

ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN EN LAS
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE ENGRANAJES RECTOS FABRICADOS POR
MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

JAVIER ROMERO BARRETO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2019

ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN EN LAS
PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE ENGRANAJES RECTOS FABRICADOS POR
MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

JAVIER ROMERO BARRETO

Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de Solución a un problema de Ingeniería
para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
Ing. Marco Antonio Velasco Peña
Ingeniero mecánico

Codirector
Ing. Iván Castro Santamaría

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, 22 de noviembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al ingeniero Marco Antonio Velasco Peña por la dedicación a la elaboración y culminación de esta investigación; por los conocimientos entregados de redacción y de las temáticas del proyecto; y por la paciencia y motivación incondicional para el mismo.

A la universidad santo tomas por ser mi lugar de formación profesional, lugar en donde adquirí los conocimientos que aplico en mi vida profesional y en la aplicación de este proyecto de grado.

Al servicio nacional de aprendizaje, por facilitarme los materiales y equipos por la impresión de los engranajes, implementados en este proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

1	OBJETIVOS	12
1.1	OBJETIVO GENERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2	GENERALIDADES DE LA MANUFACTURA ADITIVA (AM) EN ENGRANAJES RECTOS.....	13
2.1	IMPORTANCIA DE IMPRESORAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM) EN LA INGENIERÍA DE ENGRANAJES RECTOS.....	13
2.2	MATERIALES IMPLEMENTADOS POR EL MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM).....	14
2.2.1	ABS	14
2.2.2	Z-PETG.....	14
2.2.3	Z-NYLON	14
2.2.4	Z-HIPS	15
2.3	TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE PIEZAS DESARROLLADAS POR MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)	15
2.4	USO DE ENGRANAJES RECTOS FABRICADOS POR MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)	18
2.5	RECOMENDACIONES EN LA MANUFACTURA DE ENGRANAJES RECTOS FABRICADOS POR FDM.	19
2.6	CONCLUSIONES DEL CAPITULO	21
3	DISEÑO EXPERIMENTAL	22
3.1	SELECCIÓN DE FACTORES Y NIVELES DE DISEÑO DE LOS ENGRANAJES RECTOS	22
3.1.1	MÓDULO.....	22
3.1.2	NUMERO DE DIENTES.....	22
3.1.3	ANCHO DE LA CARA.....	23
3.2	SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE ENGRANAJES RECTOS POR MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA CON LA ZORTRAX M300.....	23
3.2.1	ESPESOR DE CAPA	24
3.2.2	DENSIDAD DE RELLENO.....	24
3.2.3	CANTIDAD DE CAPAS SUPERIOR E INFERIOR.....	25
3.2.4	CALIDAD DE IMPRESIÓN.....	25
3.3	VARIABLES DE RESPUESTA	25
3.3.1	CIRCUNFERENCIA DE CABEZA O EXTERIOR	25
3.3.2	PERFIL DE LOS DIENTES.....	26
3.3.3	ANCHO DE CARA	26

3.3.4	CIRCUNFERENCIA DEL AGUJERO	27
3.3.5	CHAVETA	27
3.4	ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	28
3.4.1	DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL FRACCIONADO	28
3.4.2	APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL FRACCIONADO 28	
3.5	CONCLUSIONES DEL CAPITULO	30
4	FABRICACIÓN DE ENGRANAJES RECTOS MEDIANTE FDM	31
4.1	MODELOS CAD DE ENGRANAJES RECTOS	31
4.2	GENERACIÓN DE ARCHIVOS PARA LA IMPRESIÓN DE ENGRANAJES RECTOS POR FDM	34
4.3	IMPRESIÓN DE ENGRANAJES EN LA ZORTRAX M300	38
4.4	CONCLUSIONES DEL CAPITULO	46
5	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS ENGRANAJES OBTENIDOS POR MEDIO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA FDM	47
5.1	MATERIALES Y EQUIPOS	47
5.1.1	PROYECTOR DE PERFILES	47
5.1.2	CALIBRADOR DIGITAL	48
5.2	MEDICIONES Y COMPARACIONES DE LOS ENGRANAJES RECTOS OBTENIDOS POR FDM CON EL MODELO CAD	49
5.2.1	COMPARACIÓN DEL PERFIL DEL DIENTES EN LOS ENGRANAJES	49
5.2.2	MEDICIÓN DE LA CIRCUNFERENCIA DE CABEZA	50
5.2.3	MEDICIÓN DEL ANCHO	53
5.2.4	MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DEL AGUJERO	54
5.2.5	MEDICIÓN DE LA CHAVETA	54
5.3	RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS	55
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPITULO	60
6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS ANOVA DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS	61
6.1	ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL	61
6.2	ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA	63
6.3	CONCLUSIONES DEL CAPITULO	64
7	CONCLUSIONES	65
8	RECOMENADACIONES	67
9	REFERENCIAS	69
	ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores y niveles de diseño experimental, Fuente: El Autor.	28
Tabla 2. Niveles de diseño factorial de 1/8 de 2^7 (dos niveles y siete factores) con punto central. Fuente: El Autor.	29
Tabla 3. Características de los engranajes a realizar por FDM, Fuente: El Autor.	30
Tabla 4. Características de los engranajes rectos elaborados en CAD, Fuente: El Autor.	31
Tabla 5. Parámetros de impresión implementados, Fuente: El Autor.	37
Tabla 6. Características de impresora Zortrax M300. Fuente: [33].	39
Tabla 7. Resultados físicos y características de los engranajes. Fuente: El Autor.	45
Tabla 8. Características del proyector de perfiles MITUTOYO PH-350, Fuente: El Autor.	48
Tabla 9. Características del Calibrador digital, Fuente: El Autor.	49
Tabla 10. Plantillas a 10X para proyector de perfiles, Fuente: El Autor.	50
Tabla 11. Resultados metrología del diámetro de cabeza con el CAD nominal. Fuente: El Autor.	51
Tabla 12. Diferencia de medición en engranajes rectos con número de dientes impar, Fuente: El Autor.	52
Tabla 13. Comparación de diámetros en el eje mayor y menor de los engranajes rectos, Fuente: El Autor.	53
Tabla 14. Resultados de metrología del ancho del engranaje y medida del CAD nominal. Fuente: El Autor.	53
Tabla 15. Resultados metrología del diámetro del agujero y medida del CAD nominal. Fuente: El Autor.	54
Tabla 16. Resultados metrología de chaveta del agujero y medida del CAD nominal. Fuente: El Autor.	55
Tabla 17. Propiedades geométricas del diseño experimental, Fuente: El Autor.	59
Tabla 18. Modelos de regresión lineal de los errores dimensionales en función de los parámetros de impresión. Fuente: El Autor.	61
Tabla 19. ANOVA del Modelo de regresión lineal del error dimensional del diámetro exterior en función de los parámetros de impresión, Fuente: El autor.	63
Tabla 20. Contribución de factores del diseño experimental en las propiedades geométricas, Fuente: El Autor.	65
Tabla 21. Factores optimos de impresión de engranajes rectos, Fuente: El Autor.	67
Tabla 22. Tolerancias de engranajes obtenidos por FDM, Fuente: El Autor.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto del espesor de capa, Fuente: [17].	16
Figura 2. Método de introducir modificaciones geométricas, Fuente: [5].	17
Figura 3. Variación del contorno en el proceso, Fuente: [20].	17
Figura 4. Aplicaciones de engranajes rectos por FDM, Fuente: [21].	18
Figura 5. Moto reductor impreso por FDM, Fuente: [22].	19
Figura 6. Espesor de capa, Fuente: [26].	24
Figura 7. Densidad de relleno, Fuente: [27].	24
Figura 8. A) Capas inferiores, B) Relleno de pieza, C) capas Superior, Fuente: El Autor.	25
Figura 9. Circunferencia de cabeza, Fuente: El Autor.	26
Figura 10. Perfil del diente, Fuente: El Autor.	26
Figura 11. Ancho de cara, Fuente: El Autor.	26
Figura 12. Diámetro del agujero, Fuente: El Autor.	27
Figura 13. Chaveta del agujero, Fuente: El Autor.	27
Figura 14. Pantalla principal de SolidWorks, Fuente: El Autor.	31
Figura 15. Opciones de la Toolbox, Fuente: El Autor.	32
Figura 16. Opciones seleccionadas, Fuente: El Autor.	32
Figura 17. Configuración de componente, Fuente: El Autor.	33
Figura 18. Engranaje resultante, Fuente: El Autor.	33
Figura 19. Selección de la impresora, Fuente: El Autor.	34
Figura 20. Importación del engranaje, Fuente: El Autor.	34
Figura 21. Rotación del engranaje, Fuente: El Autor.	35
Figura 22. Configuración de impresión, Fuente: El Autor.	35
Figura 23. Parámetros de impresión, Fuente: El Autor.	36
Figura 24. Avance en la configuración de impresión, Fuente: El Autor.	37
Figura 25. Verificación de impresión, Fuente: El Autor.	38
Figura 26. Tipo de archivo, Fuente: El Autor.	38
Figura 27. Zortrax M300, Fuente: matterhackers [32].	39
Figura 28. Materia Z-HIPS, Fuente: El Autor.	40
Figura 29. A) Menú de la impresora, B) archivos disponibles en la SD Card, C) calentamiento de la extrusora, Fuente: El Autor.	40
Figura 30. Proceso de impresión de los engranes, Fuente: El Autor.	41
Figura 31. Proyector de perfiles MITUTOYO PH350, Fuente: El Autor.	47
Figura 32. Verificación de precisión del proyector de perfiles, Fuente: El Autor.	48
Figura 33. Calibrador Digital 300 mm, Fuente: El Autor.	49
Figura 34. Comparación de perfil del flanco de los dientes de los engranajes, Fuente: El Autor.	50
Figura 35. Proceso de medición circunferencia de cabeza, Fuente: El Autor.	51
Figura 36. Orientación del filamento de impresión, Fuente: El Autor.	51
Figura 37. Proceso de medición anchura del engranaje, Fuente: El Autor.	53
Figura 38. Proceso de medición diámetro del agujero, Fuente: El Autor.	54
Figura 39. Proceso de medición chaveta, Fuente: El Autor.	55
Figura 40. Grafica de los efectos de los parámetros de impresión en el diámetro exterior según la regresión lineal, Fuente: El autor.	62
Figura 41. Grafica de los efectos de los parámetros de impresión en el ancho del engranaje según la regresión lineal, Fuente: El autor.	62

Figura 42. Ilustración del efecto en las superficies de los engranajes, **Fuente:** El Autor... 68

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Modulo, Fuente: [24].	22
Ecuación 2. Numero de dientes, Fuente: [24].	22
Ecuación 3. Numero de dientes mínimo, Fuente: [24].	23
Ecuación 4. Número de corridas, Fuente: [30].	28

RESUMEN

Los engranajes rectos plásticos están usados en un sinnúmero de mecanismos, partiendo de juguetes, elementos didácticos de aprendizaje, mecanismos pequeños y en maquinaria industrial; además al estar realizados con polímeros reduce el costo de materiales y manufactura de manera considerable. La manufactura aditiva (AM), tiene una gran sectorización industrial en cuanto el Prototipado rápido (RP) sin embargo las aplicaciones de las tecnologías de AM en los procesos de manufactura no se han establecido en procesos industriales con respecto a engranajes rectos.

Una de las tecnologías de manufactura aditiva más desarrolladas y con más investigación en la actualidad es la deposición de filamento fundido (FDM), la cual hace uso de materiales como Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poli láctico (PLA) o materiales propios según la compañía de la impresora. Al ser esta una de las tecnologías más accesibles y mayor catálogo de materiales según la aplicación que se requiera. Las propiedades geométricas de los engranajes rectos obtenidos por FDM no están caracterizadas, sin embargo los parámetros de impresión son cruciales al momento de mejorar la geometría de estos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio realizado para optar el título de ingeniero mecánico de la universidad Santo Tomas, aporte conocimientos de materiales, tipos de impresión 3D, parámetros de impresión de FDM; enfocados en los engranajes rectos y cuál es el efecto de estos parámetros en las propiedades geométricas de engranajes rectos manufacturados con esta tecnología.

En la primera parte del documento, se exponen materiales y trabajos relacionados con las propiedades y manufactura de engranajes rectos manufacturados por FDM. Luego se presenta el diseño experimental, especificando los factores y niveles de diseño a estudiar. Después se describe el proceso de diseño, configuración y fabricación por FDM de los engranajes establecidos en el diseño experimental. Seguidamente, se muestra las mediciones y comparaciones metrológicas aplicadas para cada una de las muestras. Finalmente, se presentan los resultados del análisis ANOVA y del análisis estadístico para cumplir con el objetivo del proyecto.

Palabras clave:

FDM, Engranajes, propiedades geométricas, AM, materiales, mecanismos, manufactura.

INTRODUCCIÓN

En el país, la incursión de las tecnologías en impresión 3D es reciente en áreas como Estereolitografía (SLA), procedimiento digital de luz (DLP), (SLS), fusión selectiva por láser (SLM), modelado por deposición fundida (FDM) entre otras, con diferentes resultados en la impresión [1]. La tecnología de más uso en el país es la FDM la cual usa ácido poli láctico (PLA) y el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) como los principales materiales de impresión. En la manufactura aditiva en especial la FDM existen parámetros de impresión como la velocidad, densidad de filamentos y espesor de capa, los cuales son determinantes para las propiedades mecánicas y geométricas de las piezas obtenidas con tecnologías de impresión 3D [2].

La importancia en industria de implementar nuevas tecnologías para los procesos de manufactura en la elaboración de engranajes, aprovechando los avances en los procesos enfocados en minimizar las pérdidas de material, disminuir la cadena de producción y optimizar las propiedades mecánicas y geométricas de los engranajes según su aplicación [3]. Esto es fundamental para asegurar las medidas requeridas en la fabricación de pequeños y micro engranajes rectos, los cuales tienen un diámetro primitivo inferior a los 100 mm [4]. En la manufactura aditiva se realizan modificaciones en los diseños CAD original por el método de iteraciones de los parámetros de impresión, se logra aumentar la precisión hasta de un 50% en la producción de engranajes retos fabricados por FDM [5].

