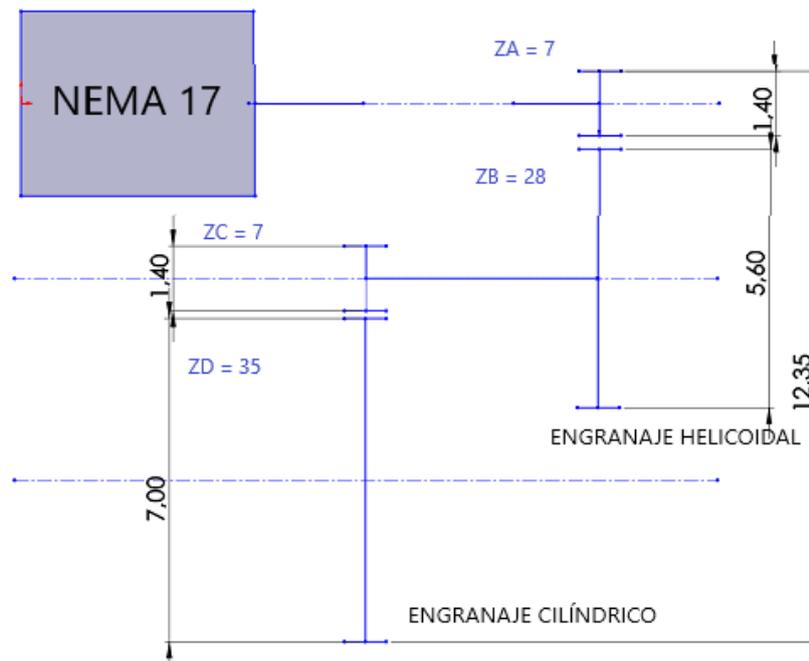


Figura 10: Esquema de engranaje de dos etapas

Las ventajas de esta distribución es que se aplican dos trenes de engranajes con ejes paralelos, además se tiene el eje de entrada alineado con el eje del motor paso a paso cosa que proporciona una mayor estabilidad lo que reduce la vibración y asegurará el buen funcionamiento del sistema, además respeta las medidas límite exigidas. El gran inconveniente es que se necesitan unas ruedas de pequeño tamaño con un reducido número de dientes; el mínimo número de dientes por rueda debería ser 14 dientes.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Se propone otro tren de engranajes a partir de un engranaje sinfín donde se busca una distribución alternativa que cumpla con las especificaciones requeridas.

$$\frac{w_4}{w_1} = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{10} \cdot \frac{8}{16} = \frac{1}{20} \quad R_B = 10 \text{ mm}; \quad R_C = 8 \text{ mm}; \quad R_D = 16 \text{ mm}$$

Cada vuelta que gira el motor el engranaje sinfín ejecuta un paso así que se consigue una gran reducción, en el caso de un motor convencional se podría aplicar directamente el engranaje sinfín con una rueda dentada de 20 dientes pero en este caso se ha adherido un segundo par de engranajes para hacer un sistema de reducción de doble etapa y compararlo con el anterior, en la *Figura 11* se observa el esquema del sistema propuesto:

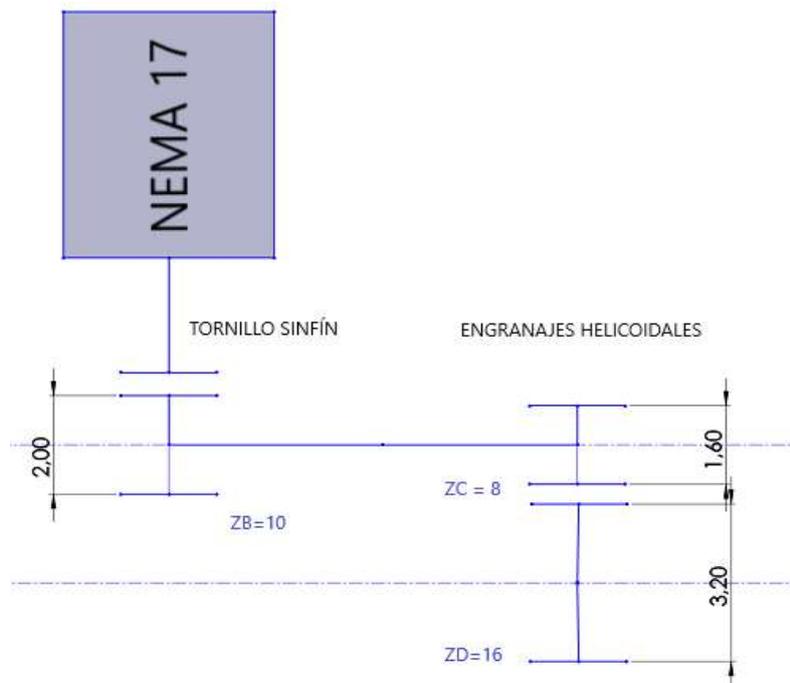


Figura 11: Esquema de engranaje con tronillo sinfín

Como principal ventaja es que este sistema es más compacto, con unas dimensiones mucho más reducidas que el anterior y es un sistema muy simple. El principal inconveniente está en la eficiencia de la transmisión, tenemos ejes perpendiculares si se produce vibración en el motor puede provocar mala transmisión o incluso el atasco de los engranajes entre el husillo y la rueda dentada, por lo tanto se prefiere no poner ejes perpendiculares para la aplicación de esta caja reductora.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Con las dos primeras propuestas de diseño se obtienen distribuciones válidas matemáticamente pero que no son válidas constructivamente a la hora de ejecutarlo con una impresora 3D. Se necesita obtener unas ruedas que tengan como mínimo 14 dientes debido a que un menor número de dientes puede provocar problemas durante el engrane, además se desea que el radio de generación sea mayor a 15mm para crear una cavidad suficientemente gruesa como para que pueda alojar un eje pasante por la rueda.

Para solucionar esta problemática primero se decide bajar el módulo a 1,5mm, pero no es suficiente como para cumplir con estos requisitos mínimos, así que se decide hacer una caja reductora de tres etapas compuesta por tres trenes dentados que mantenga el índice de reducción $i=20$.

$$\frac{w_4}{w_1} = \frac{z_A}{z_B} \cdot \frac{z_C}{z_D} \cdot \frac{z_E}{z_F} = \frac{1}{20}$$

Se decide mejorar la propuesta de la *Figura 10* y adaptarlo al caso de tres pares de engranajes y un módulo reducido. Al tener esta configuración se buscan unas relaciones de transmisión más suaves para mejorar la eficiencia del reductor. Se decide poner un primer tren helicoidal y dos trenes cilíndricos, que para simplificar tanto cálculos como diseño se decide que los dos trenes cilíndricos sean completamente iguales.

$$\frac{w_4}{w_1} = \frac{z_A}{z_B} \cdot \frac{z_C}{z_D} \cdot \frac{z_{C2}}{z_{D2}} = \frac{5}{16} \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} = \frac{1}{20}$$

Se deciden estas relaciones de transmisión ya que son las óptimas, se consigue una relación de reducción elevada entre trenes que proporcionan multiplicados entre sí el índice de reducción total de la caja reductora $i=20$, en el caso del tren helicoidal $i=3.2$ y los dos pares cilíndricos $i=2.5$. A partir de la relación de transmisión se definen los dientes de cada tren y se escogen múltiplos que cumplan con el número mínimo de dientes fijados, con estos datos se calcula el radio generatriz de cada engranaje.

$$\frac{w_4}{w_1} = \frac{z_A}{z_B} \cdot \frac{z_C}{z_D} \cdot \frac{z_{C2}}{z_{D2}} = \frac{20}{64} \cdot \frac{24}{60} \cdot \frac{24}{60} = \frac{1}{20}$$

$$R_A = 15 \text{ mm}; \quad R_B = 48 \text{ mm}; \quad R_{C1} = R_{C2} = 18 \text{ mm}; \quad R_D = R_{D2} = 45 \text{ mm}$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

El esquema de engranajes definitivo de la solución propuesta es el que se muestra en la *Figura 12*:

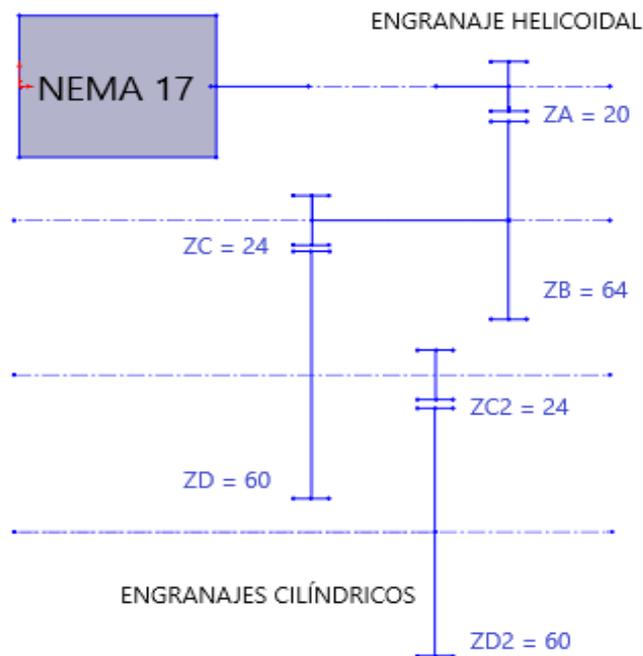


Figura 12: Esquema de engranaje de tres etapas

El esquema de engranajes presentado es muy similar al primer esquema propuesto, tan solo se ha añadido un tren cilíndrico que añade un nuevo eje y hace modificar la salida de la caja reductora que ahora se encuentra en el engranaje D2.

Como se observa a pesar de reducir el módulo, los radios de generación de las ruedas dentadas han aumentado considerablemente, por lo tanto no es posible que dimensionalmente cumplir con los requisitos límite de 15x15 centímetros, por lo tanto se debe buscar una solución para poder mantener las dimensiones de los dientes calculados.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Para solucionar el aspecto dimensional, se recurre a optimizar el espacio teniendo en cuenta el eje Z por lo tanto se jugará también con la altura de la caja reductora.

Se decide hacer un sistema de trenes compuestos con ejes a dos alturas como el que se observa en la *Figura 13*:

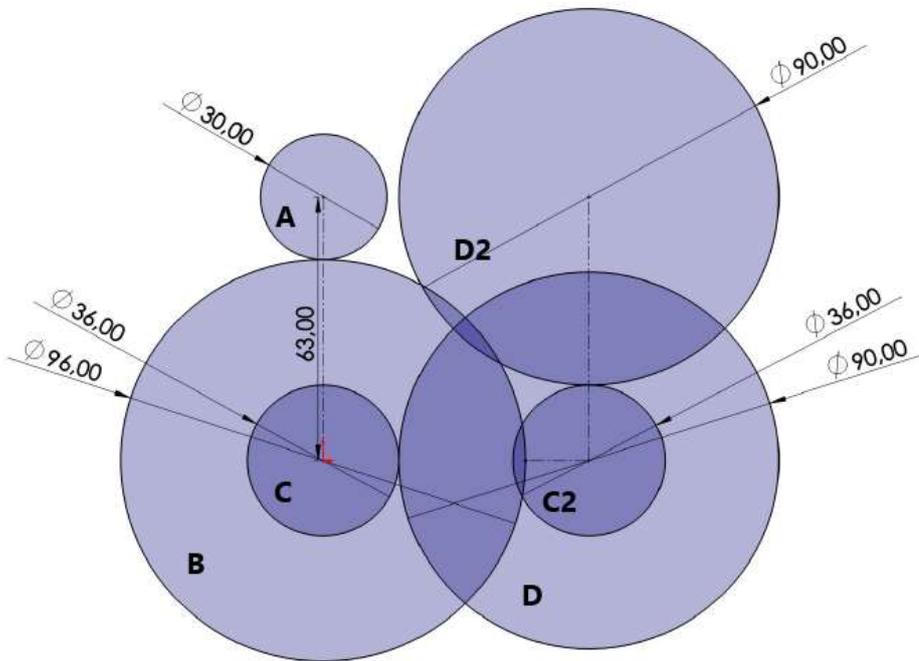


Figura 13: Esquema de distribución de trenes definitivo

La solución de distribución de trenes propuesta definitiva constará de cuatro ejes, dos de ellos estarán en la parte superior y los dos restantes en la parte inferior. En el eje superior se albergará el eje de entrada donde se encontrará el motor paso a paso y el engranaje A. Se ha diseñado la distribución de tal forma que la entrada y la salida del reductor (engranaje D2 y A) queden alineados en el eje superior, por lo tanto, los dos ejes superiores estarán una misma altura. En los ejes inferiores están alojadas las ruedas dentadas con eje común que son las de mayor volumen y peso. Con la distribución propuesta se consigue una distancia entre los cuatro ejes de 63 mm y una longitud y altura total de 156mm.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

5. Cálculo de engranajes y ejes

En esta fase del proyecto se calcularán los parámetros básicos de los engranajes que permitirán diseñar cada uno de los engranajes escogidos en la fase de predimensionado. Además del cálculo se incluirá una parte teórica dónde se explicará conceptualmente cada uno de los parámetros calculados para poder seguir los cálculos desarrollados durante este apartado.

5.1 Engranajes cilíndricos rectos

Para el cálculo de los engranajes cilíndricos se parte de los valores iniciales calculados durante el prediseñado, estos valores también son conocidos como datos de generación que son los siguientes:

$$m = 1.5 \text{ mm}; z_c = 24; z_D = 60 \quad \alpha = 20^\circ; \Delta v = 63.6 \text{ mm}; \mu = \frac{22}{60} = \frac{2}{5}; i = 2.5$$

$$R_c = \frac{z_c \cdot m}{2} = \frac{24 \cdot 1.5}{2} = 18 \text{ mm} \quad \varnothing_c = 36 \text{ mm}$$

$$R_D = \frac{z_D \cdot m}{2} = \frac{60 \cdot 1.5}{2} = 45 \text{ mm} \quad \varnothing_D = 90 \text{ mm}$$

Donde se han añadido el parámetro alfa (α) que es el ángulo de presión de generación entre las ruedas base que se suele establecer entre 15 y 20° ; y el parámetro (Δv) es la distancia entre centros o ejes, en el cual se deja un cierto margen entre radios de generación para que haya juego entre dientes.

A partir de estos datos de generación se pueden calcular los parámetros intrínsecos de una rueda dentada, que son aquellos datos que no varían y son independientes a las condiciones de funcionamiento durante el engrane. Los primeros parámetros intrínsecos a calcular son el radio de base y el paso de base que se pueden visualizar en el esquema de la *Figura 14*:

$$Rb_c = R_c \cdot \cos \alpha = 18 \cdot \cos 20 = 16.91 \text{ mm}$$

$$Rb_D = R_D \cdot \cos \alpha = 45 \cdot \cos 20 = 42.29 \text{ mm}$$

$$pb = p \cdot \cos \alpha = 1.5 \cdot \pi \cdot \cos 20 = 4.43 \text{ mm}$$

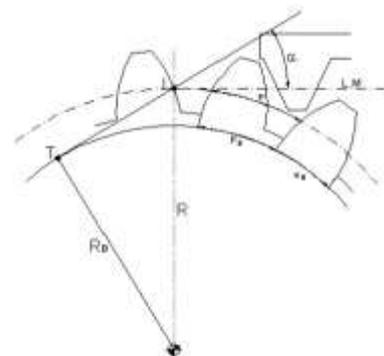


Figura 14: Esquema de parámetros intrínsecos

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Al imponer una distancia entre centros que no es la suma de los radios de generación $\Delta v \neq R_C + R_D$, el ángulo de presión de funcionamiento de las ruedas dentadas (α_v) no será igual al ángulo de presión de generación, por lo tanto se calcula este nuevo ángulo mediante la expresión:

$$\Delta v = \frac{(R_C + R_D) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha_v} \rightarrow 63.6 = \frac{(18 + 45) \cdot \cos 20}{\cos \alpha_v}$$

$$\cos \alpha_v = 0.9308; \quad \alpha_v = 21.44^\circ$$

Los parámetros calculados se pueden observar en la *Figura 15*. Con el ángulo de funcionamiento se puede calcular el radio axoide de funcionamiento que determinara el radio donde engranará cada rueda.

$$\Delta v = R'_C + R'_D = 18.16 + 45.44 = 63.6 \text{ mm}$$

$$R'_C = \frac{R b_C}{\cos \alpha_v} = \frac{(R_C) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha_v} = \frac{16.91}{0.9308} = 18.16 \text{ mm}$$

$$R'_D = \frac{R b_D}{\cos \alpha_v} = \frac{(R_D) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha_v} = \frac{42.29}{0.9308} = 45.44 \text{ mm}$$

En trenes con engrane sin holgura se produce que la cabeza del diente de una rueda se puede encontrar demasiado cerca del fondo entre dientes y provocar apuntamiento, para evitar esta problemática se aplican desplazamientos (v) en las dos ruedas que acortan ligeramente los radios de cabeza de los engranajes para favorecer un correcto funcionamiento. Primeramente se debe calcular el desplazamiento límite (v_{lim}) de la rueda dentada más pequeña, ya que no se puede rebajar en exceso el radio de cabeza sino también crearía problemas de engrane.

$$v_{lim} = a_{co} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot z_c \cdot \sin^2 \alpha = 1,5 - 0.5 \cdot 1.5 \cdot 24 \cdot \sin^2 20 = -0.605 \text{ mm}$$

Se escogerá un desplazamiento superior al valor obtenido en el caso límite para la rueda dentada C.

$$v_c = -0.1 \text{ mm}$$

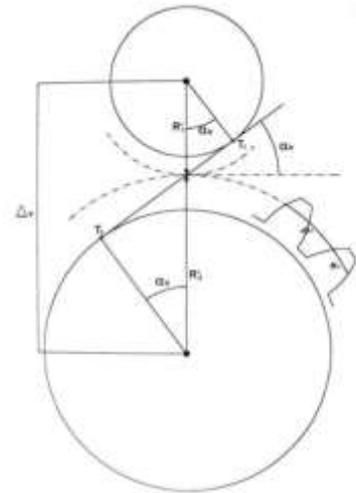


Figura 15: Condiciones de funcionamiento

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

El perfil de diente de engranaje tiene forma de envolvente, por lo tanto en cálculos donde se vea afectado el perfil del diente como puede ser el desplazamiento se hará uso en el cálculo de la función envolvente: $ev(\theta) = \tan(\theta) - \theta$

Para comprender lo explicado se puede observar el engrane entre ruedas con perfil envolvente y los desplazamientos implicados en la *Figura 16*.

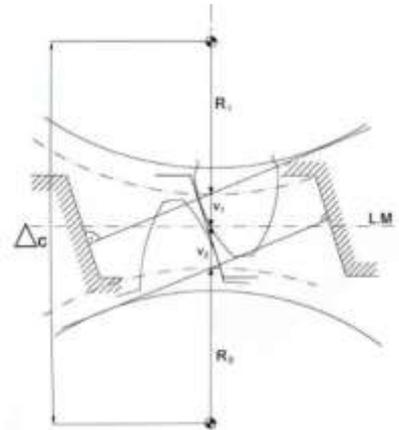


Figura 16: Esquema de desplazamientos

El desplazamiento en la rueda dentada C provoca un desplazamiento en la rueda D que debe ser calculado:

$$ev \alpha_v = ev \alpha + \frac{(v_C + v_D)}{(R_C + R_D)} \cdot tg \alpha \rightarrow ev 21.44 = ev 20 + \frac{(-0.1 + v_D)}{(18 + 45)} \cdot tg 20$$

$$0.018485 = 0.014904 + \frac{(-0.1 + v_D)}{63} \cdot tg 20 \rightarrow v_D = 0.720 \text{ mm}$$

Para el cálculo de la función envolvente no es necesario utilizar la función, hay manuales especializados de engranajes con valores tabulados de la envolvente en función del ángulo, este documento se puede encontrar en el **Anexo 1.2 Función envolvente**.

Calculados los parámetros intrínsecos y los de funcionamiento, ahora es posible calcular los parámetros de diseño, que serán aquellos datos fundamentales para poder hacer un modelo en software CAD. Se comenzará calculando el radio de cabeza (R_c) del diente del engranaje.

$$R_c = R + v + a_{po}; \quad a_{po} = m = 1.5 \text{ mm}$$

$$R_{c_c} = 18 - 0.1 + 1.5 = 19.4 \text{ mm}$$

$$R_{c_D} = 45 + 0.72 + 1.5 = 47.2 \text{ mm}$$

El parámetro a_{po} es la altura de cabeza de diente que es equivalente al valor del módulo. Como se ha explicado anteriormente el desplazamiento calculado influye en el valor de radio de cabeza.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

El radio de pie (R_p) es el valor que define el punto del flanco del diente donde empieza su perfil de evolvente, que se calcula mediante la expresión:

$$R_p = \sqrt{R^2 \cdot \cos^2 \alpha + \left(R \operatorname{sen} \alpha - \frac{a_{co} - v}{\operatorname{sen} \alpha}\right)^2}$$

$$R_{p_c} = \sqrt{18^2 \cdot \cos^2(20) + \left(18 \operatorname{sen}(20) - \frac{1.5 + 0.1}{\operatorname{sen}(20)}\right)^2} = \sqrt{286.1 + 2.2}$$

$$R_{p_c} = 16.98 \text{ mm}$$

$$R_{p_D} = \sqrt{45^2 \cdot \cos^2(20) + \left(45 \operatorname{sen}(20) - \frac{1.5 - 0.72}{\operatorname{sen}(20)}\right)^2} = \sqrt{1788.1 + 171.9}$$

$$R_{p_D} = 44.27 \text{ mm}$$

El radio de fondo (R_f) es el valor que define la longitud donde está ubicado el pie del diente que es calculado mediante la siguiente expresión:

$$R_f = R + v - a_{co} - f; \quad f = f_f \cdot m$$

$$R_{f_c} = 18 - 0.1 - 1.5 - 0.25 \cdot 1.5 = 16.03 \text{ mm}$$

$$R_{f_D} = 45 + 0.72 - 1.5 - 0.25 \cdot 1.5 = 43.84 \text{ mm}$$

Con el radio de cabeza, radio de pie y radio de fondo es suficiente como para definir el engranaje por completo. Otro aspecto a calcular es el espesor del diente en la base (e_b) del engranaje.

$$e_b = m \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x \cdot \tan(\alpha) + z \cdot \operatorname{ev}(\alpha)\right)$$

$$e_{bC} = 1.5 \cdot \cos(20) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \frac{-0.1}{1.5} \cdot \tan(20) + 24 \cdot \operatorname{ev}(20)\right) \rightarrow e_{bC} = 2.65 \text{ mm}$$

$$e_{bD} = 1.5 \cdot \cos(20) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \frac{0.72}{1.5} \cdot \tan(20) + 60 \cdot \operatorname{ev}(20)\right) \rightarrow e_{bD} = 3.96 \text{ mm}$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Es fundamental para el posterior diseño calcular también los ángulos comprendidos en distancias como el paso angular (θ_p) o el ángulo de espesor del círculo base (θ_{e_b}).

$$\theta_p = \frac{360^\circ}{z} \rightarrow \theta_{p_c} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ; \quad \theta_{p_D} = \frac{360^\circ}{60} = 6^\circ$$

$$\theta_{e_b} = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{e_b}{R_b} \rightarrow \theta_{e_b C} = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{2.65}{18} = 8.43^\circ; \quad \theta_{e_b D} = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{3.96}{45} = 5.04^\circ$$

Para generar un perfil envolvente en un software CAD no es posible poner la función directamente y que automáticamente te dibuje la curva, se deben calcular los puntos X e Y de la curva envolvente y después introducirlos en el CAD. A continuación se hará el cálculo de estos puntos de la curva envolvente para los casos de la rueda dentada C y D.

Para comenzar a calcular el perfil envolvente del diente son necesarios los ángulos de alfa pie (α_p) y alfa cabeza (α_c) que son los ángulos de presión mínimo y máximo respectivamente del diente del engranaje. Para el caso de la rueda dentada C: $R_{b_c} = 16.91 \text{ mm}$; $R_{c_c} = 19.4 \text{ mm}$; $R_{p_c} = 16.98 \text{ mm}$;

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \left(\arccos \frac{16.91}{16.98} \right) = 4.99^\circ; \quad \alpha_c = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \left(\arccos \frac{16.91}{19.4} \right) = 29.32^\circ;$$

Para el cálculo de la función evolvente se trabaja en radianes y luego se pasa a grados, a continuación se mostrará el proceso de cálculo del primer punto X/Y de la curva envolvente. El primer punto a calcular es el punto en el pie del diente del engranaje con $\alpha_p = 4.99^\circ = 0.08717 \text{ rad}$.

$$ev(\theta) = \tan(\theta) - \theta = \tan(0.08717) - 0.08717 = 2,2146 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 0.01269^\circ$$

El módulo vector (N) del primer punto se calcula con la siguiente expresión

$$N_1 = \frac{R_b}{\cos(\theta)} = \frac{16.91}{\cos(0.08717 \text{ rad})} = 16,9789$$

$$x_1 = N_1 \cdot \cos(ev(\theta)) = 16.9789 \cdot \cos(0.01269^\circ) \rightarrow x_1 = 16.9789 \text{ mm}$$

$$y_1 = N_1 \cdot \sin(ev(\theta)) = 16.9789 \cdot \sin(0.01269^\circ) \rightarrow y_1 = 0.0038 \text{ mm}$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Para conseguir una curva bien definida se deciden hacer 30 puntos(n) de la curva envolvente que estarán comprendidos entre los ángulos α_p y α_c , con esto se puede calcular el incremento de ángulo ($\Delta\alpha$):

$$\Delta\alpha = \frac{(\alpha_c - \alpha_p)}{(n - 1)} = \frac{29.32 - 4.99}{30 - 1} = 0.8388^\circ$$

El proceso explicado para el cálculo de los puntos X/Y se repite n veces en una hoja Excel aplicando el incremento de ángulo $\Delta\alpha$ en cada punto, con lo que se obtiene la curva completa del perfil envolvente del diente del engranaje.

Para el engranaje C se obtiene los siguientes puntos X, Y en la *Tabla 1*:

Tabla 1: Puntos de perfil envolvente en el engranaje C

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		fi (deg)	fi (rad)	ev fi	ev fi (deg)	N	X	Y
3	1	4,99479424	0,08717561	0,00022151	0,01269137	16,9789428	16,9789	0,0038
4	2	5,83366965	0,10181674	0,0003533	0,02024248	17,0025206	17,0025	0,0060
5	3	6,67254506	0,11645788	0,00052936	0,03032988	17,0298197	17,0298	0,0090
6	4	7,51142047	0,13109902	0,00075626	0,04333072	17,0608695	17,0609	0,0129
7	5	8,35029588	0,14574016	0,00104069	0,05962728	17,0957041	17,0957	0,0178
8	6	9,18917129	0,16038129	0,00138942	0,07960762	17,1343616	17,1343	0,0238
9	7	10,0280467	0,17502243	0,00180932	0,10366631	17,1768847	17,1769	0,0311
10	8	10,8669221	0,18966357	0,00230742	0,13220523	17,2233206	17,2233	0,0397
11	9	11,7057975	0,20430471	0,00289086	0,16563429	17,2737211	17,2736	0,0499
12	10	12,5446729	0,21894585	0,00356697	0,20437223	17,3281427	17,3280	0,0618
13	11	13,3835483	0,23358698	0,00434321	0,24884753	17,3866471	17,3865	0,0755
14	12	14,2224237	0,24822812	0,00522725	0,2994992	17,449301	17,4491	0,0912
15	13	15,0612992	0,26286926	0,00622695	0,3567778	17,5161764	17,5158	0,1091
16	14	15,9001746	0,2775104	0,00735039	0,4211463	17,5873509	17,5869	0,1293
17	15	16,73905	0,29215154	0,00860589	0,49308119	17,6629078	17,6623	0,1520
18	16	17,5779254	0,30679267	0,01000202	0,57307352	17,7429365	17,7420	0,1775
19	17	18,4168008	0,32143381	0,01154762	0,66163003	17,8275325	17,8263	0,2059
20	18	19,2556762	0,33607495	0,01325184	0,75927438	17,9167982	17,9152	0,2374
21	19	20,0945516	0,35071609	0,01512412	0,8665484	18,0108425	18,0088	0,2724
22	20	20,933427	0,36535723	0,01717428	0,9840135	18,1097818	18,1071	0,3110
23	21	21,7723024	0,37999836	0,01941246	1,11225205	18,2137399	18,2103	0,3536
24	22	22,6111778	0,3946395	0,02184924	1,25186898	18,3228488	18,3185	0,4003
25	23	23,4500532	0,40928064	0,02449558	1,40349343	18,4372488	18,4317	0,4516
26	24	24,2889287	0,42392178	0,02736293	1,56778049	18,5570892	18,5501	0,5077
27	25	25,1278041	0,43856291	0,03046321	1,74541311	18,6825286	18,6739	0,5690
28	26	25,9666795	0,45320405	0,03380885	1,93710416	18,8137358	18,8030	0,6359
29	27	26,8055549	0,46784519	0,03741285	2,14359856	18,95089	18,9376	0,7088
30	28	27,6444303	0,48248633	0,04128883	2,36567572	19,0941817	19,0779	0,7882
31	29	28,4833057	0,49712747	0,04545103	2,60415198	19,2438133	19,2239	0,8743
32	30	29,3221811	0,5117686	0,04991438	2,85988344	19,4	19,3758	0,9679

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

A partir de los puntos de la *Tabla 1* se puede extraer un gráfica del perfil envolvente del diente C.

Para el engranaje D no se pueden insertar los mismos valores de perfil envolvente así que se hace el mismo proceso cálculo de nuevo pero con los valores obtenidos en el engranaje D.