Los constantes avances en la manufactura aditiva AM, permiten el desarrollo de tecnologías las cuales se habían quedado atrás, la evolución del diseño con el fin de reducir material y costos en los procesos de manufactura, ahora posibles de consolidar las aplicaciones en la industria de la AM [6]. Estos avances en la AM están siendo aplicados en el diseño en las geometrías complejas y en piezas las cuales pueden ser realizadas con polímeros como el PLA y ABS [7]. Por consiguiente, el estudio de los parámetros de impresión con el fin de mejorar la precisión geométrica de los engranajes realizados con FDM, ayudando a minimizar las tolerancias al momento de realizar diseños los cuales serán manufacturados por FDM.

La velocidad y verificación de los avances en diseños de engranajes son soportadas con el RP por medio de la AM, lo que la convierte en un importante medio para avances en las mejoras de diseños para la industria y su reducción de costos [8]. Por consiguiente, el estudio de los parámetros de impresión con el fin de mejorar la precisión geométrica de los engranajes realizados con FDM, ayudaran a minimizar el rango de tolerancias de los diseños de engranajes rectos, los cuales serán manufacturados por FDM.

Por lo tanto, el problema que se pretende estudiar en este trabajo de grado, es determinar el efecto de los parámetros de velocidad, espesor de capa y la densidad de filamentos. En las propiedades geométricas de engranajes rectos fabricados por modelado por deposición fundida FDM. Lo anterior, realizando estudios metrológicos observando las desviaciones en las dimensiones de los engranajes rectos obtenidos, con respecto al modelo CAD original.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de los parámetros de velocidad, densidad de filamentos y espesor de capa en las propiedades geométricas de engranajes rectos fabricados por modelado por deposición fundida FDM.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el experimento que permita evidenciar los efectos de los parámetros de impresión por FDM sobre las características geométricas del modelo CAD original.
- Fabricar los engranajes de acuerdo con el diseño experimental establecido mediante deposición de filamento fundido.
- Realizar un estudio metrológico para observar las desviaciones en las dimensiones de los engranajes obtenidos con respecto al modelo CAD original.
- Hacer un análisis estadístico para determinar las variaciones de las características geométricas en función de los parámetros de impresión.

2 GENERALIDADES DE LA MANUFACTURA ADITIVA (AM) EN ENGRANAJES RECTOS

Los engranajes manufacturados con polímeros tienen ventajas únicas con respecto a los engranajes metálicos, como: alta eficiencia, bajo costo y peso, funcionamiento sin lubricación. La manufactura aditiva ha tomado popularidad en las industrias como la automotriz, aeroespacial, medicina y arquitectura esto cuando son volúmenes de producción son inferiores a 1000 unidades. Dentro de los sistemas de AM, la deposición de filamento fundido (FDM) es una tecnología que cuenta con distintos tipos de materiales de impresión que diversifican las posibles aplicaciones de los elementos fabricados según las propiedades físicas requeridas [9].

Para efectos de estudio, se hace una reseña de distintos tipos de materiales implementados en la FDM, adicionando usos y aplicaciones en el campo de la ingeniería de engranajes rectos, la cual es base para el desarrollo de este trabajo.

2.1 IMPORTANCIA DE IMPRESORAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM) EN LA INGENIERÍA DE ENGRANAJES RECTOS

La importancia de engranajes precisos en la implementación de sistemas de transmisión de movimiento y potencia, da ventajas como su fácil fabricación, control de relación, espacio reducido, entre otras [10]. Esto se empezó a trabajar desde 1920, con la implementación de la metrología de engranajes, cerciorando el cumplimiento con los parámetros de diseño; destacando las mejoras de engranajes manufacturados adecuadamente en la transmisión de movimiento y potencia [11].

Sin embargo la AM de engranajes rectos no ha tenido gran incursión industrial, en especial la tecnología de FDM. Sin embargo, hay estudios que muestran los beneficios del uso de la AM para engranajes rectos. Estas tecnologías están desarrolladas con el fin de minimizar costos, tiempo de fabricación y asegurar el funcionamiento del diseño desarrollado [8]. Las piezas obtenidas por FDM tienen distintas características mecánicas las cuales varían dependiendo del material de fabricación y los parámetros de impresión establecidos [12].

Por lo anterior, es importante conocer las propiedades geométricas de los engranajes rectos manufacturados por FDM, a partir de los parámetros de impresión. Esto ayudará a aumentar la implementación de esta tecnología en los procesos de fabricación de engranajes rectos en la industria.

2.2 MATERIALES IMPLEMENTADOS POR EL MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

El modelado por deposición fundida FDM. Está basado en la extrusión del filamento de un material, partiendo de una superficie en el plano XY y desplazándose en el plano Z, hasta generar la geometría final [12]. La impresión FDM cuenta con diferentes tipos de materiales; En los genéricos están el PLA, ABS, Nylon, también materiales como son Z-HPIS, Z- PETG y el Z-GLASS los cuales son desarrollados específicamente para impresoras de la compañía ZORTRAX. A continuación, se presentarán las propiedades, aplicaciones y beneficios de uso de algunos de los materiales mencionados anteriormente.

2.2.1 ABS

EL Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) cuenta con una buena resistencia mecánica y al impacto, por lo que es fácil usarlo en un proceso de producción. Al contar con tres distintos componentes, cuenta con un gran número de propiedades mecánicas útiles para los procesos de la manufactura aditiva [13].

2.2.2 Z-PETG

El Z-PETG es un material de grado industrial. Está compuesto de PET estándar con Glicol, obteniendo un material resistente el cual no se degrada con el tiempo, Está pensado para piezas de alta exigencia mecánica. A continuación se muestran las aplicaciones para las cuales se recomienda.

- Herramientas industriales y partes
- Componentes mecánicos
- Mecanismos de trabajo
- Pruebas de choque
- Prototipos de embalaje
- Contenedores y envolturas
- Partes requeridas para ser resistentes a sales, ácidos, alcanos, solventes, grasas y aceites

Cuenta con propiedades que lo hacen ideal para el uso de piezas finales, gracias al bajo encogimiento, durabilidad, resistencia a golpes y a distintos productos químicos [14].

2.2.3 Z-NYLON

El Z-NYLON es un material resistente a altas temperaturas y versátil, cuenta con propiedades requeridas en la AM para implementación en piezas de uso final, como son la durabilidad, resistencia química y la facilidad de teñido. A continuación se muestran las aplicaciones para las cuales se recomienda.

- Herramientas
- Bisagras
- Hebillas
- Engranajes
- Prototipos funcionales
- Partes mecánicas

Tiene la desventaja de absorber humedad rápidamente. Además, presenta encogimiento por lo cual no es recomendable el uso de este material en geometrías grandes ni en piezas detalladas [15].

2.2.4 Z-HIPS

El Z-HIPS es un material con baja contracción y elevada resistencia mecánica. Tiene características similares a las del PLA y está enfocado a prototipos funcionales [16], [9]. A continuación, se muestran unas de las aplicaciones para las cuales la compañía recomienda.

- Prototipos funcionales
- Modelos con grandes superficies planas
- Maquetas de arquitectura
- Prototipos de piezas mecánicas
- Cubiertas
- Productos de consumo

Al contar con las características mencionadas anteriormente, las cuales son favorables para la manufactura de los engranajes rectos, se seleccionó el material Z-HIPS para implementarlo en la manufactura de los engranajes rectos en este proyecto.

2.3 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE PIEZAS DESARROLLADAS POR MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

Desde la accesibilidad de impresoras 3D a la comunidad se han enfocado en bajar costos y generar caracterización de los parámetros de impresión en piezas, con el fin de aplicarlas de forma asertiva en los procesos industriales. Para esto se estudiaron los parámetros que influyen en el resultado de la impresión por FDM los cuales son: camas de adhesión, soportes auxiliares de apoyo, temperatura, velocidad, resolución en Z, resolución en XY, Cascara y el relleno. Cada uno de estos parámetros influye tanto en la fabricación, aspecto visual y en el comportamiento mecánico de la pieza que se imprime, se ha estudiado el efecto de cada uno de estos parámetros, caracterizando así el resultado que tienen estos al momento de la impresión, los cuales son o no relevantes dependiendo la geometría de la pieza impresa. En la Figura 1 se observa uno de los parámetros más relevantes de una pieza impresa por FDM con 3 distintas configuraciones del espesor de capa o resolución Z [17].

Los efectos causados por cada uno de los parámetros varían según la geometría los cuales podrían no llegarse a presentar en la pieza, por este motivo analizaron por individual cada uno de los parámetros determinando cuales son las limitaciones que se pueden llegar a obtener dependiendo el caso, de acuerdo con el software y generalidades geométricas que puedan estar afectadas directamente el parámetro [17].



Figura 1. Efecto del espesor de capa. **Fuente:** [17].

Por otra parte la implementación de engranajes hechos por FDM está limitada por: La baja resistencia mecánica a cargas y desgastes de los polímeros usados en FDM y la baja resolución geométrica en el perfil de los dientes. Estas generan limitaciones en aplicaciones industriales las cuales requieren tener no solo larga vida útil sino también alta resistencia mecánica. Esto hace que la implementación de engranajes rectos fabricados por FDM se reduzca considerablemente. Sin embargo, para aplicaciones de piezas de menor tamaño que no requieran estar sometidas a grandes cargas la FDM es el método de fabricación más favorable con respecto al mecanizado [18].

Por lo anterior, la AM no ha logrado una gran incursión en el campo de la fabricación de piezas finales aunque si tiene una gran importancia en el Prototipado rápido (RP) de la industria. No obstante, es importante lograr la aplicación de esta tecnología para engranajes rectos, ya que estos son unos de los sistemas de transmisión más usados en maquinarias semi industrial e industrial. Así, la AM se podría convertir en un pilar de nuevas formas de fabricación de piezas industriales. Los estudios alrededor de la mejora de la geometría y resistencia mecánica de las piezas fabricadas con FDM hacen que obtenga un valor agregado para la industria.

Se realizó un estudio enfocado a corregir la geometría en engranajes rectos obtenidos por FDM, por medio de un proceso iterativo del modelo CAD original. Se estableció que el principal defecto de geometría en la impresión de engranajes se ubica en los flancos de los dientes, Para corregirlo, se implementaron coeficientes de compensación en la geometría nominal del modelo CAD, como se ve en la Figura 2 [5].

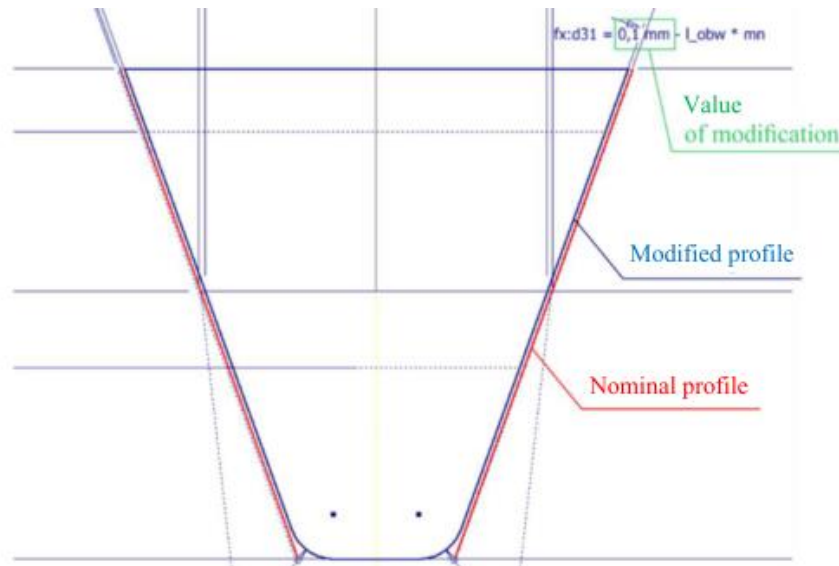


Figura 2. Método de introducir modificaciones geométricas, **Fuente:** [5].

Con esto se logró desarrollar una metodología para aumentar la precisión de los engranajes impresos por FDM, corrigiéndolo desde el modelo CAD, con lo cual es posible duplicar la precisión en la geometría de engranajes.

Por otro lado en las piezas finales manufacturadas por FDM se encuentran variaciones según el tipo de impresora implementada y de los parámetros de impresión, ya que estos influyen de manera directa el resultado final de la pieza [19]. Por esto, en la AM se ha llevado a cabo una recopilación de las principales consideraciones en la geometría de piezas fabricadas por FDM. El diámetro del extrusor del filamento depositado establece un error que puede ser la mitad del diámetro como se muestra en la Figura 3 [20].

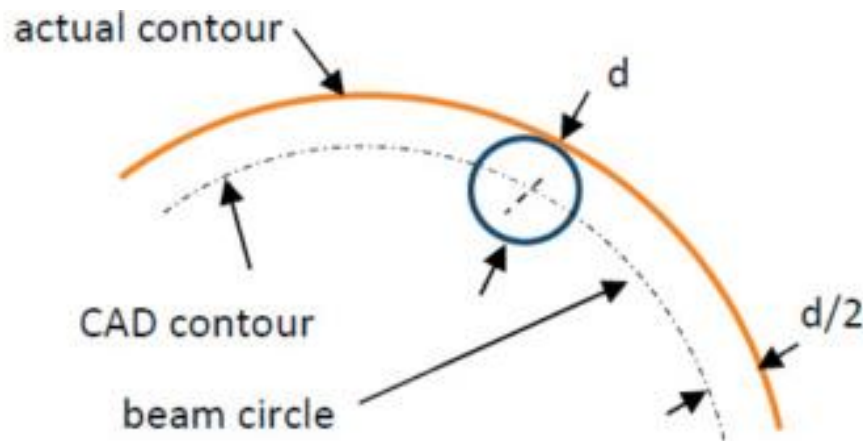


Figura 3. Variación del contorno en el proceso, **Fuente:** [20].

Los estudios y trabajos mostrados anteriormente, desarrollan conocimientos en los engranajes rectos o piezas obtenidas por FDM, realizando modificaciones en el modelo CAD para mejorar la geometría de los mismos, sin embargo estos no se consideran como punto de partida de este trabajo puesto que aumentarían la complejidad del estudio. Pero no se encontraron estudios del efecto de los parámetros de impresión en las propiedades geométricas finales de los engranajes rectos obtenidos por FDM, lo cual es el objetivo de este proyecto.

2.4 USO DE ENGRANAJES RECTOS FABRICADOS POR MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

Las aplicaciones de los engranajes rectos fabricados por FDM están presentes en diversos campos dependiendo de la necesidad, entre estas se encuentran; prototipos, juguetes, sustitución temporal de piezas, inclusive mecanismos complejos con sistemas transmisión que cuentan con engranajes sometidos a bajas cargas. Un riesgo de los engranajes fabricados con FDM está en la elección del material del cual estará fabricado y la baja confiabilidad geométrica del proceso. Sin embargo, se pueden obtener engranajes rectos fabricados por FDM que cumplen con la función de diseño en las condiciones de entorno a las cuales están sometidos.

Teniendo en cuenta las limitaciones de los engranajes rectos obtenidos por FDM, se puede establecer que los casos en lo que se puede hacer la implementación de estos engranajes serían objetos que cuentan con piezas móviles accionadas con engranajes, pueden llegar a ser aplicaciones en componentes mecánicos tales como reductores de engranajes planetarios con un motor paso a paso, actuadores lineales de alta carga, mandril de 3 quijadas (Ver Figura 4) entre otros [21].

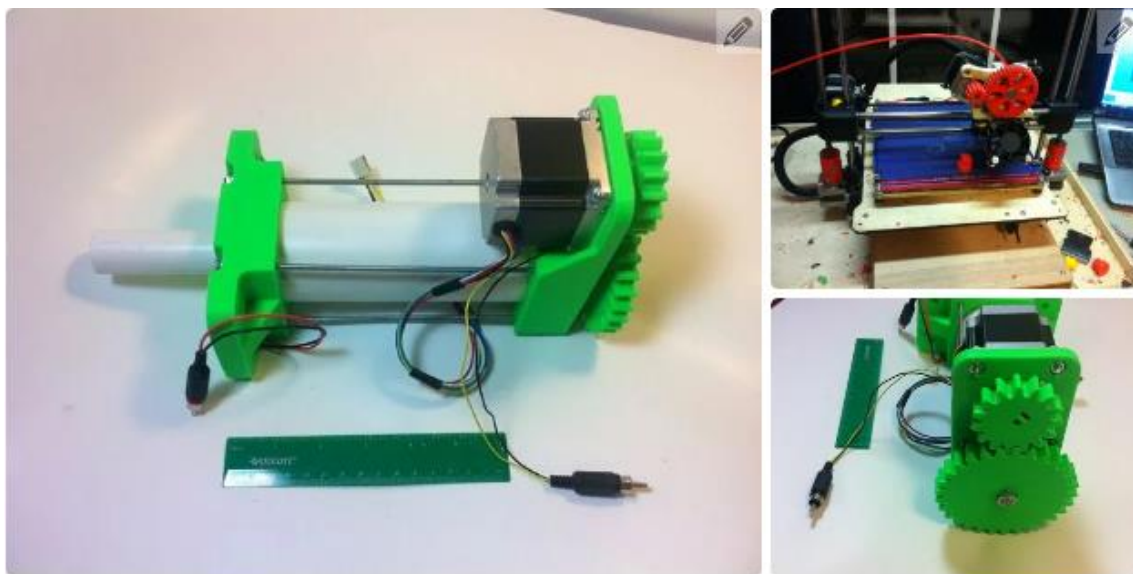


Figura 4. Aplicaciones de engranajes rectos por FDM, **Fuente:** [21].

La fabricación por FDM, implementa sistemas complejos, los cuales pueden ser prototipos de un diseño, con el fin de asegurar el cumplimiento del ensamble. Como se ve en la Figura 5 un reductor de velocidad interactivo. El cual presento una serie de problemas en la elaboración como, desprendimiento de capas, falta de relleno, enfriamiento rápido de material. Los cuales solucionaron dando como resultado un sistema moto reductor funcional, el cual está manufacturado con FDM exceptuando las barras de unión las cuales son en acero [22].

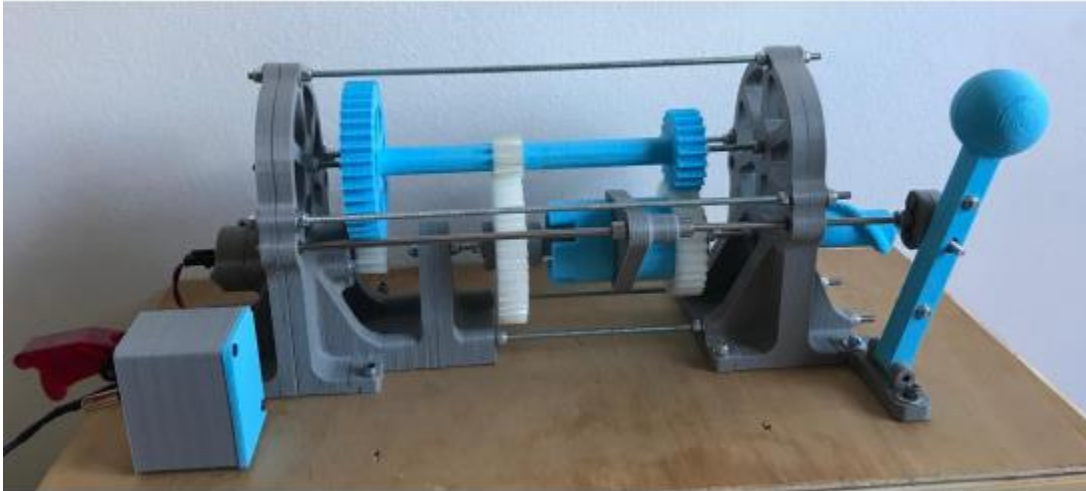


Figura 5. Moto reductor impreso por FDM, **Fuente:** [22].

2.5 RECOMENDACIONES EN LA MANUFACTURA DE ENGRANAJES RECTOS FABRICADOS POR FDM.

En la amplia comunidad de la AM se encuentran distintos puntos de vistas y sugerencias las cuales nos encaminan a obtener engranajes que cumplirán con la función asignada o para la cual estén diseñados. Gracias a la gran cantidad de blogs enfocados a la solución de problemas con respecto a la AM, se cuenta con guías al momento de realizar engranajes por medio de FDM. Por lo tanto si se tiene la necesidad de la implementación de un engranaje se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para garantizar el buen funcionamiento de las piezas impresas [21], [23].

- Entre mayor diámetro, mayor precisión y resistencia
- Para relaciones superiores a 5:1 se recomienda hacerlas en dos o tres etapas
- Para engranajes con ángulo de presión de 20, no usar menos de 13 dientes para que tengan el contacto mínimo para un óptimo trabajo de los engranajes
- Al obtener engranajes por medio de FDM se requiere un corto tratamiento posterior a la impresión, en donde uno de los problemas más comunes es el agujero central del engranaje, este puede ser afectado por distintos factores externos tales como el material de impresión, la maquina usada para en el proceso o el software de impresión. Para solventar esto es recomendable establecer un diámetro inferior al requerido con el fin de ampliarlo, posterior a la impresión hasta lograr la dimensión requerida.

- Cuando se establece un engranaje con el 100% de relleno se pueden llegar a generar espacios no deseados en el mismo, esto se puede solucionar con el aumento de las capas de impresión para así evitar este fenómeno de impresión.
- Para engranajes que no cuenten con una pared firme se recomienda hacer una configuración de al menos 3 capas de perímetro, esto para darle una mayor solidez al engranaje y de ser posible con una altura de capa fina, mejorando la resistencia del engranaje en el eje Z.
- Con respecto a la cantidad de dientes que se van a implementar en los engranajes, depende únicamente de la relación de transmisión que se requiera, sin embargo hay que tener en cuenta estas recomendaciones de engranajes obtenidos por FDM. Con esta tecnología es recomendable usarla para relaciones de 0,2 – 5, en el dado caso que se requiera una relación de transmisión mayor se recomienda hacerla de dos o más etapas. Ya que las impresoras de FDM no son óptimas en objetos muy pequeños se recomienda hacer los engranajes con la mayor cantidad de dientes posibles, con un mínimo de 13 dientes para ángulos de presión de 20° o de 9 dientes para Angulo de presión de 25°.
- Como toda pieza rodante es necesario contar con un sistema de fijación al eje de giro al cual va a estar acoplado el engranaje, para esto se recomienda la implementación de alguno de estos sistemas de fijación tales como: Eje estriado, Tornillo de fijación, Cabeza hexagonal empotrada.
- En la manufactura industrial es más que sabido que los materiales tienen un papel fundamental en las características mecánicas y geométricas de las piezas, esta no es la excepción ya que en la AM hay una serie de materiales polímeros con características favorables en la obtención de engranajes como son: Nylon, PLA, ABS, PETG.
- Por último, la lubricación de los engranajes es muy importante, al estar hechos de materiales polímeros no quiere decir que no se puedan lubricar o que no es necesario la lubricación, ya que esta tiene un factor importante en la vida útil de las piezas y en mejorar la transmisión del sistema. Para engranajes obtenidos por FDM se recomienda el uso de grasa pesada, Litio blanco, PTFE o silicona, ya que lo importante es tener las piezas lubricadas con el fin de mejorar su funcionamiento y alargar la vida útil del mismo.

2.6 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

De lo mostrado en el capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Es importante generar nuevos conocimientos en los parámetros de impresión para engranajes rectos obtenidos por medio de FDM, para ayudar a futuras mejoras y así ampliar el uso de esta tecnología en la manufactura de engranajes.
- Se observó que actualmente los engranajes rectos fabricados por FDM no son utilizados para diversas aplicaciones debido a que estos se encuentran limitados por la resistencia mecánica y por la falta de precisión.
- Frente a la evidencia recaudada, las investigaciones actuales con respecto a engranajes rectos fabricados por el método de FDM, están enfocadas en asegurar las medidas nominales, realizando interacciones con el modelo CAD.
- Con la interacción de los parámetros de impresión en el software para FDM se pueden llegar a mejorar considerablemente el resultado mecánico y geométrico de los engranajes obtenidos.
- Finalmente, los proyectos más complejos que involucran a la impresión por FDM, resalta la importancia en la mejora de la precisión geométrica de las piezas obtenidas con esta.

3 DISEÑO EXPERIMENTAL

La experimentación, está efectuándose constantemente en los procesos de ingeniería como, producción, diseño, desarrollo de procesos y productos, ayudando a su fabricación o mejora. Un buen diseño experimental recauda la información necesaria para el cumplimiento del propósito establecido en el experimento. A continuación, se presenta el proceso de elección y organización del diseño experimental para este caso de estudio.

3.1 SELECCIÓN DE FACTORES Y NIVELES DE DISEÑO DE LOS ENGRANAJES RECTOS

Los factores están seleccionados según el tipo de engranajes que se está estudiando ya que estos son los que definen geométricamente a los engranajes rectos, así mismo para los niveles de diseño se tendrá en cuenta las restricciones del programa Z-SUITE, tiempo y recursos del proyecto.

3.1.1 MÓDULO

El módulo de los engranajes está definido por la relación del diámetro primitivo con el número de dientes que cuenta el engranaje. El módulo determina el tamaño de los dientes en los engranajes con la finalidad de que ensamblen con el piñón del mismo módulo según la relación establecida[24]. El módulo está descrito por la ecuación mostrada a continuación.

$$m = \frac{d}{N}$$

Ecuación 1. Módulo, **Fuente:** [24].

Donde:

m = módulo

d = diámetro de paso

N = número de dientes

Al ser una característica de diseño se proporcionarán de forma específica los módulos a trabajar en este diseño experimental.

3.1.2 NUMERO DE DIENTES

El número de dientes en un engranaje es fundamental, ya que estos van a transmitir el movimiento entre las piezas. Los dientes de un engranaje son el corazón de este, los cuales cuentan con una serie de parámetros de diseño para determinar el número mínimo en el engranaje para no tener interferencia (Ver Ecuación 2).

$$N_p = \frac{2k}{3\sin^2 \varphi} (1 + \sqrt{1 + 3\sin^2 \varphi})$$

Ecuación 2. Número de dientes, **Fuente:** [24].

Donde:

N_p = número de dientes

$K = 1$ en casa de dientes de profundidad completa; 0,8 en el de dientes cortos

φ = Angulo de presión

Teniendo en cuenta esto, el número mínimo de dientes de un engranaje para un funcionamiento sin interferencia, es de 13 dientes. En el caso que el engranaje acoplado tenga más dientes que el piñón, es decir $N_p = m$, el número mínimo de dientes del piñón para que no tengan interferencia en el movimiento se muestra a continuación.

$$N_p = \frac{2k}{(1 + 2m)\text{sen}^2 \varphi} \left(m + \sqrt{m^2 + (1 + 2m)\text{sen}^2 \varphi} \right)$$

Ecuación 3. Numero de dientes mínimo, **Fuente:** [24].

Donde:

N_p = número de dientes

m = modulo del engranaje

$K = 1$ en casa de dientes de profundidad completa; 0,8 en el de dientes cortos

φ = Angulo de presión

En este proyecto se trabajarán engranajes con dientes de profundidad completa y un ángulo de presión de 20° , por lo cual se debe asegurar que tengan más de 13 dientes [24]. Teniendo en cuenta esto se proporcionará de forma específica el número de dientes a trabajar en este diseño experimental.

3.1.3 ANCHO DE LA CARA

El ancho de la cara de los engranajes está ligado al diseño de un par de engranajes. El ancho mínimo del engranaje va a estar determinado por las cargas mecánicas a las que estará sometido [24]. Se desea estudiar el efecto geométrico en las 3 dimensiones X,Y (Base) y Z (altura) lo cual hace importante tomar el ancho de la cara como un factor de partida. Para este proyecto, se determinarán anchos de cara arbitrarios con el fin de observar el cambio de la geometría de los engranajes cuando se cambie este factor.

3.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE ENGRANAJES RECTOS POR MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA CON LA ZORTRAX M300

Los parámetros de impresión están determinados por el software Z-SUITE que sirve como puente de modelos CAD con la impresora 3D para el post proceso de fabricación de las piezas. A continuación, se describen los parámetros de fabricación que se tendrán en cuenta en el software, sobre todo cuando los parámetros están directamente relacionados con las características geométricas obtenidas en los engranajes rectos.

3.2.1 ESPESOR DE CAPA

El espesor de la capa del modelo es el parámetro el cual tiene mayor influencia en la pieza tanto mecánica como geométrica, debido a que restringe el cambio de geometría en cada una de las capas. Al tener un menor espesor de capa se obtienen geometrías con mayor resolución (Ver Figura 6). Por esta razón, al variar el espesor de capa en los parámetros de impresión de la pieza, hace que aumente o disminuya el tiempo de impresión [25].