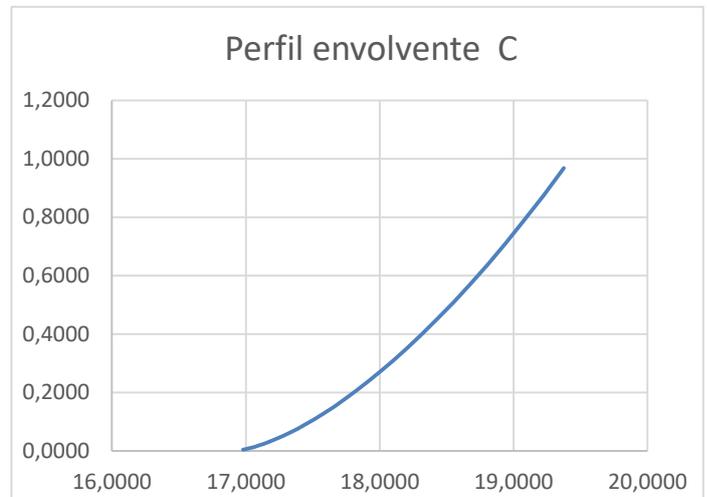


Figura 17: Gráfica perfil envolvente engranaje C

Con el mismo Excel utilizado anteriormente se calculan la *Tabla 2* de puntos X,Y y la gráfica de perfil envolvente para el engranaje D:

Tabla 2: Puntos de perfil envolvente en el engranaje D

X	Y
44,2699	0,4160
44,3465	0,4408
44,4247	0,4667
44,5045	0,4936
44,5859	0,5216
44,6690	0,5508
44,7537	0,5811
44,8401	0,6126
44,9282	0,6454
45,0180	0,6794
45,1095	0,7148
45,2026	0,7515
45,2976	0,7895
45,3942	0,8290
45,4927	0,8699
45,5929	0,9124
45,6948	0,9563
45,7986	1,0019
45,9042	1,0490
46,0117	1,0978
46,1209	1,1483
46,2321	1,2006
46,3451	1,2546
46,4600	1,3105
46,5768	1,3683
46,6955	1,4281
46,8161	1,4898
46,9387	1,5536
47,0633	1,6195
47,1898	1,6876

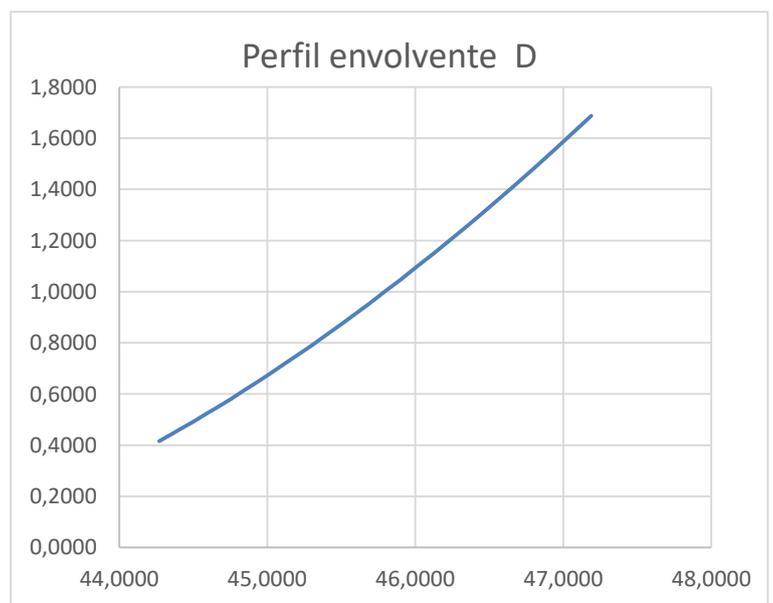


Figura 18: Gráfica perfil envolvente engranaje D

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

5.2. Engranajes cilíndricos helicoidales

En el cálculo de engranajes cilíndricos helicoidales el proceso de cálculo es similar al descrito en engranajes cilíndricos rectos, aunque en este apartado se describirán más profundamente aquellos cálculos y parámetros nuevos para el caso helicoidal.

Para comenzar se partirá con los datos iniciales obtenidos en el Predimensionado del cual se extrajeron los siguientes datos de generación:

$$m = 1.5 \text{ mm}; z_A = 20; z_B = 64 \quad \alpha = 20^\circ; \beta_\alpha = 21^\circ; \Delta v = 67.6 \text{ mm};$$

$$\mu = \frac{20}{64} = \frac{5}{16}; i = 3.2$$

A diferencia de los engranajes cilíndricos rectos los helicoidales tienen un ángulo en dirección al eje de la rueda que se simboliza como β , este ángulo es el que le otorga la forma helicoidal al engranaje.

Los dientes de las ruedas helicoidales tendrán un perfil envolvente, pero que con el ángulo de giro helicoidal β se ve modificado, por lo tanto el perfil envolvente es una superposición de perfiles envolventes rectos que giran un cierto ángulo β_r como se muestra en la *Figura 19*:



Figura 19: Generación del perfil helicoidal

El ángulo final de la rueda helicoidal se llama (β_r) ángulo de inclinación real o normal, respecto el radio base. Este es el ángulo con el cual se diseña la rueda helicoidal, pero no es posible hacer cálculos correctos debido a que el perfil envolvente va girando.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Para conseguir unos cálculos válidos para el perfil envolvente se puede calcular mediante con un solo perfil de superposición, emulando un engranaje cilíndrico recto, a partir del ángulo de inclinación frontal o aparente (β_a) respecto al radio de generación. Por lo tanto el primer paso para realizar los cálculos es conseguir los parámetros frontales, estos serán indicados con el subíndice a :

$$m_a = \frac{m}{\cos \beta_a} = \frac{1.5}{\cos(21)} = 1.607 \text{ mm}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_a = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta_a} = \frac{\operatorname{tg}(20)}{\cos(21)} = 0.398 \rightarrow \alpha_a = 21.3^\circ$$

Se ha fijado un ángulo de inclinación frontal (β_a) y la relación para encontrar el ángulo de inclinación real (β_r) es la siguiente:

$$\operatorname{tg} \beta_r = \operatorname{tg} \beta_a \cdot \cos \alpha_a = \operatorname{tg}(21.3) \cdot \cos(21.3) = 0.363 \rightarrow \beta_r = 19.96^\circ$$

A partir de los parámetros frontales calculados se pueden deducir los radios de generación y radio base de las ruedas helicoidales A y B, además de los ángulos de presión de funcionamiento (α_{va}).

$$R_A = \frac{z_A \cdot m_a}{2} = \frac{20 \cdot 1.607}{2} = 16.07 \text{ mm} \quad \varnothing_c = 32.2 \text{ mm}$$

$$R_B = \frac{z_B \cdot m_a}{2} = \frac{64 \cdot 1.607}{2} = 51.42 \text{ mm} \quad \varnothing_D = 102.8 \text{ mm}$$

$$Rb_A = R_A \cdot \cos \alpha_a = 16.1 \cdot \cos(21.3) = 15.00 \text{ mm}$$

$$Rb_B = R_B \cdot \cos \alpha_a = 51.4 \cdot \cos(21.3) = 47.88 \text{ mm}$$

$$\Delta v = \frac{(R_A + R_B) \cdot \cos \alpha_a}{\cos \alpha_{va}} \rightarrow 67.6 = \frac{(16.1 + 51.4) \cdot \cos 21.3}{\cos \alpha_{va}}$$

$$\cos \alpha_v = 0.9302; \quad \alpha_{va} = 21.54^\circ$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Para concluir con los parámetros de funcionamiento se calculan los radios axoides de funcionamiento de las ruedas A y B:

$$\Delta v = R'_A + R'_B = 16.15 + 51.45 = 67.6 \text{ mm}$$

$$R'_A = \frac{Rb_A}{\cos\alpha_{va}} = \frac{(R_A) \cdot \cos\alpha_a}{\cos\alpha_v} = \frac{15.00}{0.9302} = 16.15 \text{ mm}$$

$$R'_B = \frac{Rb_B}{\cos\alpha_{va}} = \frac{(R_B) \cdot \cos\alpha_a}{\cos\alpha_v} = \frac{47.88}{0.9302} = 51.45 \text{ mm}$$

También se calcularán los desplazamientos necesarios en cada rueda, en el caso de la rueda dentada B que es la de mayor tamaño se fija el desplazamiento como si estuviera tallada al cero, ya que un desplazamiento pequeño no supondrá una diferencia notable en el engranaje.

$$v_B = 0 \rightarrow \textit{tallada a cero}$$

$$ev \alpha_{va} = ev \alpha_a + \frac{(v_B + v_A)}{(R_B + R_A)} \cdot tg\alpha_a \rightarrow ev 21.54 = ev 21.3 + \frac{(0 + v_A)}{(16.1 + 51.4)} \cdot tg 21.3$$

$$0.018755 = 0.018129 + \frac{v_A}{67.8} \cdot tg 21.3 \rightarrow v_A = 0.1 \text{ mm}$$

Con los desplazamientos calculados es posible calcular el resto de parámetros intrínsecos restantes como son el radio de pie, radio de fondo y radio de cabeza de ambos engranajes.

$$Rc = R + v + a_{po}$$

$$a_{po} = m = 1.5 \text{ mm}$$

$$Rc_A = 16.07 + 0.1 + 1.5 = 17.67 \text{ mm}$$

$$Rc_B = 51.42 + 0 + 1.5 = 52.92 \text{ mm}$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

$$Rp = \sqrt{R^2 \cdot \cos^2 \alpha_a + \left(R \operatorname{sen} \alpha_a - \frac{a_{co} - v}{\operatorname{sen} \alpha_a} \right)^2}$$

$$Rp_A = \sqrt{16.1^2 \cdot \cos^2(21.3) + \left(16.1 \operatorname{sen}(21.3) - \frac{1.5 - 0.1}{\operatorname{sen}(21.3)} \right)^2} = \sqrt{225.00 + 3.97}$$

$$Rp_A = 15.10 \text{ mm}$$

$$Rp_B = \sqrt{51.4^2 \cdot \cos^2(21.3) + \left(51.4 \operatorname{sen}(21.3) - \frac{1.5 - 0}{\operatorname{sen}(21.3)} \right)^2} = \sqrt{2293.35 + 211.46}$$

$$Rp_B = 50.06 \text{ mm}$$

$$Rf = R + v - a_{co} - f; \quad f = f_f \cdot m$$

$$Rf_A = 16.1 + 0.1 - 1.5 - 0.25 \cdot 1.5 = 14.29 \text{ mm}$$

$$Rf_B = 51.4 + 0 - 1.5 - 0.25 \cdot 1.5 = 49.54 \text{ mm}$$

Se deben de calcular también el espesor de base para poder calcular posteriormente los ángulos de espesor base y el paso angular.

$$e_bA = 1.61 \cdot \cos(21.3) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \frac{0.1}{1.5} \cdot \tan(21.3) + 20 \cdot \operatorname{ev}(21.3) \right) \rightarrow e_bA = 2.96 \text{ mm}$$

$$e_bB = 1.61 \cdot \cos(21.3) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \frac{0}{1.5} \cdot \tan(21.3) + 64 \cdot \operatorname{ev}(21.3) \right) \rightarrow e_bB = 4.09 \text{ mm}$$

$$\theta_p = \frac{360^\circ}{z} \rightarrow \theta_{pA} = \frac{360^\circ}{20} = 18^\circ; \quad \theta_{pB} = \frac{360^\circ}{64} = 5.63^\circ$$

$$\theta_{e_b} = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{e_b}{R_B} \rightarrow \theta_{e_bA} = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{2.65}{18} = 11.36^\circ; \quad \theta_{e_bB} = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \frac{3.96}{45} = 4.88^\circ$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Para finalizar los cálculos se calculan los perfiles envolventes de A y B utilizando el mismo método de cálculo y completándolo con el mismo Excel utilizado para los engranajes rectos, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 3: Puntos de perfil envolvente en los engranajes A y B respectivamente

X	Y	X	Y
15,1004	0,0116	50,0611	0,4430
15,1316	0,0160	50,1370	0,4670
15,1663	0,0214	50,2145	0,4920
15,2044	0,0279	50,2933	0,5179
15,2461	0,0358	50,3737	0,5447
15,2913	0,0450	50,4555	0,5726
15,3402	0,0557	50,5388	0,6015
15,3927	0,0681	50,6236	0,6314
15,4489	0,0823	50,7100	0,6624
15,5089	0,0985	50,7978	0,6945
15,5728	0,1167	50,8872	0,7278
15,6406	0,1373	50,9781	0,7622
15,7123	0,1604	51,0706	0,7977
15,7882	0,1862	51,1646	0,8345
15,8681	0,2148	51,2602	0,8725
15,9523	0,2465	51,3574	0,9118
16,0408	0,2815	51,4561	0,9524
16,1337	0,3202	51,5565	0,9943
16,2311	0,3626	51,6585	1,0376
16,3331	0,4092	51,7621	1,0823
16,4398	0,4603	51,8674	1,1284
16,5512	0,5160	51,9743	1,1759
16,6676	0,5769	52,0828	1,2250
16,7889	0,6433	52,1931	1,2757
16,9154	0,7155	52,3050	1,3278
17,0470	0,7940	52,4186	1,3817
17,1840	0,8793	52,5340	1,4371
17,3263	0,9719	52,6510	1,4943
17,4742	1,0723	52,7698	1,5532
17,6277	1,1811	52,8903	1,6138

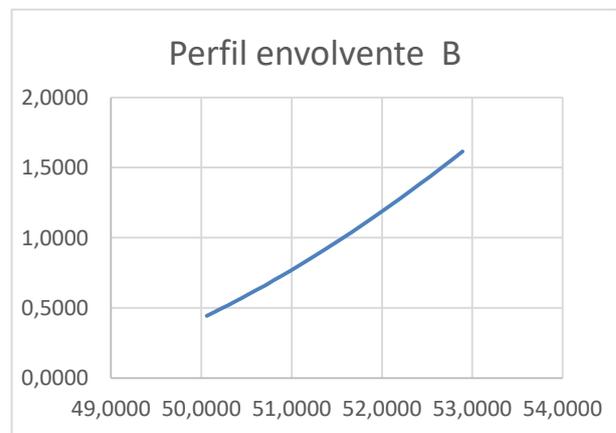
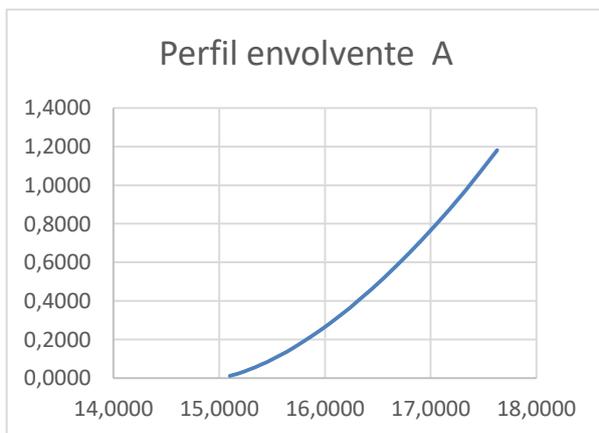


Figura 20: Gráficas de perfil envolvente de los engranajes A y B

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

5.3 Cálculo de ejes

Para ejecutar un buen diseño es necesario que los ejes de la caja reductora sean los adecuados y puedan ser capaces de soportar el par torsor en cada etapa de la reducción.