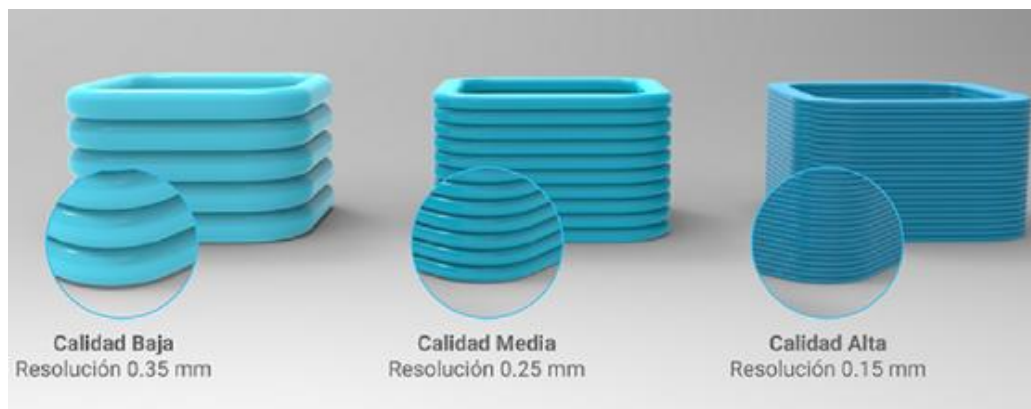


Figura 6. Espesor de capa, **Fuente:**[26].

La compañía ZORTRAX S.A. permite la variación de este parámetro de (0,14 mm), (0,19 mm) y (0,29 mm) Teniendo esto en cuenta se establecerán los valores de (0,14 mm), (0,29 mm) como niveles y (0,19 mm) como el punto medio.

3.2.2 DENSIDAD DE RELLENO

Es el espacio vacío dentro de la estructura que se imprime, es decir el porcentaje de relleno. En la FDM se determina por la cantidad de espacio que hay en cada filamento, este parámetro se puede variar según el fin de la impresión, La variación de este parámetro está directamente relacionado a la cantidad de material gastado y el tiempo de impresión. En la Figura 7 se muestra una representación gráfica de la densidad de relleno en las piezas obtenidas por FDM.

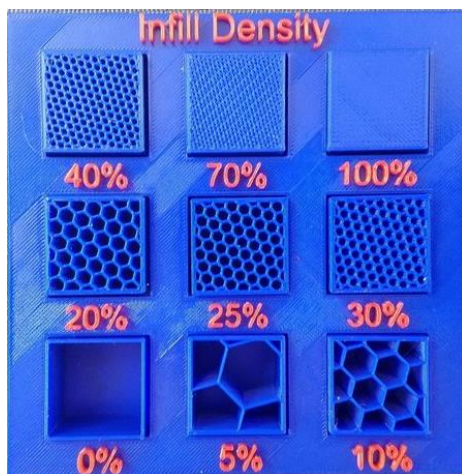


Figura 7. Densidad de relleno, **Fuente:**[27].

La compañía ZORTRAX S.A. permite la variación de este parámetro de 0% -100%. Teniendo esto en cuenta se establecerán los valores de 30% y 70% como niveles y del 50% como el punto medio.

3.2.3 CANTIDAD DE CAPAS SUPERIOR E INFERIOR

La cantidad de capas superior e inferior son complementos de soporte para la pieza de impresión en el plano XY, esto indica la cantidad de capas solidas que tendrá la pieza al inicio y al final de la impresión. Haciendo que piezas con menor densidad de relleno o sin relleno obtengan un mayor soporte y consistencia.

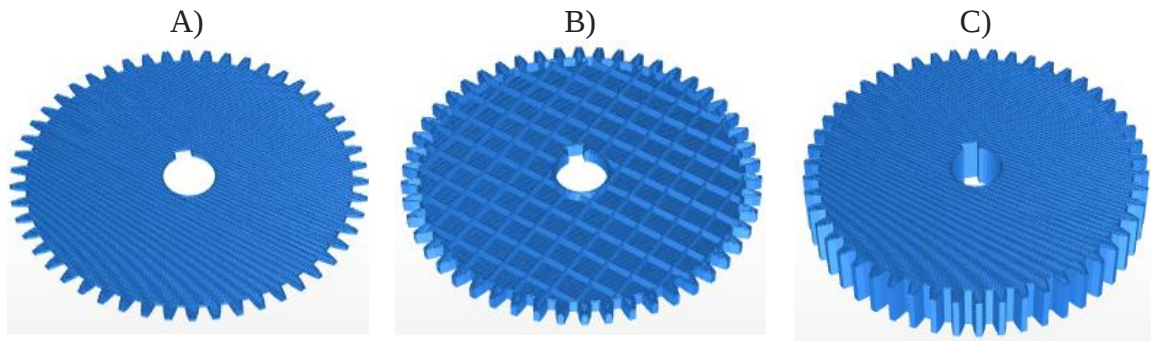


Figura 8. A) Capas inferiores, B) Relleno de pieza, C) capas Superior, **Fuente:** El Autor.

La compañía ZORTRAX S.A. permite la variación de este parámetro de 2-7 capas Teniendo esto en cuenta se establecerán los valores de 3, 6 capas como niveles y 5 capas como el punto medio.

3.2.4 CALIDAD DE IMPRESIÓN

La calidad de impresión es la apariencia física del acabado superficial de la pieza obtenida por medio de FDM, la cual aumenta el tiempo de impresión y el acabado superficial de la misma. El Software Z-ZUITE cuenta con tres distintos parámetros los cuales son **Alta**, **Normal** y **Trabajo**. Para efectos de este proyecto se estableció **Alta** y **Trabajo** para los niveles y **Normal** como punto medio.

3.3 VARIABLES DE RESPUESTA

Con el fin de cumplir los objetivos de la investigación efectuada, es necesario seleccionar la información adecuada con datos cuantitativos que conlleven a un análisis con métodos estadísticos, para así llegar a conclusiones objetivas en los efectos de los parámetros de impresión en la geometría de engranajes rectos impresos por FDM.

3.3.1 CIRCUNFERENCIA DE CABEZA O EXTERIOR

La circunferencia de cabeza en un engranaje, Está establecida por entradas predeterminadas de diseño al momento de realizar un engranaje, por el modulo y el número de dientes del engranaje[28]. Estará sometida a metrología posterior a la impresión de cada uno de los engranajes del diseño experimental (Ver Figura 9).

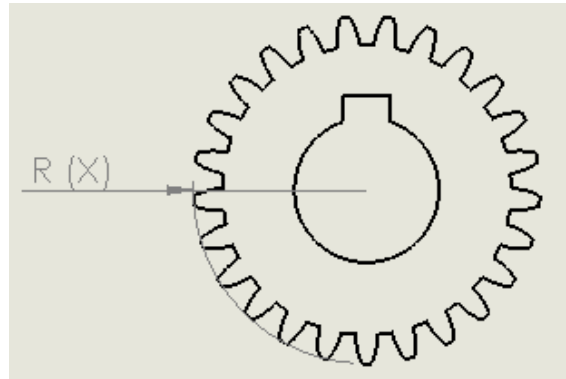


Figura 9. Circunferencia de cabeza, **Fuente:** El Autor.

3.3.2 PERFIL DE LOS DIENTES

El perfil de los dientes de los engranajes es fundamental para la vida útil, ya que al tener un perfil de diente correcto se logra distribuir las cargas en la transmisión de potencia y no generen un daño causado por las micro grietas según la cantidad de ciclos de trabajo [29]. Para efectos de estudio de este proyecto se analizarán el perfil de los dientes de los engranajes rectos obtenidos, con ayuda de un proyector de perfiles el cual es un activo de la Universidad Santo Tomas.

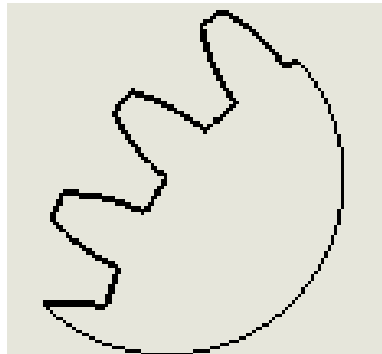


Figura 10. Perfil del diente, **Fuente:** El Autor.

3.3.3 ANCHO DE CARA

El ancho de la cara de un engranaje puede ser determinado arbitrariamente, sin embargo al momento de estar realizando el diseño de un par de engranajes para una transmisión de potencia, es necesario tener este parámetro en cuenta, ya que hay un rango de cumplimiento establecido por el Factor de distribución de carga. Para efecto de estudio de este proyecto y por estar enfocado a la geometría final de los engranajes rectos obtenidos por FDM se determinaron 10 mm y 20 mm para los niveles y 20 mm como punto medio (Ver Figura 11).



Figura 11. Ancho de cara, **Fuente:** El Autor.

3.3.4 CIRCUNFERENCIA DEL AGUJERO

La circunferencia del agujero de un engranaje depende netamente del eje encargado de transmisión de la potencia al cual será acoplado el engranaje, este puede variar según la necesidad, entorno, material de elaboración y criterios del diseño. Para efectos de estudio de este proyecto se escogió un diámetro de 9 mm para todos los engranajes del diseño experimental (Ver Figura 12).

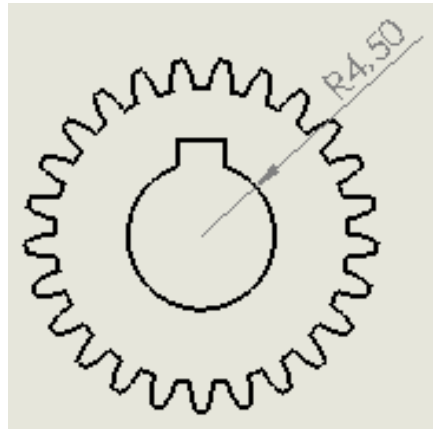


Figura 12. Diámetro del agujero, **Fuente:** El Autor.

3.3.5 CHAVETA

La chaveta en los agujeros es el sistema de acoplamiento en los sistemas de transmisión de potencia, ya que sin este mecanismo el eje y el agujero del engranaje no podrían acoplarse y no se haría la transmisión del movimiento (Ver Figura 13).

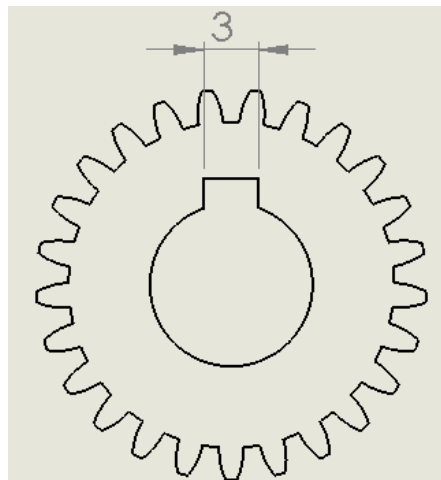


Figura 13. Chaveta del agujero, **Fuente:** El Autor.

3.4 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Teniendo en cuenta la selección de factores y niveles de diseño con las variables de respuesta que fueron escogidos para el desarrollo del proyecto, Se procede a la aplicación del diseño experimental en donde se tendrá en cuenta el tamaño de la muestra, se designa el orden de corridas de los ensayos experimentales teniendo en cuenta las restricciones.

3.4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL FRACCIONADO

El diseño experimental factorial fraccionado es una variación del diseño factorial en el cual está basado. Este permite tener varios factores con el fin de analizar las posibles combinaciones de los niveles de diseño establecidos [30].

$$niveles^{Factores} = \# \text{ de corridas}$$

Ecuación 4. Número de corridas, Fuente: [30].

La Ecuación 4 describe la aplicación del diseño factorial el cual tiene en cuenta el efecto de cada uno de los factores en las variables de respuesta [30]. El diseño experimental factorial fraccionado se aplica cuando el número de corridas sean demasiadas y haga que no sea viable para la elaboración del proyecto, para esto se implementa un subconjunto de corridas descartando estratégicamente ciertas combinaciones.

Es de importancia identificar las combinaciones a realizar, puesto que no se debe descartar combinaciones que tengan un alto efecto en las variables de respuesta, ya que esto terminaría en un análisis sin confiabilidad.

3.4.2 APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL FRACCIONADO

El diseño factorial fraccionado a trabajar consta de siete factores con tres niveles de diseño cada uno como, se muestra en la Tabla 1.

FACTORES	NIVELES		
	Mínimo	Máximo	Medio
Modulo (#)	0,8	1,25	1
Numero de dientes (#)	25	50	37
Ancho del engranaje (mm)	10	20	20
Espesor de capa (mm)	0,14	0,29	0,19
Numero de contornos (#)	3	6	5
Porcentaje de relleno (%)	30	70	50
Calidad de impresión	Trabajo	Alta	Normal

Tabla 1. Factores y niveles de diseño experimental, **Fuente:** El Autor.

Teniendo en cuenta que un diseño experimental completo de 7 factores y 3 niveles da un total de 2187 combinaciones lo cual es prohibitivo para este trabajo de grado, se usará un diseño factorial de 1/8 de 2^7 (dos niveles y siete factores) con punto central. Este tamaño de diseño experimental fue determinada teniendo en cuenta, que un diseño experimental debe contar

con un número mínimo de corridas las cuales deben ser (el número de factores + 1), de lo cual 2^8 queda muy justo con (9 corridas) y 2^6 con (34 corridas) esto no se acoplaba a las restricciones de recursos y tiempo del proyecto. Las combinaciones de factores para este diseño se muestran en la Tabla 2.

Orden Standard	Orden de Corridas	Modulo	Numero dientes	Ancho engranaje	Espesor capa	Numero contornos	Porcentaje relleno	calidad de impresión
1	4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	10	1	1	-1	-1	1	-1	1
3	12	-1	1	-1	-1	1	1	-1
4	1	1	1	-1	-1	-1	1	1
5	2	-1	-1	1	-1	1	1	1
6	8	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	16	-1	1	1	-1	-1	-1	1
8	3	1	1	1	-1	1	-1	-1
9	6	-1	-1	1	1	-1	1	1
10	11	1	-1	-1	1	1	1	-1
11	15	-1	1	-1	1	1	-1	1
12	13	1	1	-1	1	-1	-1	-1
13	7	-1	-1	1	1	1	-1	-1
14	5	1	-1	1	1	-1	-1	1
15	14	-1	1	1	1	-1	1	-1
16	9	0	0	1	0	0	0	0

Tabla 2. Niveles de diseño factorial de $1/8$ de 2^7 (dos niveles y siete factores) con punto central.