Par el cálculo se supone que se hará girar el motor paso a paso que entregará un par de 0.59 N·m a la entrada. A partir de las relaciones de reducción y estos datos iniciales es posible calcular el par torsor en cada eje si se supone que no hay pérdidas.

$$T_{Eje\ 1} = T_{Motor} = 0.59\ N \cdot m$$

$$T_{Eje\ 2} = T_{Motor} \cdot i_1 = 0.59 \cdot 3.2 = 1.89\ N \cdot m$$

$$T_{Eje\ 3} = T_{Eje\ 2} \cdot i_2 = 1.89 \cdot 2.5 = 4.72\ N \cdot m$$

$$T_{Eje\ 4} = T_{Salida} = 4.72 \cdot 2.5 = 11.8\ N \cdot m$$

Para calcular las dimensiones del diámetro de eje se toman los valores de par en cada eje y se comprueba la deflexión torsional máxima producida por un momento torsor en una sección circular que viene dado por la siguiente expresión:

$$\frac{\theta}{L} = \frac{32 \cdot T_i}{\pi \cdot d^4 \cdot G} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot T_i}{\pi \cdot G \cdot \frac{\theta}{L}}} = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot T_i}{\pi \cdot 81 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2} \cdot 0.01745\ rad/m}}$$

El eje a montar será de acero como se observa en el módulo de elasticidad (G), la deflexión torsional máxima elegida será 1°/m debido al bajo par de entrada, con estos parámetros se calculan los diámetros mínimos de eje necesarios:

$$d_{Eje\ 1} = 8mm ; d_{Eje\ 2} = 11mm ; d_{Eje\ 3} = 13mm ; d_{Eje\ 4} = 17mm ;$$

A partir de los diámetros mínimos se elige un diámetro de eje normalizado próximo al calculado, el diámetro normalizado debe ser superior al mínimo calculado:

$$d_{Eje\ 1} = 12mm ; d_{Eje\ 2} = 14mm ; d_{Eje\ 3} = 14mm ; d_{Eje\ 4} = 18mm$$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6. Diseño CAD del conjunto caja reductora

En esta fase del proyecto se concretará el diseño íntegro de la caja reductora mediante el software CAD SolidWorks. Se diseñarán los engranajes mediante los datos calculados del apartado anterior y se hará una explicación detallada de los pasos seguidos para conseguir el diseño final, el mismo proceso se repetirá para cada uno de los elementos diseñados de la caja reductora.

En estos apartados se harán mención en las figuras de dimensiones y distintos detalles, para aclarar cualquier duda en cuanto a la geometría se recomienda consultar los planos en el **Anexo 3: Planos Caja Reductora**.

6.1 Diseño CAD de engranajes

6.1.1 Diseño de engranajes cilíndricos rectos

Los engranajes que a continuación se van a diseñar son la ruedas dentadas cilíndricas rectas que corresponden a las ruedas C y C2, D y D2 nombrados y esquematizados en la *Figura 13*. Antes de comenzar con el diseño en CAD del engranaje se hará una tabla resumen con los parámetros indispensables para el diseño que fueron calculados en el apartado anterior.

Tabla 4: Parámetros de diseño de engranajes cilíndricos rectos

Parámetros		Engranaje C	Engranaje D
Radio de cabeza	R_c	19.40 mm	47.22 mm
Radio de pie	R_p	16.98 mm	44.27 mm
Radio de fondo	R_f	16.03 mm	43.85 mm
Espesor de base	e_b	2.65 mm	3.97 mm
Paso angular	θ_p	15°	6°
Ángulo espesor diente base	θ_{e_b}	8.976°	5.375°

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

En el software SolidWorks se generan las circunferencias y los ángulos a partir los datos calculados de la *Tabla 4*, en el caso del engranaje C se obtienen un croquis como se muestra en la *Figura 21*:

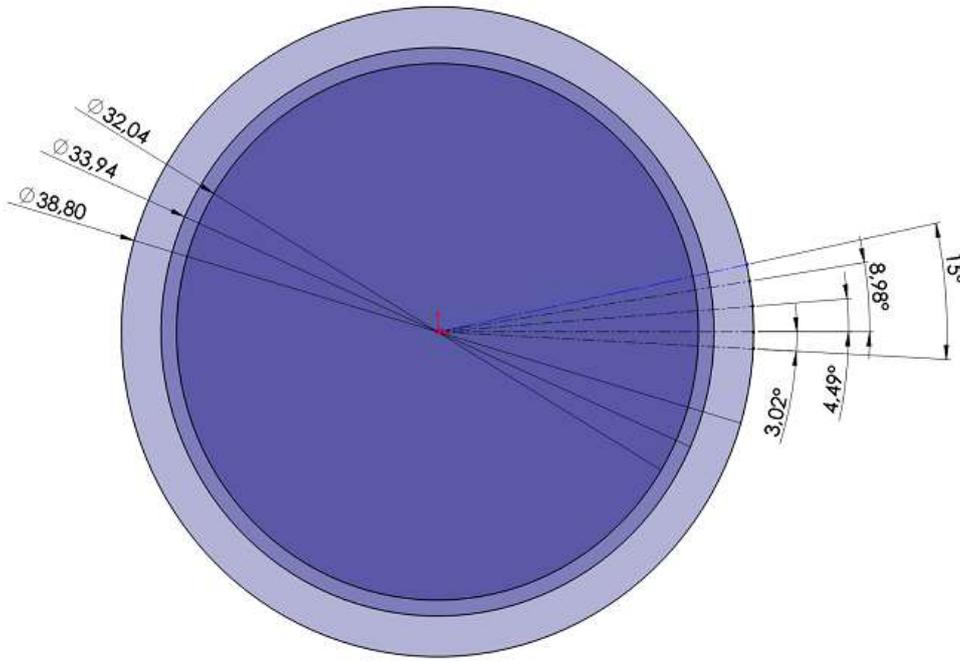
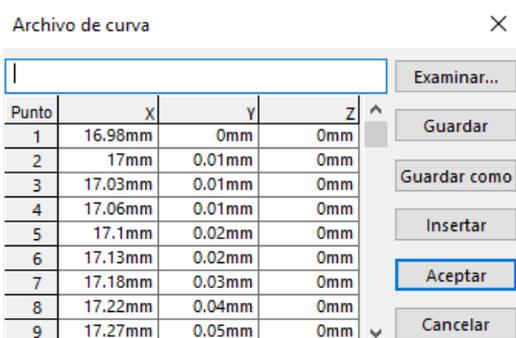


Figura 21: Diseño CAD de ángulos y circunferencias de engranaje

Los ángulos creados mediante líneas de construcción serán fundamentales a la hora de hacer simetrías para crear la totalidad de dientes y los diferentes radios crearán el límite de cada etapa del diente.

El siguiente paso es crear el perfil envolvente en CAD, para conseguir esta curva se deben tomar los datos de la *Tabla 1* en el caso del engranaje C. En SolidWorks para crear la curva de debe ir a:



× Insertar - Curva - Curva por puntos XYZ

Para obtener los puntos directamente se debe exportar los datos de Excel a texto .txt y se examina la nota de texto. Al insertar como se muestra en la *Figura 22* el archivo de texto con los puntos X,Y,Z la curva se genera automáticamente.

Figura 22: Introducción de datos en curva XYZ

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Al generar la curva en Solidworks se recomienda hacer una Spline con puntos coincidentes resiguiendo la curva por puntos XYZ creada, ya que con la Spline es posible hacer simetrias y mover la curva al punto deseado. Al finalizar el dibujo si los ángulos y puntos del X,Y del perfil envolvente estan corectamente calculados se obtiene una curva que es coincidente con el radio de pie y y finaliza en el radio de cabeza como se observa en la *Figura 23*.

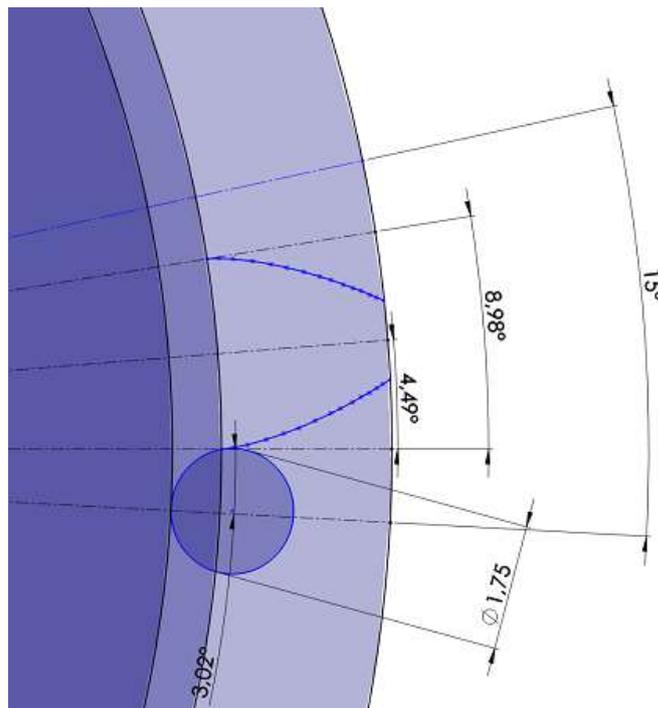


Figura 23: Diseño CAD del perfil evolvente

Para hacer el pie o fondo del diente de engranaje se dibuja una circunferencia tangente al radio de fondo y tangente a la curva envolvente en el radio de pie.

Completado estos pasos se tiene ya un diente al completo, tan solo queda hacer una simetria circular e indicar en cuantas particiones se quiere hacer la simetria. Las particiones elegidas para hacer la simetria y completar el engranaje seran igual al número de deintes que tenga cada rueda. Se recortan la partes sobrantes del dibujo del croquis y se extruye la pieza resultante que es el enganaje en CAD.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Se repite el mismo procedimiento para el engranaje D y se hace el diseño con sus respectivos datos, en la *Figura 24* se pueden observar los diseños de los engranajes C y D ya completados.

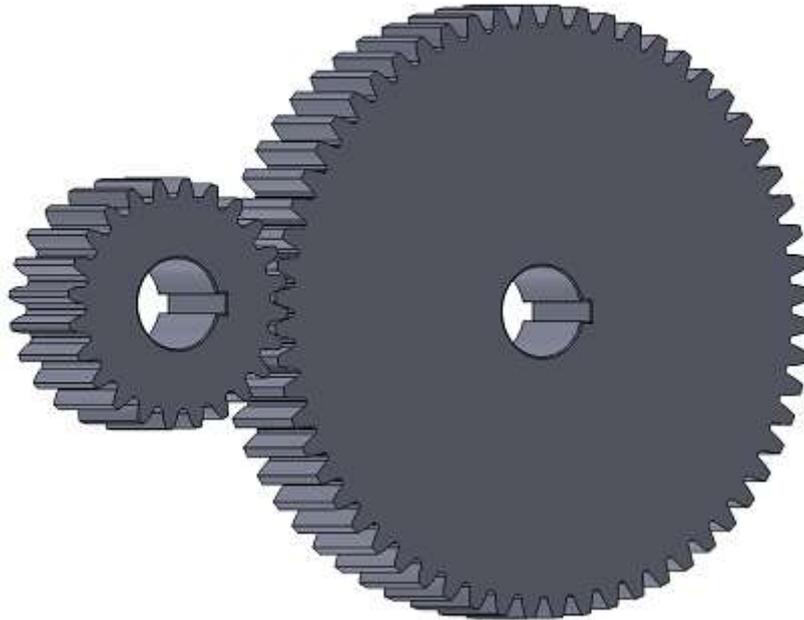


Figura 24: Diseño CAD de los engranajes C & D

En la figura ya se ve el engranaje completamente acabado, donde se ha realizado el corte para alojar el eje, el proceso de la selección de cada eje y chaveta será explicado más adelante.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.1.2 Diseño de engranajes cilíndricos helicoidales

Los engranajes que a continuación se van a diseñar son la ruedas dentadas cilíndricas rectas que corresponden a las ruedas A y B nombrados y esquematizados en la *Figura 13*.

Al igual que con los engranajes cilíndricos rectos se hará una tabla resumen con los parámetros calculados más importantes a la hora de desarrollar el diseño en CAD

Tabla 5: Parámetros de diseño de engranajes cilíndricos helicoidales

Parámetros		Engranaje A	Engranaje B
Radio de cabeza	R_c	17.67 mm	52.92 mm
Radio de pie	R_p	15.10 mm	50.06 mm
Radio de fondo	R_f	14.29 mm	49.54 mm
Ángulo de inclinación real	β_r	19.96°	19.96°
Paso angular	θ_p	18°	5.625°
Ángulo espesor diente base	θ_{e_b}	11.36°	4.88°

A continuación se explicará el proceso de diseño de los engranajes helicoidales que es muy similar al explicado en engranajes cilíndrico rectos en cuanto a diseño del croquis, pero con un diferente conformado en CAD.

La diferencia principal es que el primer paso de diseño en CAD es la extrusión de la circunferencia de radio de cabeza que es la de mayor tamaño. Por lo tanto, el diseño se hace a partir de una figura en tres dimensiones.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

En una cara del cilindro extruido con el diámetro de cabeza del engranaje A se ejecuta el croquis donde se dibujará el radio de fondo, el radio de pie y el perfil envolvente calculado, en la *Figura 25* se muestra el cilindro con los parámetros ya dibujados en el croquis:

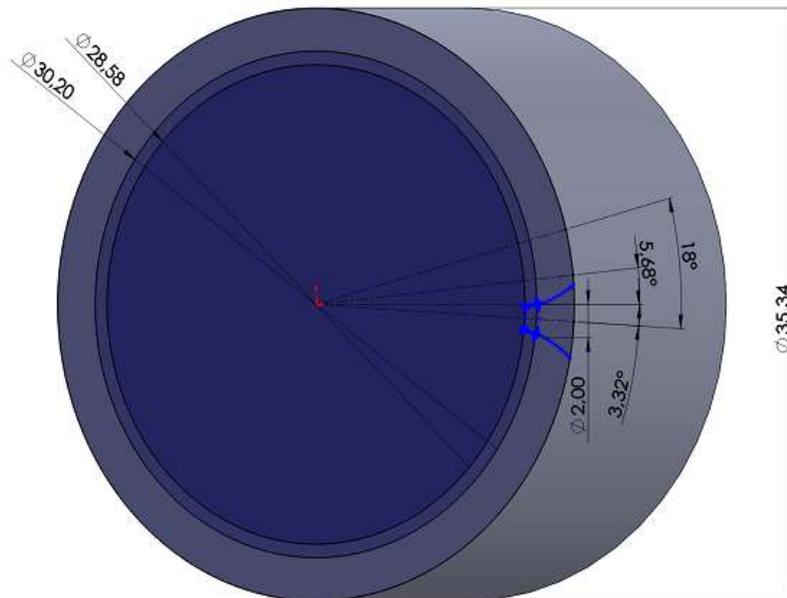
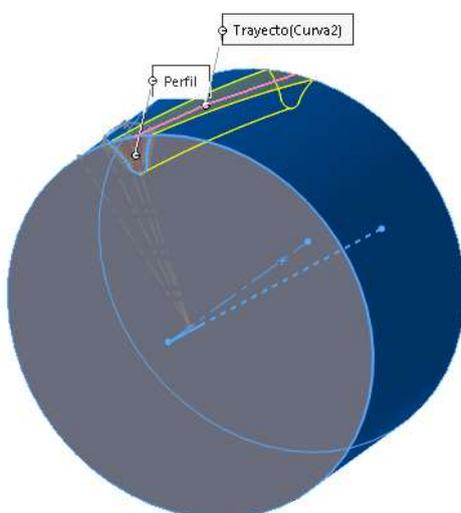


Figura 25: Diseño croquis de engranaje helicoidal

Como se observa en la *Figura 25* no se ha hecho el perfil de simetría del diente sino la simetría del perfil de hendidura del diente, donde se va a realizar un corte de barrido con la forma helicoidal.



Para realizar correctamente el corte helicoidal, primeramente se debe dibujar el ángulo de inclinación real. En el centro del cilindro se dibuja una línea auxiliar y una segunda línea con el ángulo β_r . Acto seguido mediante el comando de proyección de líneas se proyecta la línea dibujada en la superficie del cilindro creando una curva con ángulo β_r . A partir de la curva proyectada y la superficie de la hendidura se crea el corte por barrido del engranaje helicoidal, ver *Figura 26*.

Figura 26: Corte helicoidal

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Con la primera hendidura de diente realizada se pueden crear simetrías y completar el resto de engranaje A helicoidal. Para el engranaje B se sigue el mismo procedimiento pero hay que poner especial atención en el ángulo de inclinación real β_r que debe ser el mismo pero de signo contrario, es decir s el engranaje A $\beta_r = 19,96^\circ$; en el engranaje B $\beta_r = -19,96^\circ$ para cumplir con las condiciones de engrane de las ruedas helicoidales.

Acabados los engranajes A y B se obtiene el siguiente resultado mostrado en la *Figura 27*:

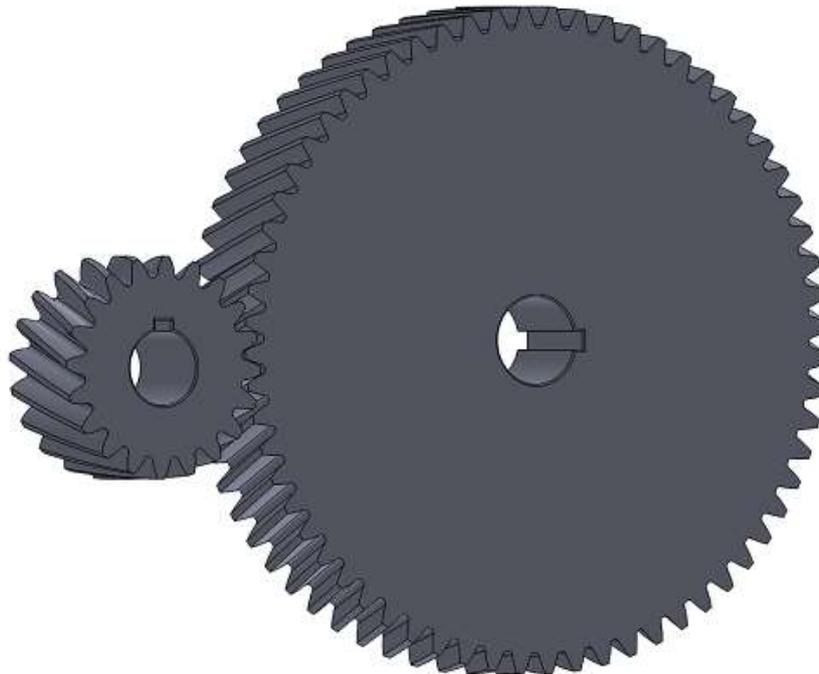


Figura 27: Diseño CAD de los engranajes A & B

En este caso también se presentan los engranajes definitivos con la perforación necesaria para la introducción del eje y la chaveta.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.2. Diseño CAD de ejes

Los ejes son una parte esencial de la caja reductora y al igual que los engranajes se ejecutará un diseño a medida para cada eje y para esta aplicación. El diseño se hará a partir de los primeros cálculos realizados en el apartado anterior donde se eligió un tamaño de eje normalizado que servirá de referencia.

Los ejes que se implementaran en la caja reductora serán personalizados para cada caso ya que cada eje tendrá una distribución y unos elementos acoplados distintos y con distinta geometría. Los ejes no están pensados para ser fabricados en impresoras 3D ya que para el eje se prefiere un material metálico con mayor resistencia como es el acero, por lo tanto, para la fabricación de los ejes de acero será mediante mecanizados por torneado y fresado.

Antes de ejecutar el diseño de ejes es necesario tener claro la distribución de los engranajes para evitar interferencias entre ruedas dentadas y ejes que no deben tener contacto entre sí, ya que es un diseño muy compacto y que tiene el espacio muy optimizado.

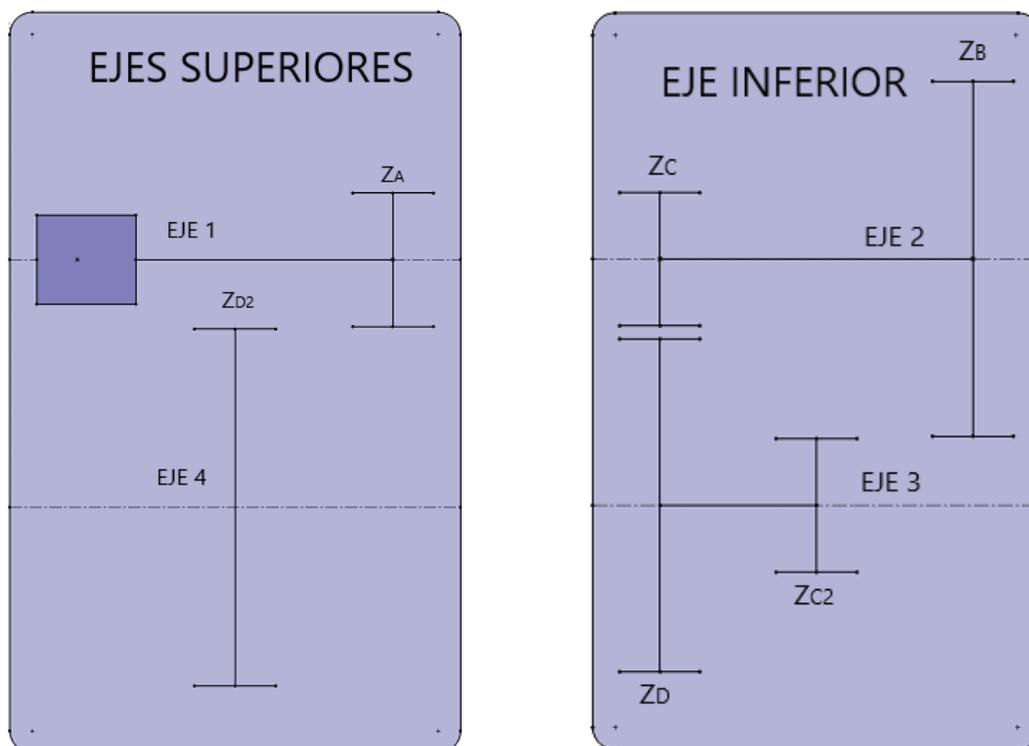


Figura 28: Esquema de ejes en caja reductora

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

A partir de la *Figura 28* se puede observar el esquema de las dos plantas que componen la caja reductora, la parte inferior se compone de los ejes compuestos por dos ruedas dentadas y en la parte superior se aloja los ejes de entrada y salida. Como se muestra en la *Figura 13* por dimensiones las ruedas Z_B y Z_{C2} pueden crear interferencias entre sí, por lo tanto, para hacer el diseño viable se decide desplazar la rueda Z_{C2} hacia el centro en el Eje 3, al calcular las distancias entre ejes se tuvo en cuenta el tamaño de los engranajes adyacentes para evitar el contacto engranaje con su eje más próximo.

Teniendo clara la distribución básica de los ejes, el diseño comenzará con el diseño del eje de entrada (Eje 1), para evitar errores en la construcción en CAD a partir de este eje de entrada se diseñaran el resto de los ejes en el que será un proceso sucesivo, se necesitará el Eje 2 para construir el Eje 3 y así hasta construir el eje de salida 4.

6.2.1. Diseño del Eje 1

Para diseñar un eje eficiente se deben añadir elementos como rodamientos para conseguir unas pérdidas mínimas en el giro. Para favorecer la transmisión del par del eje a la rueda dentada se deben alojar chavetas y en el eje diseñar alojamientos llamados chaveteras. Para evitar el movimiento horizontal de las ruedas dentadas debido a fuerza axiales producidas por el engrane se hará un tope en una banda y en el otro se insertará una arandela resorte ondulada, esta arandela al ser ondulada absorbe pequeños esfuerzos axiales, ya que actúa como un muelle debido a su forma ondulada.

Para el eje 1 a partir de los cálculos realizados anteriormente se decidió poner un diámetro de eje de 12mm para alojar el engranaje Z_A . A partir de este dato se escogen el resto de elementos enumerados anteriormente mediante el catálogo de los propios fabricantes, donde a continuación se describen los datos básicos útiles para el diseño:

- Rodamiento SKF Mod. 619/8

Diámetro interior $d=8mm$; Diámetro exterior $D=19mm$; Anchura $B=6mm$

- Arandelas Resorte Onduladas SpringMakers Mod. M10LE4613

Diámetro interior $D_i=10.5mm$; Diámetro exterior $D_y=15.5mm$; Anchura $L_o=2mm$

- Chaveta OPAC DIN6885/1 Mod. 51A-3-3-12

Longitud $L=12mm$ Base=3 mm Anchura $B=3mm$

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Con los datos geométricos de anchura y diámetro interior de cada elemento es posible diseñar las distintas secciones del eje. Para completar la información de las dimensiones de diseño es posible visualizar todos los parámetros y los materiales utilizados en los catálogos disponibles en el **Anexo 2: Catálogos y especificaciones del material**.

En el Eje 1 se produce la transmisión del par proporcionado por el motor paso a paso, por lo tanto, se debe diseñar un eje donde acoplar el eje motor con el eje de la caja reductora. A partir de todos los datos recopilados se crea el eje de entrada que se muestra en la *Figura 29*:



Figura 29: Diseño CAD Eje 1

Como se observa para transmitir el par transmitido del motor se optó por poner una ranura con la forma y geometría del eje del motor paso a paso NEMA 17, esta solución es muy parecida a la que se optó para transmitir el par en el ensayo donde se hace una perforación en la parte superior para asegurar el acoplamiento del eje del motor NEMA 17 con el eje de unión.

El resto de secciones corresponden a alojamiento para el engranaje de 18mm de anchura con la chavetera correspondiente, justo después hay una sección de menor tamaño que aloja la arandela ondulada y en el extremo final se aloja el rodamiento.

Como se observa en la *Figura* en el caso del Eje 1 la longitud total del eje es la suma del conjunto motor paso a paso más el Eje 1, después de diseñar todos los ejes se concluyó que la longitud total debía ser de 90mm para todos los ejes. Este hecho provocó modificaciones en el eje y se calculó la longitud de la ranura de entrada exacta al Eje 1 para que la suma del motor y Eje 1 fuera exactamente 90mm y así respetar la anchura establecida en la caja reductora.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.2.2. Diseño del Eje 2, 3 y 4

De la misma manera que con el eje de entrada primero se escoge los materiales a utilizar en cada eje y luego se diseña el eje en función de las geometrías y donde debe engranar cada rueda dentada.

Para los ejes 2 y 3 el diámetro calculado donde se alojan los engranajes es de 14mm, por lo tanto es posible utilizar los mismos elementos en ambos ejes para simplificar, aunque es preciso por tanto obtener nuevos elementos que se adapten a este nuevo diámetro.

- Rodamiento SKF Mod. 61900

Diámetro interior $d=10\text{mm}$; Diámetro exterior $D=22\text{mm}$; Anchura $B=6\text{mm}$

- Arandelas Resorte Onduladas SpringMakers Mod. M10LE4618

Diámetro interior $D_i=13\text{mm}$; Diámetro exterior $D_y=18.5\text{mm}$; Anchura $L_o=2\text{mm}$

- Chaveta OPAC DIN6885/1 Mod. 51A-3-3-12

Longitud $L=12\text{mm}$ Base=3 mm Anchura $B=3\text{mm}$

A partir de todos los datos recopilados se crean el Eje 2 (parte superior de la Figura 30) y el Eje 3 (parte inferior de la Figura 30) que se muestran a continuación:

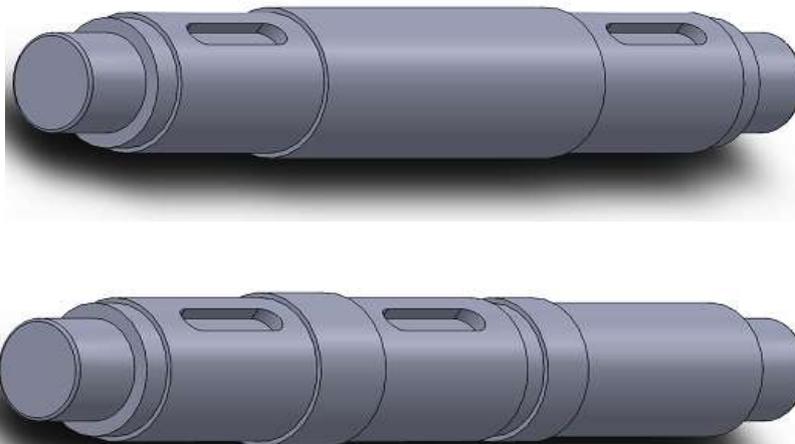


Figura 30: Diseño CAD Eje 2 y 3

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

En estos ejes no solo se utilizaron los mismos materiales para simplificar el diseño sino que también para igualar las dimensiones y conseguir ejes con geometrías iguales. Como se observa el Eje 2 tiene alojados los engranajes en cada extremo y la parte intermedia libre de elementos, este eje es totalmente simétrico tanto en geometría como en la disposición de los elementos (rodamientos, chavetas y arandelas onduladas). En cambio el eje 3 no puede ser simétrico debido al contacto entre engranajes y se decide desplazar la rueda dentada Z_{C2} hacia la zona intermedia del eje, ambos ejes tienen la longitud de 90mm.

Para el diseño del eje de salida (Eje 4) el diámetro de eje calculado es de 18mm, en este eje se alojara la rueda dentada Z_{D2} y se escogen todos los elementos iguales excepto la arandela resorte de mayor tamaño y una nueva chaveta para el eje de salida.

- Rodamiento SFK Mod. 61900

Diámetro interior $d=10\text{mm}$; Diámetro exterior $D=22\text{mm}$; Anchura $B=6\text{mm}$

- Arandelas Resorte Onduladas SpringMakers Mod. M10LE4632

Diámetro interior $D_i=16\text{mm}$; Diámetro exterior $D_y=21.5\text{mm}$; Anchura $L_o=2.5\text{mm}$

- Chaveta OPAC DIN6885/1 Mod. 51A-3-3-12

Longitud $L=12\text{mm}$ Base=3 mm Anchura $B=3\text{mm}$

- Chaveta OPAC DIN6885/1 Mod. 51A-2-2-6

Longitud $L=6\text{mm}$ Base=2 mm Anchura $B=2\text{mm}$

El Eje 4 de salida es mayor a 90mm ya que por un lateral estará la salida de la caja reductora, como se observa en la *Figura 31* en la salida se le ha adherido una chavetera para poder transmitir el par de salida a la aplicación correspondiente

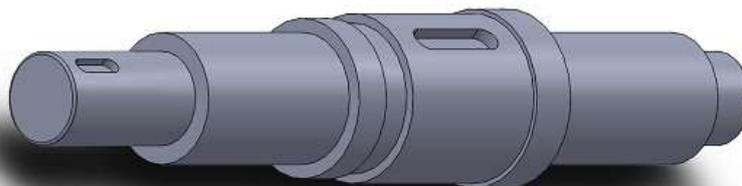


Figura 31: Diseño CAD Eje 4

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.2.3. Tolerancias del eje, agujeros y rodamientos

Es importante que a la hora de diseñar los componentes se tengan en cuenta las tolerancias para que el mecanismo tenga un funcionamiento adecuado.