Fuente: El Autor.

Las corridas que se muestran en la Tabla 2 son las más relevantes en la reducción del diseño experimental, estas son obtenidas con la ayuda del programa especializado de estadística Minitab, el cual elimina estratégicamente corridas con combinaciones similares dejando las más relevantes para llevar a cabo el diseño experimental. Al introducir los niveles propuestos en la Tabla 1. Factores y niveles del diseño experimental, se obtienen las corridas o pruebas de los engranajes que se deben fabricar y que se indican en la Tabla 3.

Nombre	Modulo	Numero dientes	Ancho engranaje		Espesor capa (mm)	Numero contorno	Porcentaje relleno	calidad de impresión
J 1	0,8	25	10	mm	0,14	3	30	trabajo
J 2	1,25	25	10	mm	0,14	6	30	alta
J 3	0,8	50	10	mm	0,14	6	70	trabajo
J 4	1,25	50	10	mm	0,14	3	70	alta
J 5	0,8	25	20	mm	0,14	6	70	alta
J 6	1,25	25	20	mm	0,14	3	70	trabajo
J 7	0,8	50	20	mm	0,14	3	30	alta

Nombre	Modulo	Numero dientes	Ancho engranaje		Espesor capa (mm)	Numero contorno	Porcentaje relleno	calidad de impresión
J 8	1,25	50	20	mm	0,14	6	30	trabajo
J 9	0,8	25	10	mm	0,29	3	70	alta
J 10	1,25	25	10	mm	0,29	6	70	trabajo
J 11	0,8	50	10	mm	0,29	6	30	alta
J 12	1,25	50	10	mm	0,29	3	30	trabajo
J 13	0,8	25	20	mm	0,29	6	30	trabajo
J 14	1,25	25	20	mm	0,29	3	30	alta
J 15	0,8	50	20	mm	0,29	3	70	trabajo
J 16	1	37	20	mm	0,19	5	50	normal

Tabla 3. Características de los engranajes a realizar por FDM, **Fuente:** El Autor.

Finalmente se obtendrán dieciséis (16) engranajes en total, es decir, quince engranajes con niveles de mínimo, máximo y uno como punto central de comparación, con el fin de conocer los efectos de los parámetros de impresión según el diseño experimental propuesto.

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

De lo mostrado en el capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Los factores y niveles del diseño experimental seleccionados son: [0,8], [1,25] y [1] para el modulo; [25], [50] y [37] para el numero de dientes; [10 mm], [20 mm] y [20 mm] para el ancho del engranaje; [0,14 mm], [0,29 mm] y [0,19 mm] para el espesor de capa; [3], [6] y [5] para el número de contornos; [30%], [70%] y [50%] para el porcentaje de relleno; y calidad de impresión de Trabajo, Alta y Normal.
- Se tuvo en cuenta los factores de diseño modulo, numero de dientes y ancho los que definen la geometría del engranaje de forma teórica, por ende los Factores definen lo que es la geometría de estudio del modelo CAD y también de los engranajes 3D, por otro lado los niveles definen el tamaño permitido para este proyecto de grado.
- Como variables de respuesta de la experimentación se tendrá en cuenta la metrología de: circunferencia de cabeza o exterior, perfil de los dientes, ancho de cara, circunferencia del agujero y chaveta.
- Se seleccionó un diseño experimental factorial fraccionado para lograr analizar las combinaciones más relevantes entre los factores y observar el efecto de cada uno en las variables de respuesta para un total de 16 corridas.

4 FABRICACIÓN DE ENGRANAJES RECTOS MEDIANTE FDM

Al definir el diseño experimental de los engranajes rectos se procede a modelar y manufacturar las piezas, con la impresora ZORTRAX M300 con el material Z-HIPS los cuales son activos del SENA complejo sur en donde se realizó la manufactura con el apoyo del ingeniero a cargo del área, Armando Salgado.

Para generar los modelos de engranajes establecidos en el diseño experimental, se utilizó el *software* SOLIDWORKS 2016. Obteniendo los archivos STL para el post proceso en el *software* Z-SUITE, para los parámetros de impresión establecidos en la (Tabla 3).

4.1 MODELOS CAD DE ENGRANAJES RECTOS

Para realizar la impresión 3D de piezas se requiere un modelo geométrico generado en un programa de modelado asistido por computadora (CAD) en formato STL para el postproceso y posterior impresión [31]. El *software* usado para la elaboración de los modelos CAD fue *SOLIDWORKS* 2016. En dicho *software* y con la ayuda de la biblioteca de diseño, se generaron los engranajes atendiendo a un diseño experimental de tres factores (Módulo, Número de dientes y Espesor) con dos niveles y punto central como se ve en la Tabla 4.

Nombre	Modulo	Numero de Dientes	Espesor	
1	0,8	25	10	mm
2	0,8	50	10	mm
3	0,8	25	20	mm
4	0,8	50	20	mm
5	1,25	25	10	mm
6	1,25	50	10	mm
7	1,25	25	20	mm
8	1,25	50	20	mm
9	1	37	20	mm

Tabla 4. Características de los engranajes rectos elaborados en CAD, **Fuente:** El Autor.

A continuación se presentará un paso a paso del proceso de la generación de los modelos:

- Estando en la pantalla principal se procede a ingresar a la biblioteca de diseño (señalada en rojo) ubicada en el costado derecho, se selecciona la pestaña de *Toolbox* (señalada en verde).

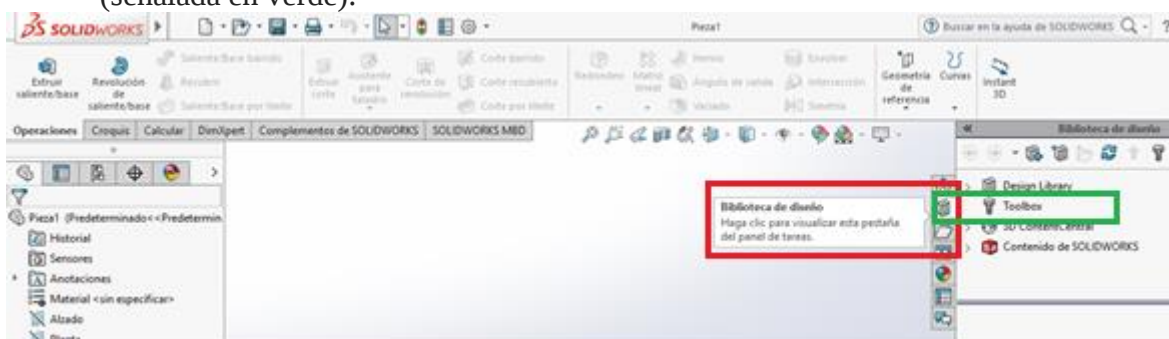


Figura 14. Pantalla principal de SolidWorks, **Fuente:** El Autor.

- Observará la opción Agregar ahora (Ver Figura 15 A), se selecciona el sistema de unidades en el cual deseamos trabajar el cual es Ansi Metric (Ver Figura 15 B).

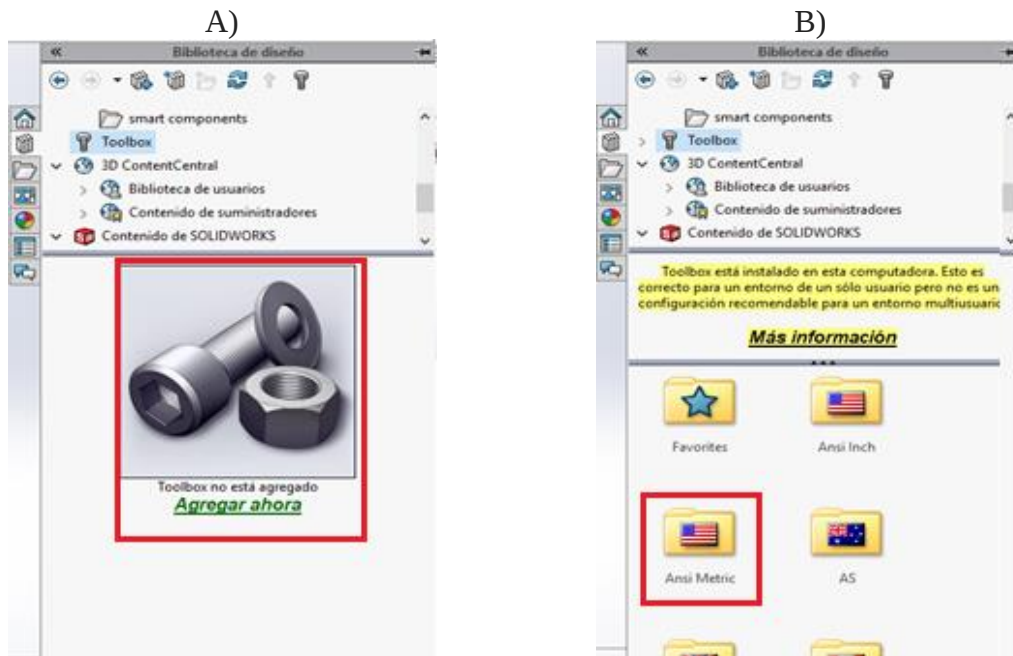


Figura 15. Opciones de la Toolbox, **Fuente:** El Autor.

- Después de establecer el sistema de unidades en el cual vamos a trabajar, se elige Transmisión de potencia (Ver Figura 16 A), posteriormente engranajes (Ver Figura 16 B). De ahí, la opción se selecciona engranajes rectos (Ver Figura 16 C).

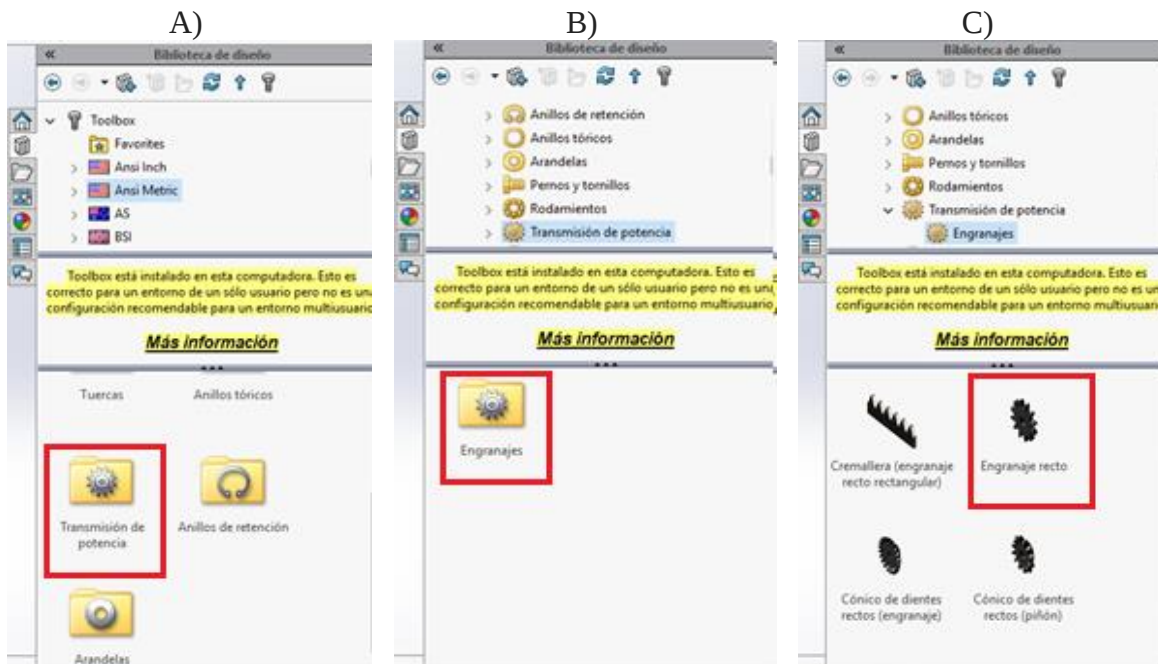


Figura 16. Opciones seleccionadas, **Fuente:** El Autor.

- En la caja de diálogo (Ver Figura 17), se modifican las propiedades del componente según los modelos de los engranajes que están definidos por el diseño experimental de la Tabla 3 para obtener el modelo CAD de cada uno de los modelos que se requieren.

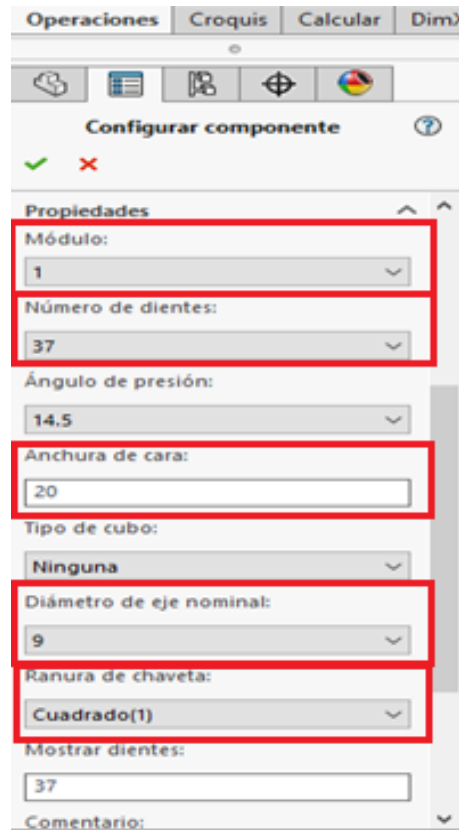


Figura 17. Configuración de componente, **Fuente:** El Autor.

- Después de obtener los modelos CAD de los engranajes, en base a la (Tabla 4), los cuales están definidos en el diseño experimental y se trabajaran sin realizar ninguna modificación en los mismos, para no generar mas variables experimentales y ver el efecto directo de los parámetros de impresión en los engranajes rectos, posterior se procede a exportarlos en archivos STL para el pos proceso.

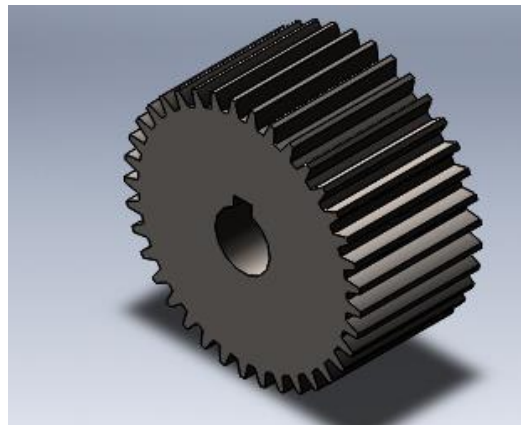


Figura 18. Engranaje resultante, **Fuente:** El Autor.

4.2 GENERACIÓN DE ARCHIVOS PARA LA IMPRESIÓN DE ENGRANAJES RECTOS POR FDM

Se inicia el postproceso de los modelos CAD en formato STL en el *software* Z-SUITE propio de la marca, para generar archivos aptos para la impresora ZORTRAX M300. La cual se implementara en la manufactura de los engranajes.

A continuación se presentará un paso a paso del proceso de la generación de los archivos:

- Observara distintas opciones de impresoras 3D (Ver **Figura 19**), se selecciona la máquina que deseamos para crear el proyecto, la cual es ZORTRAX M300.

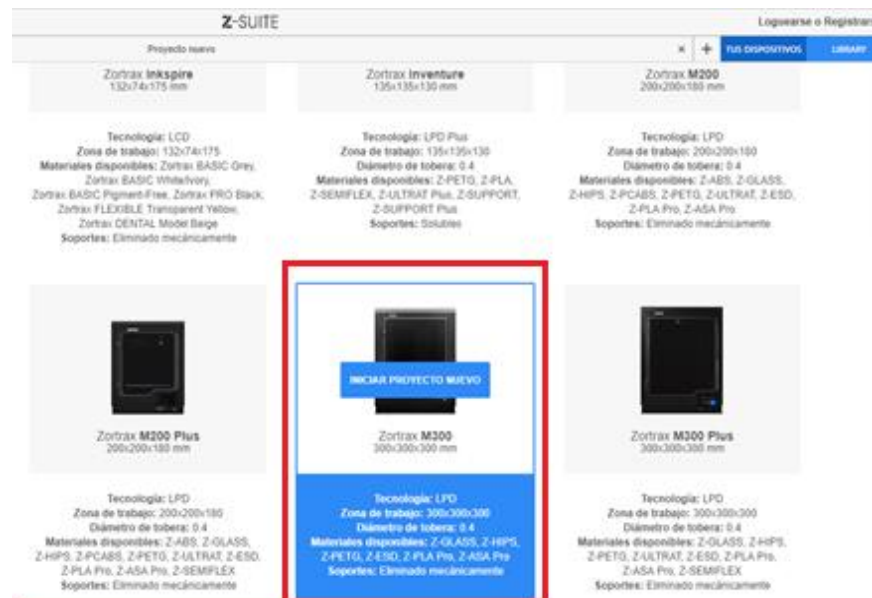


Figura 19. Selección de la impresora, **Fuente:** El Autor.

- Abrirá el archivo en formato STL, para visualizar la ubicación en la plataforma de impresión.

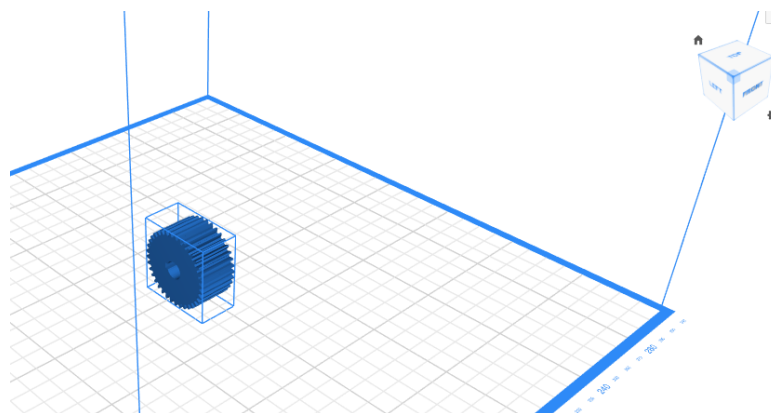


Figura 20. Importación del engranaje, **Fuente:** El Autor.

- El programa le permite establecer la posición de impresión de la pieza. Para este proyecto todos los modelos de engranajes tendrán esta ubicación (Ver Figura 21).

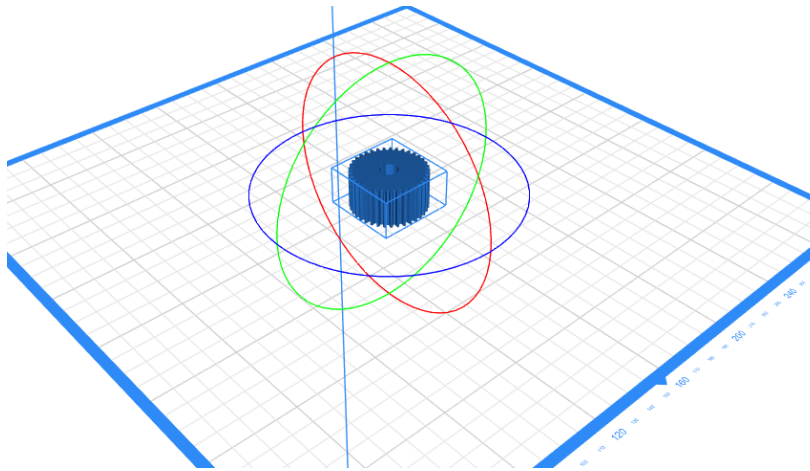


Figura 21. Rotación del engranaje, **Fuente:** El Autor

- Después de establecer la ubicación, se dirige al panel de Configuración (en verde) y se elige configuración Avanzada (en rojo), donde muestra los parámetros de impresión.

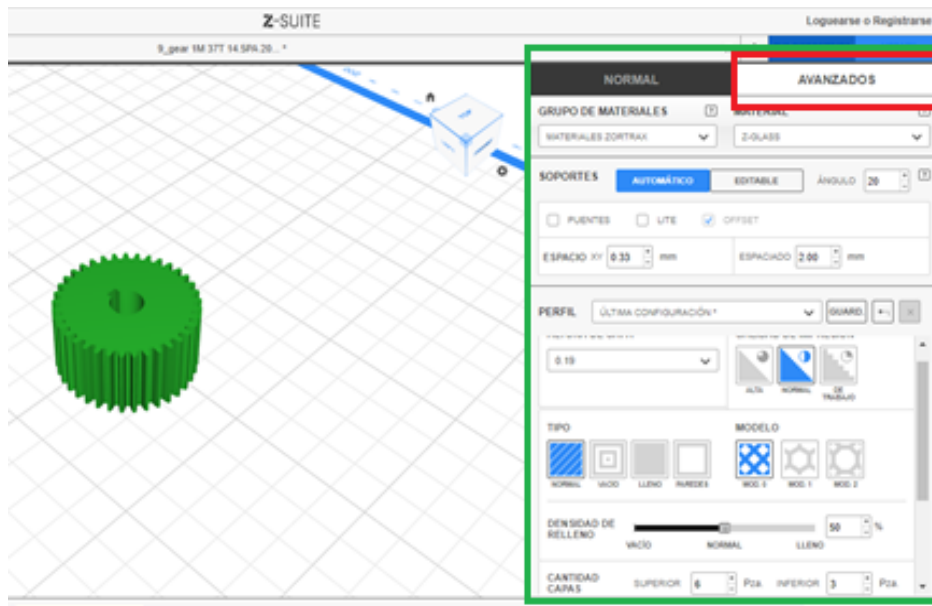


Figura 22. Configuración de impresión, **Fuente:** El Autor

- En la caja de dialogo (Ver Figura 23), se modifican los parámetros de impresión según los modelos de los engranajes que están definidos por el diseño experimental de la Tabla 3.

NORMAL

AVANZADOS

GRUPO DE MATERIALES ?

MATERIAL ?

MATERIALES ZORTRAX

Z-GLASS

SOPORTES

AUTOMÁTICO

EDITABLE

ÁNGULO 20

☐ PUENTES

☐ LITE

☒ OFFSET

ESPACIO XY 0.33 mm

ESPACIADO 2.00 mm

PERFIL

ÚLTIMA CONFIGURACIÓN *

GUARD.

←

×

ALTURA DE CAPA

0.19

CALIDAD DE IMPRESIÓN

ALTA

NORMAL

DE TRABAJO

TIPO

NORMAL

VACÍO

LLENO

PAREDES

MODELO

MOD. 0

MOD. 1

MOD. 2

DENSIDAD DE RELLENO

VACÍO

NORMAL

LLENO

50 %

CANTIDAD CAPAS

SUPERIOR 6 Pza.

INFERIOR 3 Pza.

OFFSET

CONTORNO EXTERIOR 0.00 mm

ORIF. 0.00 mm

COSTURA

☒ NORMAL

☐ ALEATORIO

VELOCIDAD DE VENTILADORES

☒ AUTO

Figura 23. Parámetros de impresión, **Fuente:** El Autor

A continuación, se muestra una tabla explicando los parámetros de impresión relacionada con los factores de diseño propuestos para la manufactura de los modelos de engranajes según el diseño experimental.

Parámetros de impresión	Factores de diseño
Material	Permite Seleccionar si el material propio de la compañía ZORTRAX o externo, para establecer condiciones de temperatura y velocidad de avance.
Altura de capa	Es el espesor de cada una de las capas que conforman la pieza, para este proyecto serán (0.14 – 0.19 – 0.29) mm
Calidad de impresión	Es la calidad superficial de la pieza impresa, el cual está establecido por el <i>Software</i> . Para este proyecto serán (trabajo, normal y alta).
Tipo	Es la configuración del relleno de la pieza impresa, el <i>Software</i> cuenta con (normal, vacío y lleno). Para este proyecto será Normal.
Modelo	Está relacionado únicamente con el parámetro de Tipo – Normal, el cual nos indica la configuración geométrica del relleno, el <i>Software</i> cuenta con (cuadrado (MOD.0), panel (MOD.1) y mixto (MOD.2). Para este proyecto será el cuadrado (MOD.0)
Densidad de relleno	Está relacionado únicamente con el parámetro de Tipo – Normal, el cual indica la cantidad de volumen total de material que tendrá la pieza impresa, el <i>Software</i> lo establece mediante porcentajes de 10-100%. Para este proyecto serán (30%, 50% y 70%).
Cantidad de capas	Establece la cantidad de capas superior e inferior que tendrá el modelo impreso antes de realizar el relleno. Para este proyecto se usaran (3, 6 y 5) para la capa superior e inferior.

Tabla 5. Parámetros de impresión implementados, **Fuente:** El Autor

- Después de establecer los parámetros de impresión que deseamos trabajar en cada modelo, se selecciona VISTA (mostrado en rojo) en donde se contenía con el proceso de configuración.

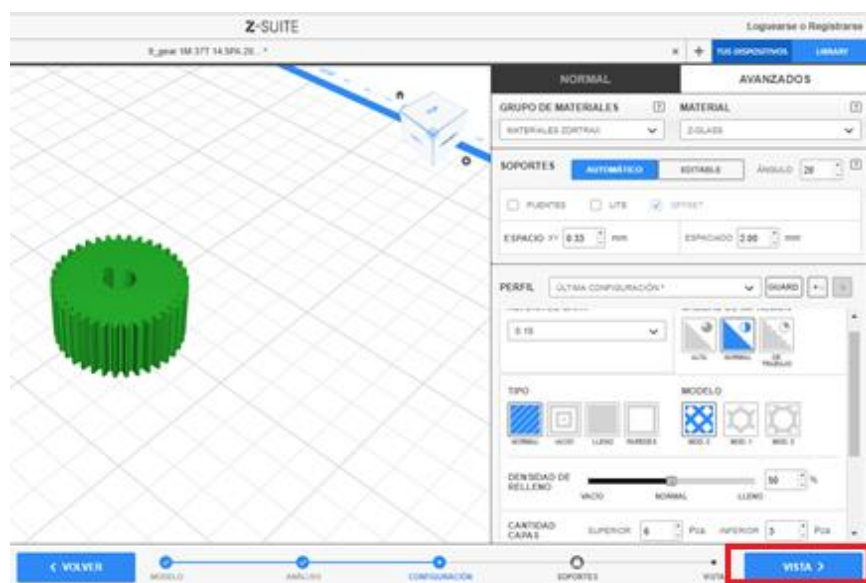


Figura 24. Avance en la configuración de impresión, **Fuente:** El Autor.

- El *software* muestra la simulación del proceso de impresión, tiempo de impresión, cantidad de filamento requerido en metros y gramos y un resumen de la configuración establecida en el modelo, señalado en rojo.

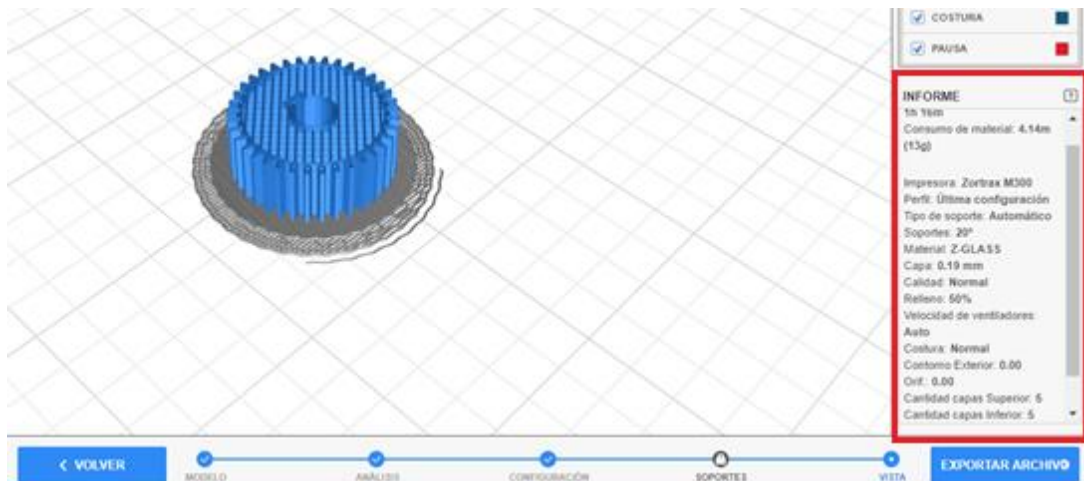


Figura 25. Verificación de impresión, **Fuente:** El Autor

- Después de obtener los archivos *Zortrax Printing Code* para la impresión en base a la (Tabla 3) del diseño experimental, se procede a guardarlos en la SD Card e ingresarlos a la ZORTRAX M300 para el postproceso.