En el caso de las piezas con impresión 3D es más difícil estimar una tolerancia y dependerá del modelo de impresora y la técnica de impresión se utilice. Para la ejecución de estas piezas en 3D se estimará una tolerancia de $\pm 0,2\text{mm}$ en el caso se una superficies planas y $\pm 0,4\text{mm}$ en caso de agujeros.

En el caso del eje mecanizado si se puede hacer un cálculo exacto del ajuste y tolerancias exactas entre las distintas piezas.

Primeramente se calculará el ajuste entre el agujero del rodamiento respecto al eje pasante torneado. En el **Anexo 2: Catálogo Rodamientos SKF** se puede observar los distintos tipos de tolerancias de agujero de los rodamientos.

$$\begin{array}{l} \text{Agujero interior Rodamiento } \varnothing 8\text{mm } H8 \\ \text{Agujero interior Rodamiento } \varnothing 10\text{mm } H8 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} E_i = 0\mu\text{m} \\ E_s = 22\mu\text{m} \end{array} \right.$$

A partir del catálogo se escoge las desviaciones superior e inferior del diámetro interior del eje con un acabado de calidad IT8.

Se escogerá la calidad del eje a partir de las tablas del **Anexo 1.3: Tablas de Tolerancia**, para un torneado con acabado fino se puede conseguir una calidad IT7 en el eje y una rugosidad absoluta de $1,6\mu\text{m}$.

Según el catálogo de Rodamientos SKF para conseguir un buen montaje del rodamiento se necesita un ajuste intermedio, es decir, escoger tolerancias que permitan el juego y el ajuste. Se establece un ajuste máximo de $-10\mu\text{m}$ i un juego máximo de $27\mu\text{m}$.

$$A_{\text{máx}} = E_i - e_s \rightarrow -10 = 0 - e_s \quad \left. \begin{array}{l} e_s = 10\mu\text{m} \\ e_i = -5\mu\text{m} \end{array} \right\} \text{Ajuste } j7$$

$$J_{\text{máx}} = E_s - e_i \rightarrow 27 = 22 - e_i$$

El ajuste obtenido por lo tanto es: Ajuste **H 8 j 7**

En el caso de las chavetas se indica que el chavetero en el eje debe ser un ajuste N9 para un asiento ligero ver **Anexo 2: Catálogo Chavetas OPAC**.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.3. Diseño de la carcasa y soporte exterior

La carcasa es una parte muy importante para completar la caja reductora ya que no solo tendrá la función de soporte y de protección hacia el exterior sino que también tendrá parte funcional dentro del mecanismo.

La carcasa y el soporte se diseñarán personalizados para los ejes diseñados y todos los elementos que integran el eje, estos elementos deben estar dimensionados para que el mecanismo con los engranajes quepa en el interior y pueda ser montable y desmontable fácilmente.

6.3.1. Diseño del soporte

Las dimensiones del mecanismo engranaje son de 170x90x170 mm, a partir de estas dimensiones se crea una base que será el soporte de toda la caja reductora.

La base tiene un marco interior con dimensiones 180x78mm y el marco exterior de 192x102mm, sobre esta base reposará el resto de elementos de la caja reductora.

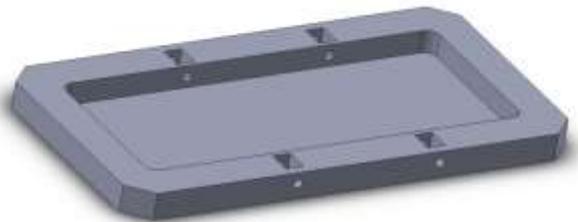


Figura 32: Diseño CAD Soporte

Al soporte se le diseñan unas ranuras rectangulares, en estas ranuras se alojarán los nervios del bloque inferior de la caja reductora, estos nervios serán atornillados de tal manera que la carcasa exterior y el bloque inferior queden acoplados.

6.3.2. Diseño del bloque inferior

El bloque inferior está diseñado para albergar los ejes 2 y 3 donde se han diseñado unas ranuras donde alojar los rodamientos SKF Mod. 61900, los rodamientos deben estar encastados en la estructura para un correcto funcionamiento del mecanismo.

El bloque inferior contiene los nervios verticales que refuerzan la pieza unido al soporte. También se observan nervios horizontales con perforaciones para la unión con el bloque intermedio.

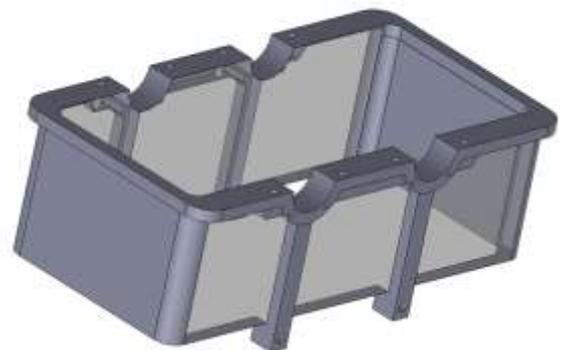


Figura 33: Diseño CAD Bloque Inferior

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.3.3. Diseño del bloque intermedio y superior

El bloque intermedio es la pieza más compleja de diseñar y la más técnica de toda la carcasa exterior, ya que es la única pieza en contacto con los cuatro ejes del mecanismo.

La parte inferior del bloque intermedio contiene las ranuras para alojar los rodamientos SKF de los Ejes 2 y 3, que con la unión de bloque intermedio y el bloque inferior quedando el movimiento del rodamiento impedido en dos ejes.

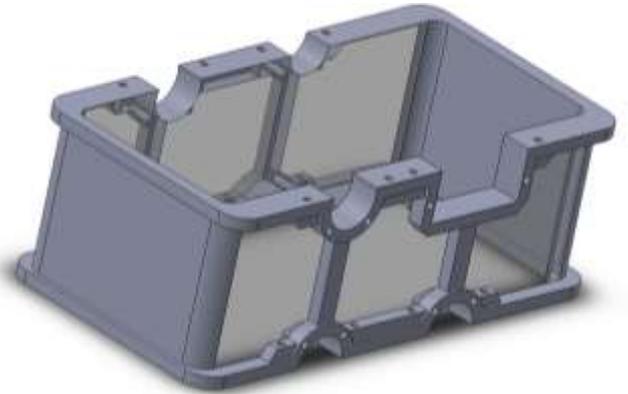


Figura 34: Diseño CAD Bloque Intermedio

En la parte superior del bloque intermedio se encuentra el Eje 4 y el Eje 1. El Eje 4 lleva el mismo rodamiento SKF Mod. 69100 en ambas bandas. La novedad está en el Eje 1, para conseguir un diseño compacto se decide introducir el motor en el interior de la caja ya que esta caja no lleva aceites ni productos que puedan dañar el motor; por lo tanto para alojar en el motor en el interior se hace una ranura con la medida del Motor NEMA 17.

Otra consideración en la parte superior del bloque es que los centros del Eje 1 y el Eje 4 ya que son engranajes (helicoidal y cilíndricos) de distinta relación de transmisión y por tanto tienen distinto tamaño, haciendo que los centros donde se alojan los rodamientos no estén a la misma altura, exactamente hay 3mm de diferencia. Teniendo en consideración la diferencia de altura y que en el Eje 1 el modelo de rodamiento es una talla más pequeña Mod. 619/8 se crea la ranura del bloque intermedio.

Se completa la carcasa exterior con el bloque superior que ejecuta el cierre superior de la caja reductora y contiene los alojamientos superiores de los Ejes 1 y 4. El diseño de la parte superior de la caja no se hace completamente cuadrado para darle estética y provocar una sensación de menor tamaño.



Figura 35: Diseño CAD Bloque Superior

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

6.3.4. Diseño de las tapas de rodamientos y motor

Las tapas de la caja no solo hacen una función estética y de seguridad, sino que también actúa en los rodamientos como soporte en el eje axial haciendo que los rodamientos queden totalmente encastados.

Las tapas circulares de los rodamientos se unen al bloque mediante dos uniones atornilladas en cada bloque y por el interior tiene un pared circular que es el que soporta al rodamiento, esta pared circular está diseñada con las medidas que indica el catálogo de rodamientos, ya que si se hace un diámetro superior o inferior al establecido no se consigue una sujeción del rodamiento adecuada.

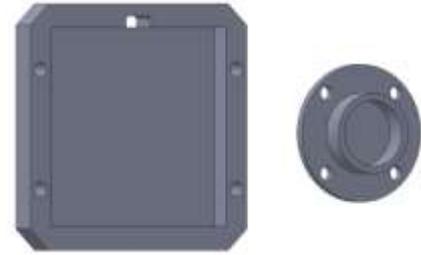


Figura 36: Diseño CAD de las Tapas

En el caso del motor la tapa es meramente un cierre rectangular atornillado, que consta de una perforación en la parte superior pensada para pasar los cables de conexión a Arduino del motor NEMA 17.

En el caso del motor NEMA con la ranura del bloque superior e intermedio no es suficiente como para soportar en equilibrio el peso del motor, por lo tanto se diseña una pieza de soporte muy sencilla para la sujeción del motor que va unida mediante tornillos a los bloques de la carcasa.

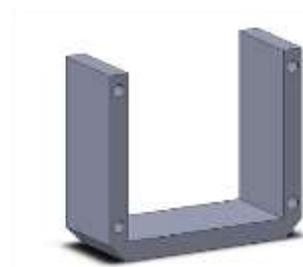


Figura 37: Diseño CAD Soporte motor

Para más información los planos acotados de todas las piezas diseñadas se pueden consultar en el **Anexo 3: Planos Caja Reductora.**

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

7. Montaje de la caja reductora

A partir de todas las piezas diseñadas se hará el montaje explicando paso por paso el ensamblaje de la caja reductora mediante CAD, con el montaje se harán las indicaciones de los pasos realizados a modo de guía montaje.

- Paso 1:

Unión de soporte con bloque inferior

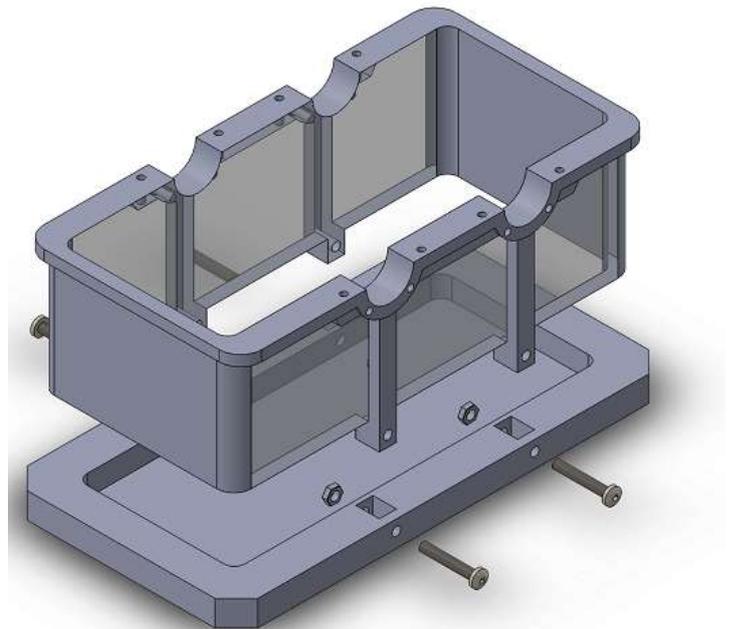
Material utilizado:

1x Soporte

1x Bloque inferior

4x Tornillos DIN 7981

4x Tuercas DIN 934



- Paso 2.1:

Montaje del Eje 2

Material utilizado:

1x Eje 2

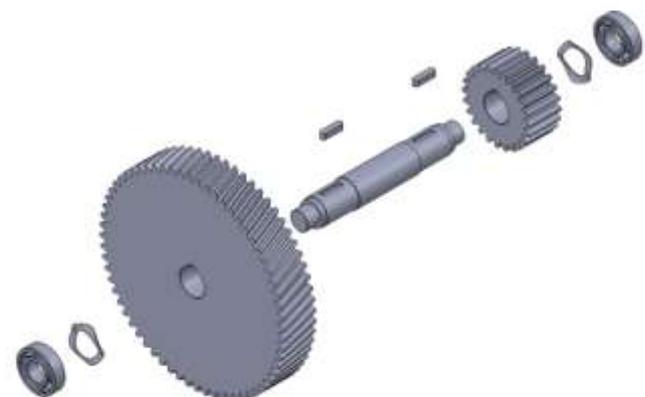
1x Engranaje Z_B

1x Engranaje Z_C

2x Chavetas DIN6855/1

2x Rodamientos Mod. 61900

2x Arandelas elásticas Mod. M10LE4618



Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

- Paso 2.2:

Montaje del Eje 3

Material utilizado:

1x Eje 3

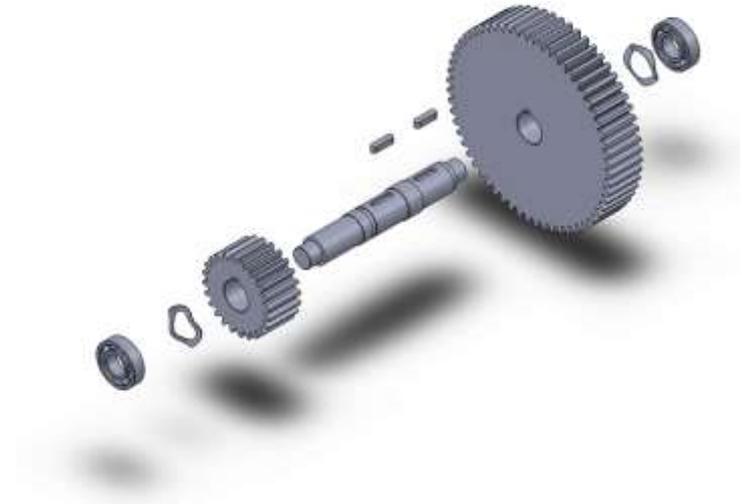
1x Engranaje Z_D

1x Engranaje Z_{C2}

2x Chavetas DIN6855/1

2x Rodamientos Mod. 61900

2x Arandelas elásticas Mod. M10LE4618



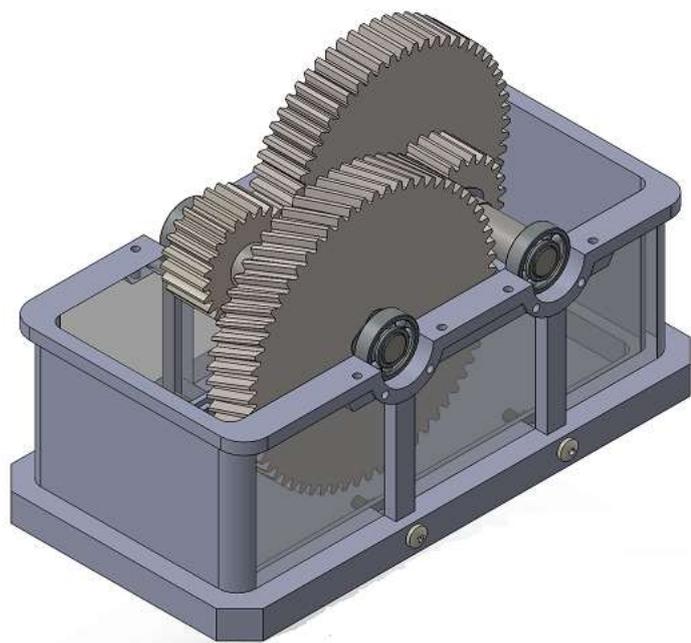
- Paso 3

Ensamble de los Ejes 2 y 3 al Bloque inferior

Material utilizado:

1x Eje 2 ensamblado

1x Eje 3 ensamblado



Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

- Paso 4:

Unión del bloque intermedio con el bloque inferior

Material utilizado:

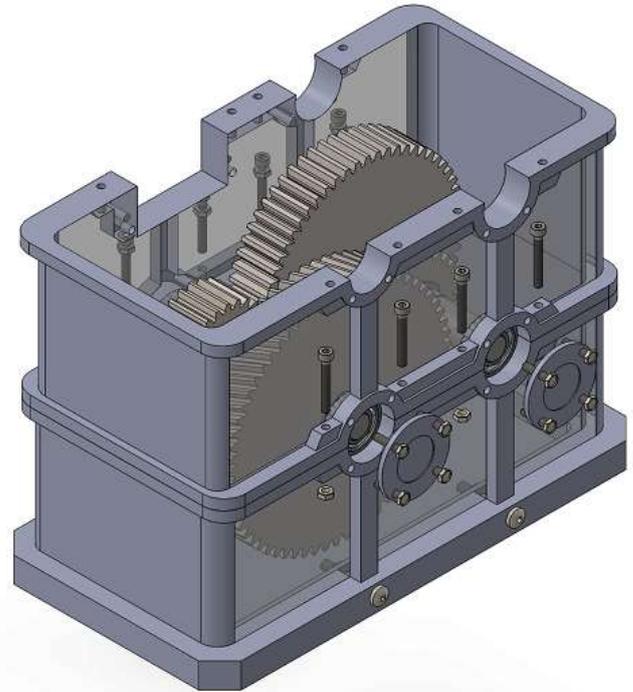
1x Bloque intermedio

4x Tapas cilíndricas

16x Tornillos DIN 7976

8x Tornillos DIN 912

8x Tuercas DIN 934



- Paso 5:

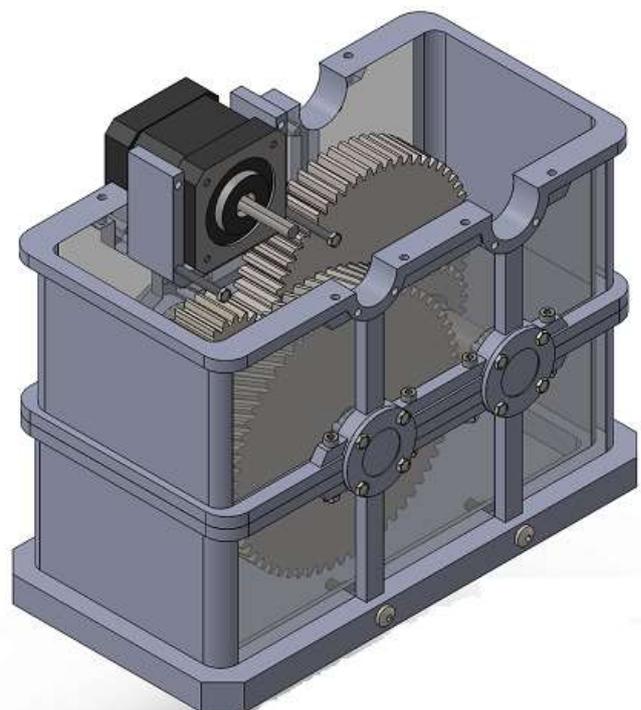
Montaje del soporte motor

Material utilizado:

1x Motor NEMA17

1x Soporte Motor

4x Tronillos DIN 7976



Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

- Paso 6.1:

Montaje del Eje 1

Material utilizado:

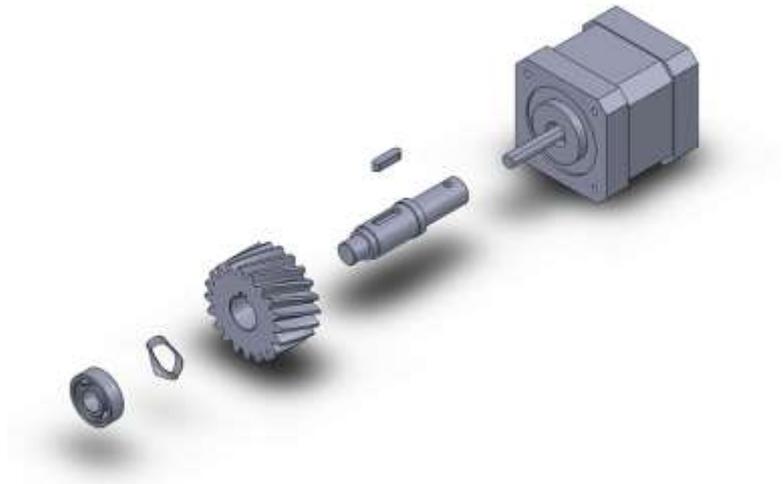
1x Eje 1

1x Engranaje Z_A

1x Chaveta DIN6855/1

1x Rodamiento Mod. 619/8

1x Arandela elástica Mod. M10LE4613



- Paso 6.1:

Montaje del Eje 4

Material utilizado:

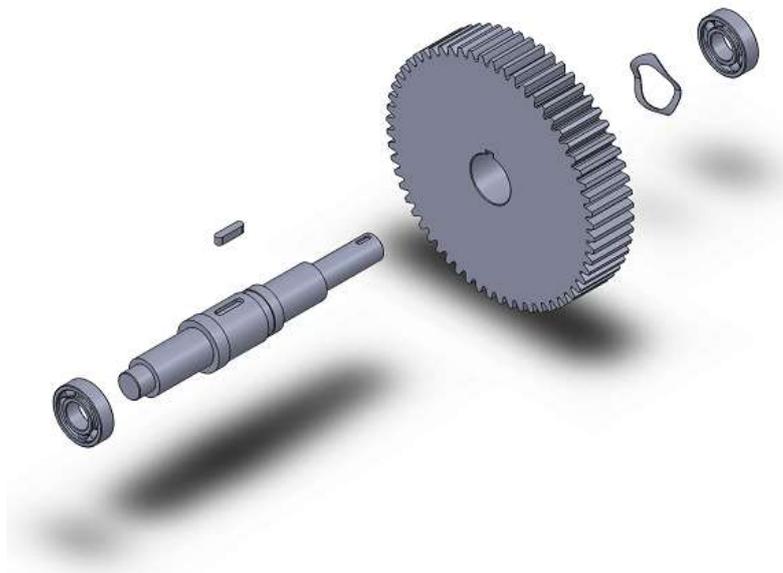
1x Eje 4

1x Engranaje Z_{D2}

2x Chavetas DIN6855/1

2x Rodamientos Mod. 61900

2x Arandelas elásticas Mod. M10LE4613



Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

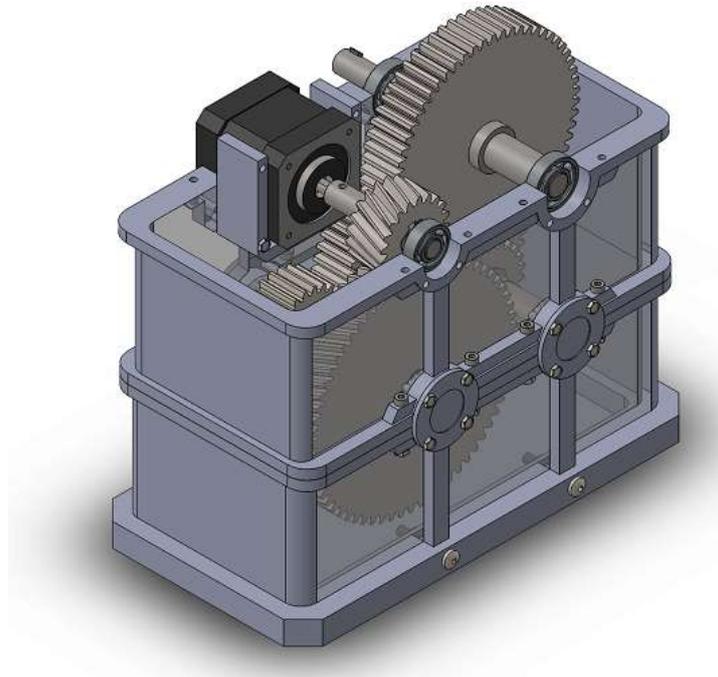
- Paso 7

Ensamble de los Ejes 1 y 2 al Bloque intermedio

Material utilizado:

1x Eje 1 ensamblado

1x Eje 4 ensamblado



- Paso 8:

Unión del bloque superior con el bloque intermedio

Material utilizado:

1x Bloque superior

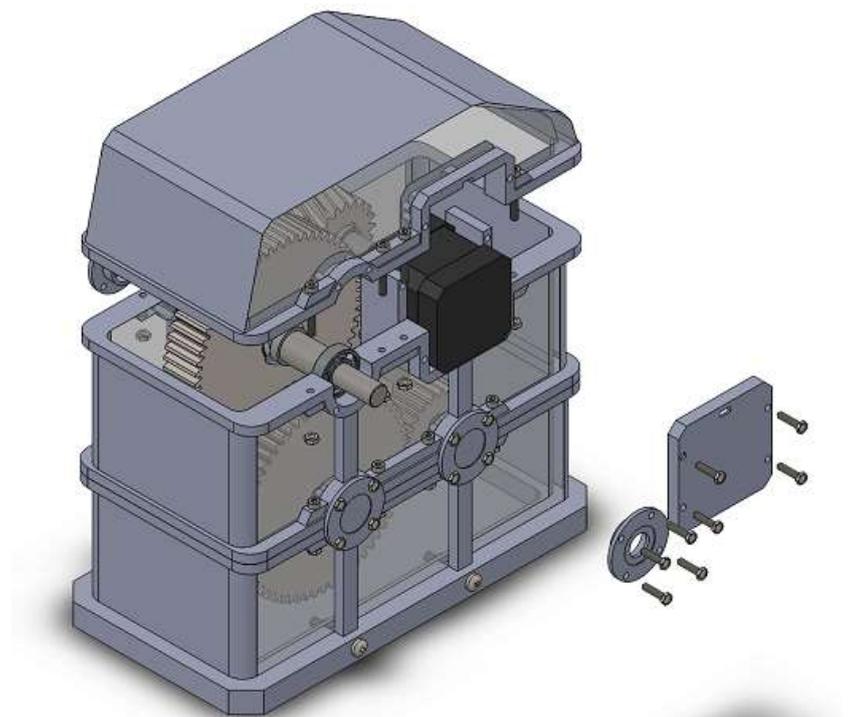
3x Tapas cilíndricas

1x Tapa motor

16x Tornillos DIN 7976

8x Tornillos DIN 912

8x Tuercas DIN 934



Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Piezas que son adquiridas como uniones atronilladas, rodamientos o chavetas utilizadas durante el montaje de la caja reductora se pueden consultar en el **Anexo 2: Catálogos y especificaciones del material.**

El conjunto de elementos diseñados y toda su respectiva información como geometría, tolerancias o rugosidad puede ser consultado en el **Anexo 3: Planos Caja Reductora.**

Una vez completado el ensamblaje se obtiene el diseño final de la caja reductora que se observan en las *Figura 38*:

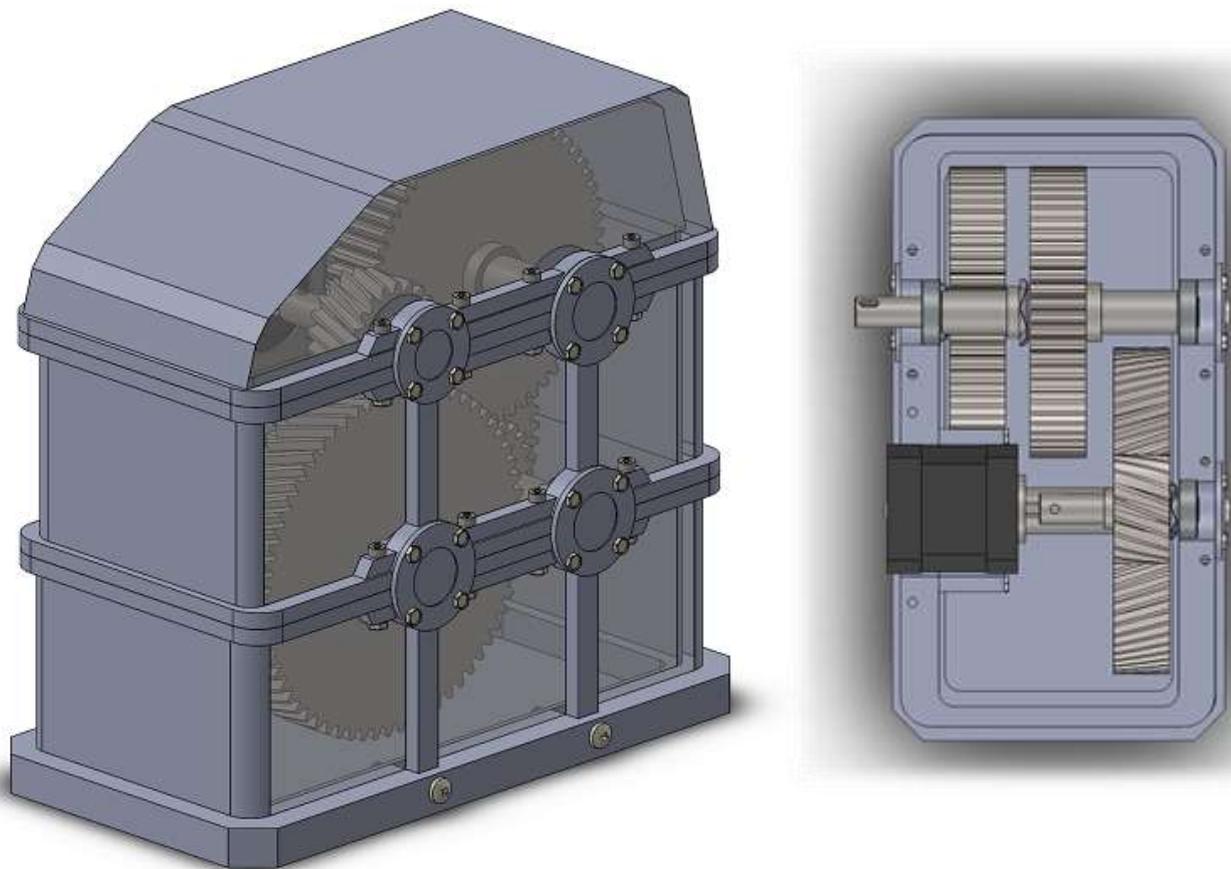


Figura 38: Diseño CAD Caja reductora y vista en planta

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

7.1. Simulación de funcionamiento

En este apartado se comprobará si la caja reductora funciona correctamente mediante una simulación donde se observará el engrane entre trenes dentados. Esta simulación será ejecutada con el mismo programa de CAD SolidWorks.