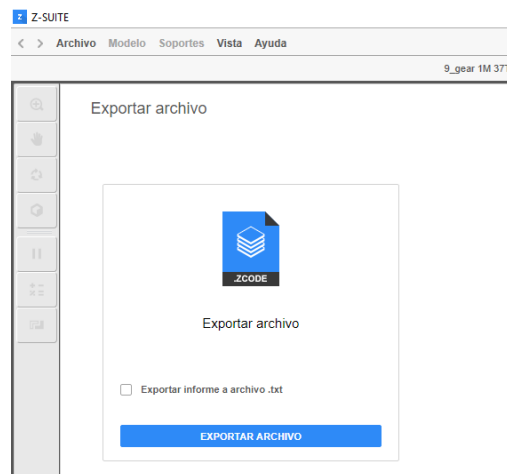


Figura 26. Tipo de archivo, **Fuente:** El Autor

4.3 IMPRESIÓN DE ENGRANAJES EN LA ZORTRAX M300

La tecnología implementada en la impresión de los engranajes fue FDM (deposición de material fundido). Esta es una tecnología de la AM la cual es implementada para la creación de prototipos y partes mecánicas en la industria. Esta consiste en la extrusión de material por medio de una boquilla, el cual es depositado en capas en el plano horizontal avanzando el eje vertical hasta completar el modelo 3D [12].

Para la impresión de los modelos de engranajes, se empleó la maquina Zortrax M300, activo del SENA complejo sur (Ver Figura 27), donde se realizó la manufactura de estos. Las especificaciones de la maquina se muestran en la Tabla 6.



Figura 27. Zortrax M300. **Fuente:** matterhackers [32]

Nombre	Zortrax
Modelo	M300
Tecnología	FDM
Volumen de impresión	30 X 30 X 30 cm
Área de impresión	30 X 30 cm
Máxima temperatura de la boquilla	290 °C
Diámetro de la boquilla	0,4 mm (0,015 in)
Máxima temperatura de la plataforma	105 °C
Peso	30 Kg
Filamentos Compatibles	Z-PLA, Z-HIPS, Z-GLASS, Z-PETG y externos
Diámetro del material	1,75 mm (0,069 in)
Resolución de impresión	90-290 micróns
Conectividad	Tarjeta SD
Dimensiones	49 X 56 X 59 cm
Software	Z-Suite
Sistema operativo compatible	Windows, Mac OS

Tabla 6. Características de impresora Zortrax M300. **Fuente:** [33].

Después de exportar el modelo CAD en formato STL los cuales se parametrizaron en el *Software* Z-Suite para la impresión de los modelos de engranajes. Fueron almacenados en una tarjeta SD que se insertó en la impresora Zortrax M300 para iniciar el proceso de impresión, en donde se manufacturaron los engranajes establecidos en el diseño experimental (Ver Tabla 3).

El material de impresión de los engranajes implementado en este proyecto fue Z-HIPS, el cual cuenta con propiedades de baja contracción y resistencia mecánica. Está diseñado para la elaboración de prototipos funcionales y piezas mecánicas, por lo cual fue implementado para la impresión de los modelos de engranajes (Ver Figura 28).



Figura 28. Materia Z-HIPS, **Fuente:** El Autor.

Al momento de tener los archivos *Zortrax Printing Code* en la SD Card, se procede a ingresar la memoria a la máquina (Ver Figura 29 A) y dar inicio a la impresión del modelo (Ver Figura 29 B). Posterior se inicia el proceso de calentamiento del extrusor y la cama caliente de la impresora (Ver Figura 29 C).

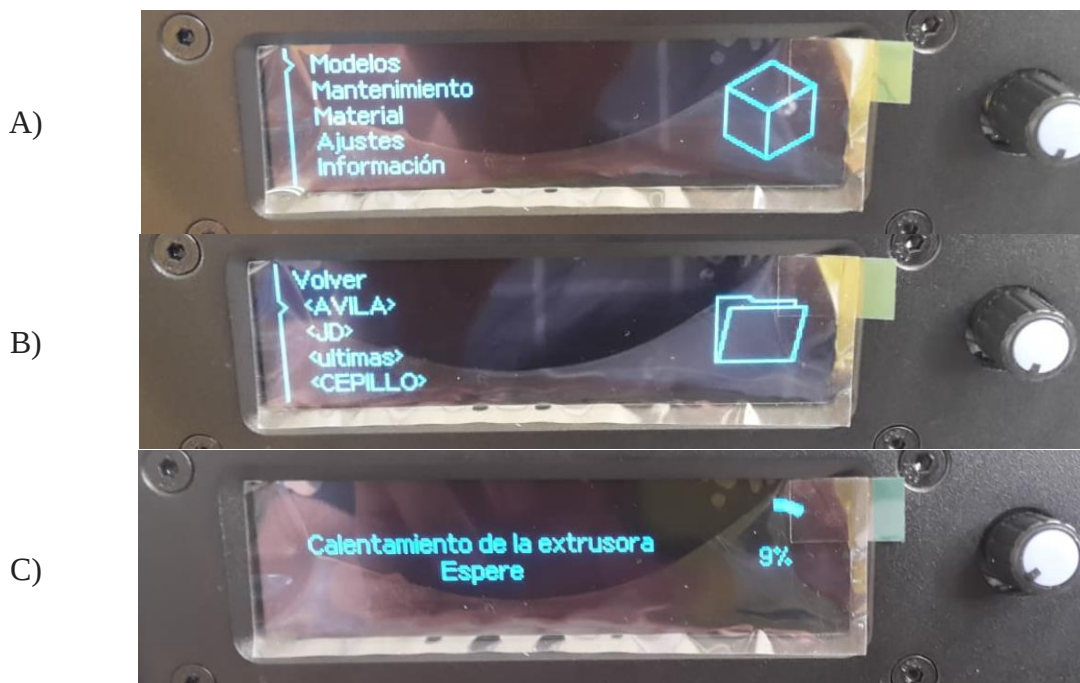


Figura 29. A) Menú de la impresora, B) archivos disponibles en la SD Card, C) calentamiento de la extrusora. **Fuente:** El Autor.

Después de iniciar el proceso de impresión la maquina se ajusta con los parámetros de impresión establecidos para el modelo. Partiendo con las temperaturas de la plataforma y la boquilla, continua retirando el material almacenado en la boquilla y realizando un soporte de impresión llamado Draft, el cual se retira fácilmente al terminar la pieza. La impresión de los engranajes se puede observar a continuación en la Figura 30.

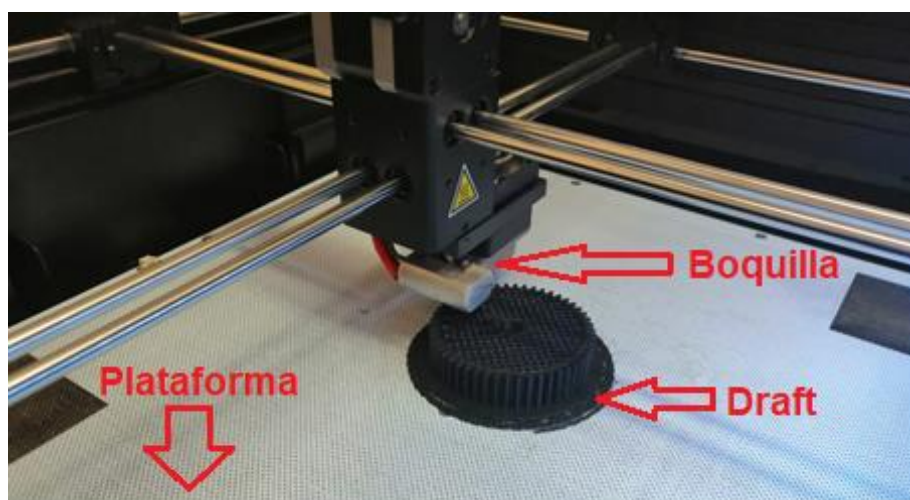


Figura 30. Proceso de impresión de los engranes, **Fuente:** El Autor.

A continuación, se muestra una tabla de los modelos obtenidos, parámetros de impresión, material implementado y el tiempo de impresión, para los engranajes establecidos según la Tabla 3, del diseño experimental.

Resultados de impresión de los engranajes con sus características		
J 1		
	Modulo	0,8
	Numero dientes	25
	Ancho engranaje	0,8 25
	Espesor capa	0,14
	Numero contornos	3
	Porcentaje relleno	30
	Calidad de impresión	trabajo
	Material Implementado	1,18 m
	Tiempo de impresión	0:30:00
J 2		
	Modulo	1,25
	Numero dientes	25
	Ancho engranaje	1,25 25
	Espesor capa	0,14
	Numero contornos	6
	Porcentaje relleno	30
	Calidad de impresión	alta
	Material Implementado	2,41 m
	Tiempo de impresión	0:58:00

J 3			
		Modulo	0,8
		Numero dientes	50
		Ancho engranaje	0,8 50
		Espesor capa	0,14
		Numero contornos	6
		Porcentaje relleno	70
		Calidad de impresión	trabajo
		Material Implementado	4,38 m
		Tiempo de impresión	1:15:00
J 4			
		Modulo	1,25
		Numero dientes	50
		Ancho engranaje	1,25 50
		Espesor capa	0,14
		Numero contornos	3
		Porcentaje relleno	70
		Calidad de impresión	alta
		Material Implementado	9,86 m
		Tiempo de impresión	3:20:00
J 5			
		Modulo	0,8
		Numero dientes	25
		Ancho engranaje	0,8 25
		Espesor capa	0,14
		Numero contornos	6
		Porcentaje relleno	70
		Calidad de impresión	alta
		Material Implementado	2,01 m
		Tiempo de impresión	1:00:00
J 6			
		Modulo	1,25
		Numero dientes	25
		Ancho engranaje	1,25 25
		Espesor capa	0,14
		Numero contornos	3
		Porcentaje relleno	70
		Calidad de impresión	trabajo
		Material Implementado	4,63 m
		Tiempo de impresión	1:46:00

J 7		
	Modulo	0,8
	Numero dientes	50
	Ancho engranaje	0,8 50
	Espesor capa	0,14
	Numero contornos	3
	Porcentaje relleno	30
	Calidad de impresión	alta
	Material Implementado	4,8 m
	Tiempo de impresión	2:12:00
J 8		
	Modulo	1,25
	Numero dientes	50
	Ancho engranaje	1,25 50
	Espesor capa	0,14
	Numero contornos	6
	Porcentaje relleno	30
	Calidad de impresión	trabajo
	Material Implementado	11,17 m
	Tiempo de impresión	3:45:00
J 9		
	Modulo	0,8
	Numero dientes	25
	Ancho engranaje	0,8 25
	Espesor capa	0,29
	Numero contornos	3
	Porcentaje relleno	70
	Calidad de impresión	alta
	Material Implementado	1,23 m
	Tiempo de impresión	0:22:00
J 10		
	Modulo	1,25
	Numero dientes	25
	Ancho engranaje	1,25 25
	Espesor capa	0,29
	Numero contornos	6
	Porcentaje relleno	70
	Calidad de impresión	trabajo
	Material Implementado	2,82 m
	Tiempo de impresión	0:39:00

J 11			
		Modulo	0,8
		Numero dientes	50
		Ancho engranaje	0,8 50
		Espesor capa	0,29
		Numero contornos	6
		Porcentaje relleno	30
		Calidad de impresión	alta
		Material Implementado	3,7 m
		Tiempo de impresión	0:49:00
J 12			
		Modulo	1,25
		Numero dientes	50
		Ancho engranaje	1,25 50
		Espesor capa	0,29
		Numero contornos	3
		Porcentaje relleno	30
		Calidad de impresión	trabajo
		Material Implementado	6,93 m
		Tiempo de impresión	1:15:00
J 13			
		Modulo	0,8
		Numero dientes	25
		Ancho engranaje	0,8 25
		Espesor capa	0,29
		Numero contornos	6
		Porcentaje relleno	30
		Calidad de impresión	trabajo
		Material Implementado	1,88 m
		Tiempo de impresión	0:32:00
J 14			
		Modulo	1,25
		Numero dientes	25
		Ancho engranaje	1,25 25
		Espesor capa	0,29
		Numero contornos	3
		Porcentaje relleno	30
		Calidad de impresión	alta
		Material Implementado	3,54 m
		Tiempo de impresión	1:02:00

J 15		
	Modulo	0,8
	Numero dientes	50
	Ancho engranaje	0,8 50
	Espesor capa	0,29
	Numero contornos	3
	Porcentaje relleno	70
	Calidad de impresión	trabajo
	Material Implementado	6,82 m
	Tiempo de impresión	1:12:00
J 16		
	Modulo	1
	Numero dientes	37
	Ancho engranaje	1 37
	Espesor capa	0,19
	Numero contornos	5
	Porcentaje relleno	50
	Calidad de impresión	normal
	Material Implementado	5,41 m
	Tiempo de impresión	1:38:00

Tabla 7. Resultados físicos y características de los engranajes. **Fuente:** El Autor.

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

De lo mostrado en el capítulo se puede concluir lo siguiente:

- La elaboración de modelos CAD es un proceso libre, sin embargo al momento de generar modelos de piezas parametrizadas como lo son los engranajes rectos, es primordial contar con un proceso adecuado que garantice la elaboración del modelo de forma congruente con las normas establecidas.
- El *Software* usado para la generación de archivos *Zortrax Printing Code* fue Z-Suite, el cual tiene una gran importancia al momento de establecer los parámetros de impresión de cada uno de los modelos de engranajes determinados en el diseño experimental.
- Gracias a la impresora Zortrax M300 y el material Z-HPIS en la manufactura de los engranajes, no se presentó complicaciones en la impresión de los engranajes. Los cuales tuvieron un tiempo de impresión total de 22 horas y 15 minutos.
- Se logró la impresión de los 16 engranajes estipulados en el diseño experimental con parámetros de impresión establecidos, logrando impresiones conformes para avanzar en el proceso de análisis metrológico de estos.