Antes de comenzar la simulación el programa debe saber que sólidos están en contacto, esto se define en la Relación de Posición Mecánica donde hay una sección especial para engranajes donde se indica el factor de reducción. Es importante poner el factor de reducción exacto para que los engranajes giren correctamente sin provocar interferencias o choques. Por ejemplo, entre los engranajes helicoidales se tiene el factor 5:16 que se indica en la *Figura 39*.

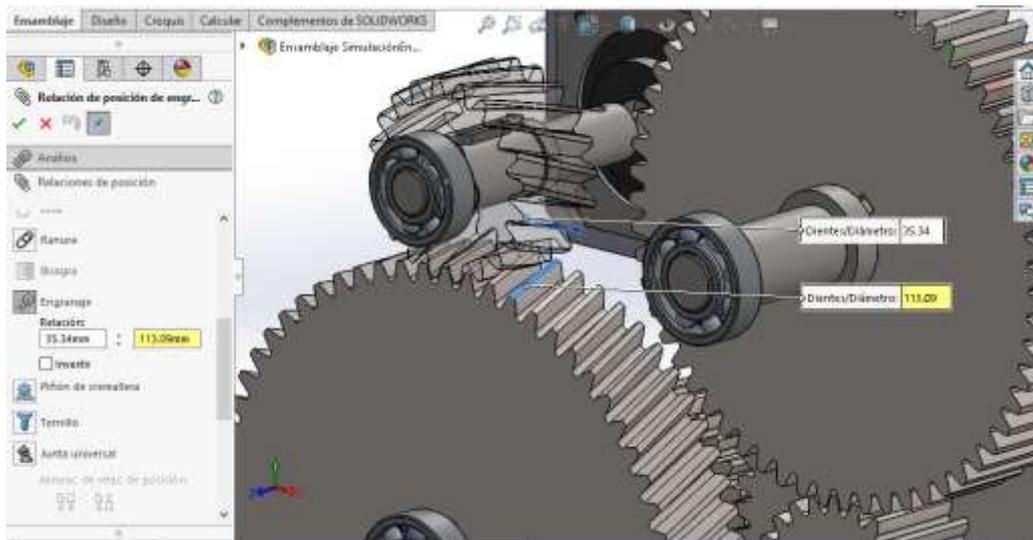


Figura 39: Relación de posición mecánica

Los ejes y engranajes también se deben vincular entre sí como sólidos que giran solidariamente. Para definir este contacto se impone una relación 1:1 ya que cada engranaje gira a la misma velocidad de rotación respecto a su eje.

Para visualizar mejor el movimiento de los engranajes, se decidió poner como no visibles aquellas capas del ensamblaje en CAD ajenas a los engranajes como el soporte o los bloques que conforman la carcasa exterior de la caja reductora.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Las simulaciones en SolidWorks se pueden ejecutar en la pestaña *Estudio de movimiento*. Para comenzar la simulación se debe indicar al programa el elemento que funcionara como motor y será el que inicie el movimiento. Para agregar un motor se debe ir al desplegable *Análisis de movimiento – Motor*.

Como se observa en la *Figura 40* se debe escoger un motor rotativo. Como motor o iniciador de movimiento se escoge el Engranaje A y no el motor NEMA; se hace así ya que se simplifica la simulación y se obtiene el mismo resultado pero con un tiempo de computación menor. La velocidad de giro introducida es constante durante el tiempo de simulación, la velocidad de simulación final se fijó a 240 RPM ya que se consideró la velocidad más adecuada para visualizar los resultados de la simulación.

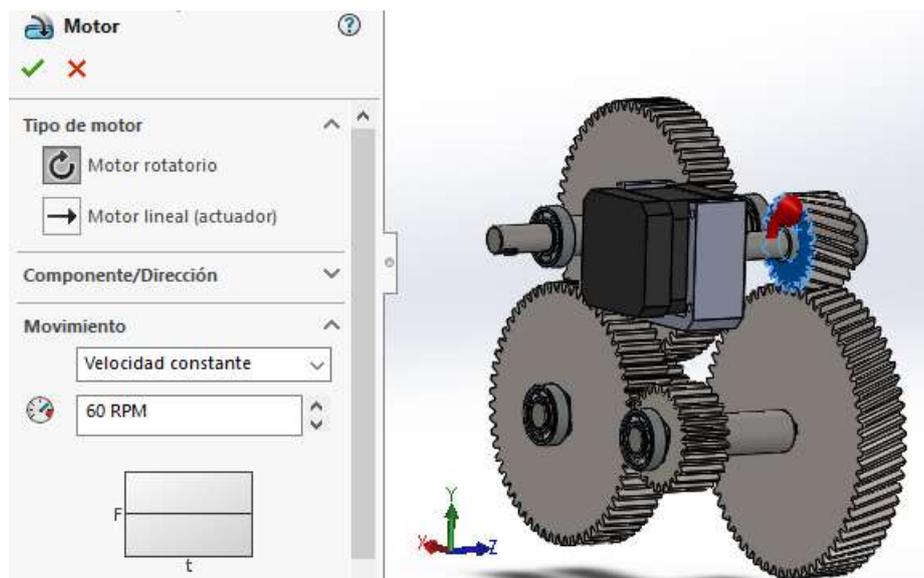


Figura 40: Selección de motor para simulación

Con la relación de sólidos y el motor definido es posible compilar la simulación para esto se debe ir a *Análisis de movimiento – Calcular*. Antes de calcular se debe definir el tiempo de simulación que se quiere calcular, en el caso de esta simulación el tiempo total de simulación es de 20 segundos como se observa en la *Figura 41*.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

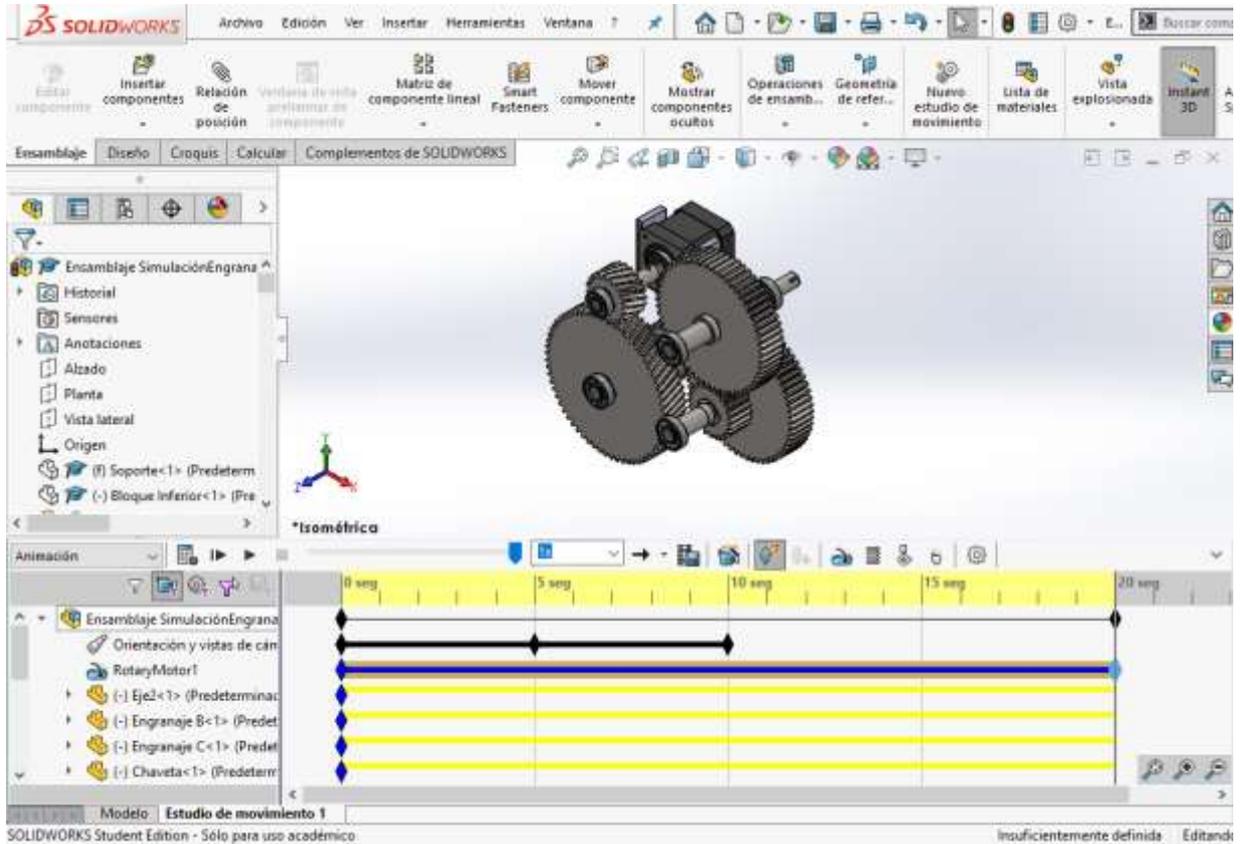


Figura 41: Simulación calculada en SolidWorks

Una vez calculada la simulación SolidWorks permite grabar, descargar y hacer escenas de la simulación como cambiar la orientación para ver el mecanismo de distintos puntos de vista. En la escena preparada de la simulación se comienza por un plano frontal del mecanismo que acaba con una vista isométrica para poder ver el giro de los distintos engranajes y ejes. Acabada la escena se puede descargar la simulación en formato mp4.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

8. Conclusiones y recomendaciones de continuidad

Durante la realización de este proyecto se ha conseguido crear un diseño de caja reductora partiendo desde una fase inicial de requisitos del diseño.

Se ha logrado la mayoría de objetivos propuestos inicialmente, comenzando por buscar un sistema de trenes dentados que cumpliera con el factor de reducción necesario, a la vez que ocupara el mínimo de espacio posible y que pudiera ser construible mediante tecnología de fabricación 3D. Se encontró una solución de distribución óptima con ejes a dos alturas para así cumplir con los requisitos establecidos de la caja reductora.

A partir del predimensionado inicial se pasó a la fase de cálculo, donde hay que ser especialmente riguroso para obtener unos resultados válidos en los engranajes y ejes, teniendo en cuenta tolerancias y parámetros varios de dimensionamiento.

Unos de los objetivos de este proyecto es que la caja reductora se pareciera lo máximo posible a un sistema de transmisión real, es por esta razón que se decidió hacer unos ejes mecanizados o buscar piezas de catálogos existentes en el mercado como rodamientos o chavetas.

Para finalizar el diseño de la caja reductora se buscaba un mecanismo funcional pero con un aspecto compacto, buscando también la estética exterior. Se diseñaron en CAD los distintos bloques que conforman la carcasa, las tapas exteriores y se buscaron las uniones atornilladas adecuadas para cada caso. Con la totalidad de elementos diseñados en CAD se ejecutó en ensamble virtual de la caja reductora y se obtuvieron todos los planos de las piezas diseñadas.

El proyecto del diseño de la caja reductora ha finalizado con el proceso de simulación, donde se ha comprobado visualmente mediante un análisis de movimiento que el mecanismo funciona correctamente.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

Es posible continuar el proyecto a partir del punto actual ya que sería preciso comprobar si el mecanismo funciona correctamente si se fabrica la caja reductora con tecnología 3D.

En caso de imprimir en 3D las piezas diseñadas se debería escoger un método de fabricación y un modelo de impresora adecuado. Dependiendo del método de impresión se debería ver si todas las piezas diseñadas pueden ser impresas. En caso de no poder imprimir alguna pieza debido a una geometría demasiado compleja se debería simplificar el diseño de esta pieza para que pueda ser impresa.

Con las piezas impresas en 3D y todo el material adquirido como rodamientos, chavetas, uniones atornilladas y ejes adquiridos se puede realizar el montaje físicamente tal y como se hizo en el ensamblaje mediante CAD.

Una vez revisada y montada se debe comprobar el funcionamiento de la caja reductora ya que con la simulación no es suficiente como para extraer conclusiones del funcionamiento real del mecanismo.

Con el montaje del mecanismo en marcha utilizando el motor paso a paso se puede comprobar el rendimiento del sistema de transmisión, y observar si se producen pequeñas vibraciones por parte del motor, de contacto entre engranajes o pérdidas mecánicas que hagan que el rendimiento de la caja reductora disminuya.

En caso de tener algún problema se debería mejorar el diseño allí donde falle e iterar el proceso para conseguir unos mejores resultados y obtener una caja reductora que opere óptimamente, con el índice de reducción de 20, dimensiones dentro de los requisitos establecidos y un funcionamiento adecuado.

Estudio de diseño y construcción de una reductora con impresora 3D

9. Bibliografía

- Gibert, Jaume. *Ingeniería de los engranajes*. Barcelona: 2005. ISBN 8460954552.
- Masià, J.; Esquerdo, T.; Colomina, J. *Trens d'engranatges epicicloïdals*. València: Universitat Politècnica de València, 2007. ISBN 9788483630501.
- Riba Romeva, C. *Mecanismes i màquines, vol. 2, Transmissions d'engranatges [en línia]*. 2^a ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002
- Hernández Abad, Francisco. Hernández Abad, Vicente. Ocho Vives, Manuel. & Font Andreu, Jordi. *Ingeniería Gráfica, Introducción a la normalización*. Departamento Expresión Gráfica UPC. 2013
- Comas Cespede, Esteve. *Engranajes helicoidales 4.1.*, 79–109. *Apunts Atenea 2019*
- Comas Cespede, Esteve. *Engranajes cilíndricos rectos 2.1.*, 15–53. *Apunts Atenea 2019*
- Casals .Jasmina. *Materiales y Tablas de tolerancias*. 2018
- García, C. *Ejes y arboles manual de diseño*. Retrieved April 21, 2020, from [es.slideshare.net/ClementeGarcia4/ejesy-arboles-manual-de-diseño-uis](https://slideshare.net/ClementeGarcia4/ejesy-arboles-manual-de-diseño-uis)
- Elementos de los engranajes cilíndricos de dientes rectos*. March 30, 2020, from <https://sites.google.com/site/483calcelementosdemáquinas/elementos-de-los-engranajes-cilindricos-de-dientes-rectos>
- Ingmecánica. Fundamentos de las Transmisiones por Engranajes*. March 25, 2020, from <https://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>
- WASI NORM. *Catálogo de Productos NORMALIZADOS*. from http://www.wasi.de/fileadmin/user_upload/Downloadbereich/kataloge/Catalogo_normalizado_2011.pdf
- CLR. *Reductores de velocidad*. March 23, 2020, from <https://clr.es/blog/es/reductores-velocidad-funcionamiento/>
- SKF. *Rodamientos SKF*. from https://www.skf.com/binary/76-121486/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf
- Springmakers. *Arandela resorte elástico*. April 22, 2020, from <https://www.springmakers.net/es/704-resortes-arandelas-ondulados>
- MootioComponents. *Tipos de arandelas*. April 22, 2020, from <http://www.mootio-components.com/blog/es/tipos-de-arandelas/>
- KHK.. *Numerical Formulas and Tables Table of Contents*.
- KHK. *Gears*. April 6, 2020, from <https://khkgears.net/new/>