5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS ENGRANAJES OBTENIDOS POR MEDIO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA FDM

Se efectuó un análisis metrológico de los engranajes obtenidos de la manufactura por FDM establecida en el diseño experimental de la Tabla 3. Donde se busca hacer una comparación de los engranajes con sus respectivos modelos CAD, con el fin de establecer la variación geométrica ocasionada por el efecto de los parámetros de impresión en cada una de las muestras.

5.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Para la comparación del perfil de los dientes, se usó el proyector de perfiles MITUTOYO PH-350 (Ver Figura 31) con las especificaciones mostradas en la Tabla 8, la cual está diseñada para hacer mediciones o comparaciones a piezas de pequeño tamaño. Para la medición de la circunferencia de cabeza, ancho, circunferencia del agujero y chaveta se usó un calibrador digital VLASOV (Ver Figura 33), con las especificaciones mostradas en la Tabla 9, el cual está diseñado para hacer mediciones con precisión de 0,02 mm.

5.1.1 PROYECTOR DE PERFILES

El proyector de perfiles MITUTOYO PH-350, es un dispositivo que facilita la medición y comparación de piezas pequeñas o donde no se facilite la medición de las mismas, para esto se requiere plantillas de medición a 10X del objeto a medir. Es decir, se proyecta el perfil en la máquina, a continuación se ubica la plantilla en la silueta de la proyección para finalmente realizar la comparación de la muestra. La máquina y características se pueden ver en la Figura 31 y Tabla 8.



Figura 31. Proyector de perfiles MITUTOYO PH350, **Fuente:** El Autor.

Características del proyector de perfiles MITUTOYO PH-350	
Fabricante	MITUTOYO
Modelo	PH-350
Tamaño de pantalla	14"
Modelo de mesa o piso	Mesa de trabajo
Manual o Automatizado	Manual
Viajes	6" X 4"
Lectura	QC-100
Montura de lente	Montura de lentes única
Lentes de aumento	Elección de lentes
Tipo de iluminación de perfil	Tungsteno
Iluminación de superficie	Tungsteno
Resolución de proyección	10 X

Tabla 8. Características del proyector de perfiles MITUTOYO PH-350, **Fuente:** El Autor.

Para evitar errores en la precisión del proyector de perfiles con las plantillas, se tomó una muestra patrón (Ver Figura 32A) con una dimensión de 14,84 mm, la cual se le realizó una plantilla (ver Anexo C) de las mismas características a usar en la metrología de los engranajes con el proyector de perfiles. La cual mostro que las plantillas impresas en pergamino de 90g con una impresora de burbuja es confiable para esta comparación con 0,06% de error (Ver Figura 32 B).

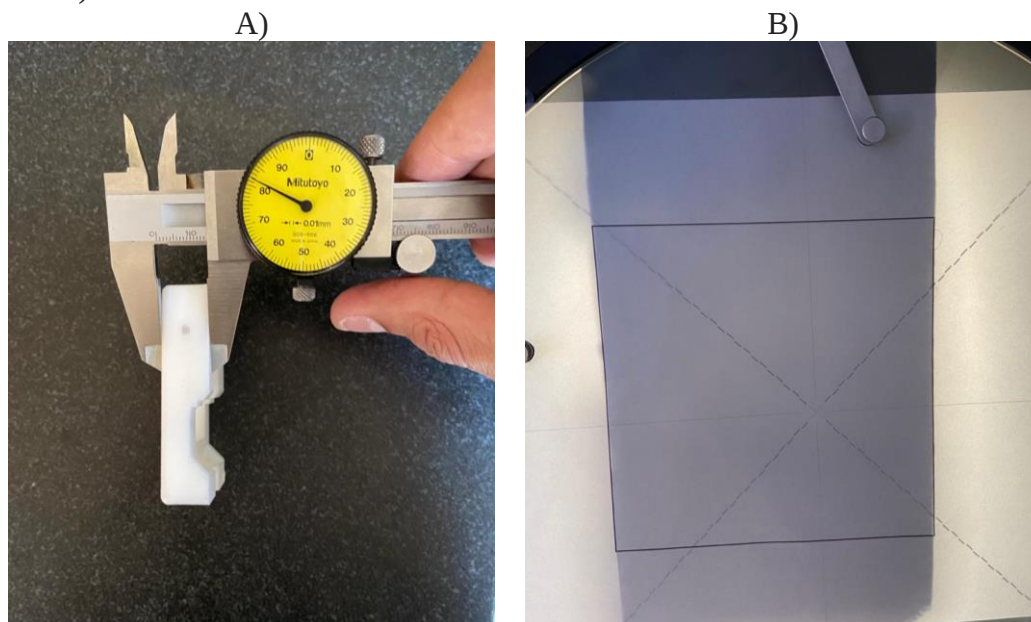


Figura 32. Verificación de precisión del proyector de perfiles, **Fuente:** El Autor.

5.1.2 CALIBRADOR DIGITAL

El calibrador digital VLASOV, fue el elemento de medición implementado en el estudio metrológico de los engranajes, ya que es una de las herramientas manuales más precisas con una precisión de (0,02 mm), al ser una herramienta con pantalla digital se asegura una lectura correcta del instrumento. A continuación se muestra la herramienta en la Figura 33 y sus características en la Tabla 9.



Figura 33. Calibrador Digital 300 mm, **Fuente:** El Autor

Marca	VLASOV
Referencia	Electronic Digital Vernier Caliper
Pantalla	LCD
Material	Acero inoxidable
Rango	0-300 mm / 8"
Resolución	0,01 mm / 0,0005"
Precisión	$\pm 0,02$ mm / $\pm 0,0001$ "
Temperatura de trabajo	5-40 C°
Potencia	1 X 1,5 V LR44

Tabla 9. Características del Calibrador digital, **Fuente:** El Autor.

5.2 MEDICIONES Y COMPARACIONES DE LOS ENGRANAJES RECTOS OBTENIDOS POR FDM CON EL MODELO CAD

Con la implementación de herramientas y equipos antes mencionados, se realizó la metrología de los engranajes obtenidos por FDM, al inicio una comparación con el proyector de perfiles para el flanco de los dientes de los engranajes rectos, seguido de una metrología de la circunferencia de cabeza, ancho, circunferencia del agujero y chaveta; esto con el calibrador digital, la cual fue un promedio de 3 mediciones para cada una de las cotas.

5.2.1 COMPARACIÓN DEL PERFIL DEL DIENTES EN LOS ENGRANAJES

Para la comparación del perfil de los dientes de cada uno de los engranajes rectos especificados en la Tabla 3 se implementaron plantillas para cada una de las muestras, las plantillas se debieron realizar en un papel translucido a 10 X (Ver Figura 34). El fin de esta comparación fue ver el efecto de los parámetros de impresión en el perfil de los dientes de los engranajes rectos. Los comentarios con respecto a esta metrología están en la Tabla 17.

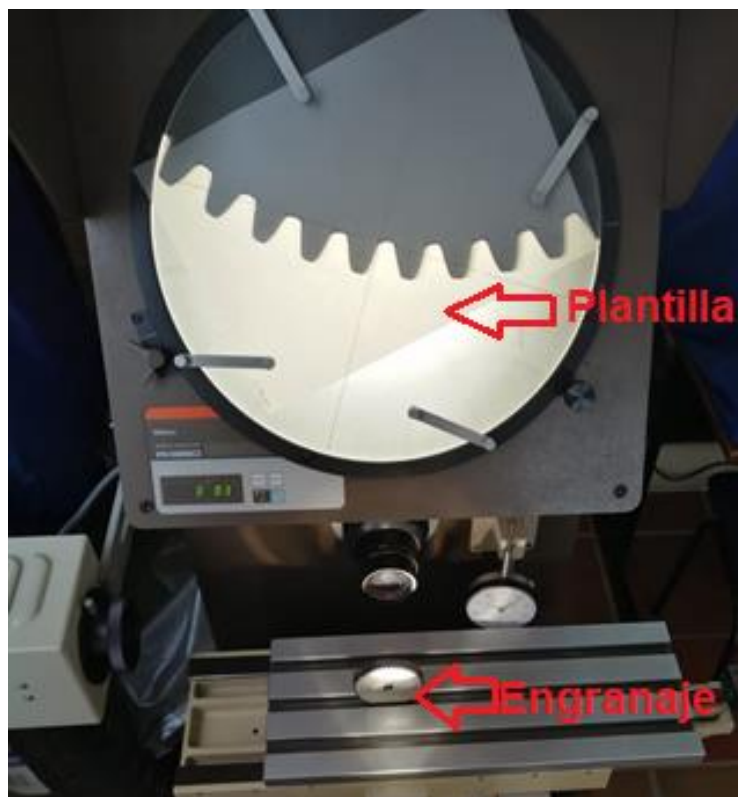


Figura 34. Comparación de perfil del flanco de los dientes de los engranajes, **Fuente:** El Autor

El número de plantillas requeridas para analizar los engranajes con el proyector de perfiles fue de 5 (ver Tabla 10), ya que las variaciones en los factores de diseño del ancho del engranaje y los parámetros de impresión no afectan la geometría del flanco de los dientes. Las plantillas se obtuvieron gracias al programa SOLIDWORKS 16 (Ver Anexo B) con una escala 10:1 por la resolución del proyector de 10X, las cuales fueron impresas en papel pergamino de 90g para facilitar su uso.

Número de plantilla	Módulo	Número de dientes	Engranajes correspondientes			
1	0,8	25	J1	J5	J9	J13
2	1,25	25	J2	J6	J10	J14
3	0,8	50	J3	J7	J11	J15
4	1,25	50	J4	J8	J12	-
5	1	37	J16			

Tabla 10. Plantillas a 10X para proyector de perfiles, **Fuente:** El Autor.

5.2.2 MEDICIÓN DE LA CIRCUNFERENCIA DE CABEZA

En la metrología de la circunferencia de cabeza se hizo uso del calibrador digital con el fin de obtener la medida resultante de la cota, para poder comprar con la medida del CAD nominal, realizando la medida en dirección del filamento de la capa superior, como se ve en la Figura 35. Los resultados de la metrología de cada uno de los engranajes están plasmados en la Tabla 11.



Figura 35. Proceso de medición circunferencia de cabeza, **Fuente:** El Autor

Resultados de la medición de Diámetro de cabeza y CAD nominal							
Muestra	Medición Ø (mm)	CAD (mm)	Error %	Muestra	Medición Ø (mm)	CAD (mm)	Error %
J 1	21,63	21,51	0,56%	J 9	21,56	21,51	0,23%
J 2	33,84	33,62	0,65%	J 10	33,94	33,62	0,95%
J 3	41,63	41,6	0,07%	J 11	41,69	41,6	0,22%
J 4	64,98	65	0,03%	J 12	65,1	65	0,15%
J 5	21,55	21,51	0,19%	J 13	21,62	21,51	0,51%
J 6	33,76	33,62	0,42%	J 14	33,76	33,62	0,42%
J 7	41,58	41,6	0,05%	J 15	41,6	41,6	0,00%
J 8	65,14	65	0,22%	J 16	39,07	38,93	0,36%

Tabla 11. Resultados metrología del diámetro de cabeza con el CAD nominal. **Fuente:** El Autor.

Esta variable de respuesta cuenta con restricciones de medición por la dirección del filamento de impresión, las medición se realizaron paralelas a los filamentos (Ver Figura 36 A) ya que en el sentido perpendicular a los filamentos se reduce la medida, esto hace al engranaje ovalado. En engranajes con numero de dientes impar cuentan con cotas CAD diferentes (Ver Figura 36 B), esto genero una variación con respecto a la medida, la cual no superar un error de 0,5% (Ver Tabla 12), sin embargo esto se tuvo en cuenta en los engranajes de dientes impar para efectos de precisión.

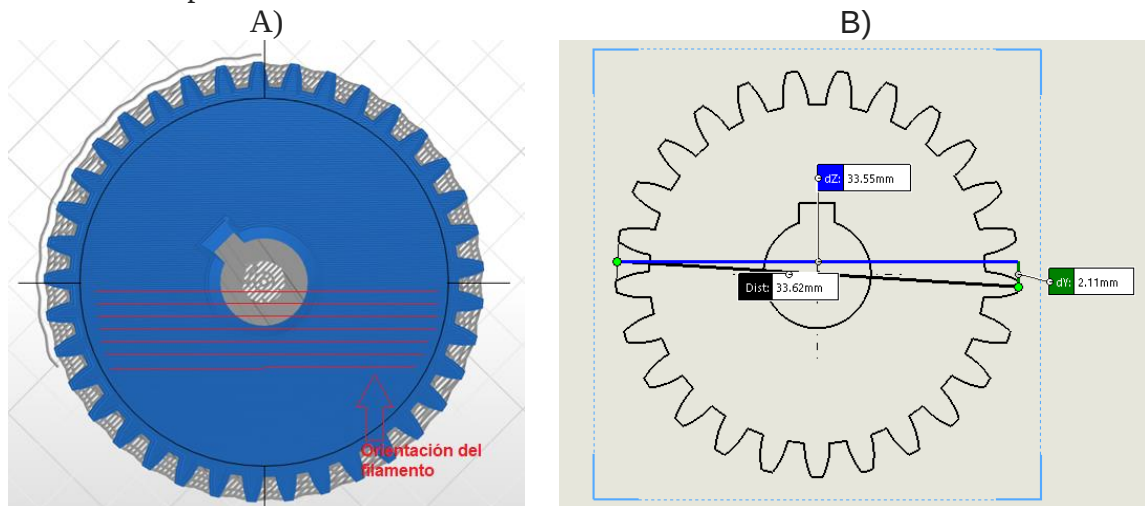


Figura 36. Orientación del filamento de impresión, **Fuente:** El Autor.

Diferencia de medición en engranajes rectos con numero de dientes impar					
nombre	metrología filamento	CAD	medida CAD para dientes impar	Diferencia con el CAD	Error %
J 1	21,63	21,6	21,51	0,09	0,417%
J 2	33,84	33,8	33,62	0,14	0,415%
J 3	41,63	41,6	41,6	-	-
J 4	64,98	65	65	-	-
J 5	21,55	21,6	21,51	0,09	0,417%
J 6	33,76	33,8	33,62	0,14	0,415%
J 7	41,58	41,6	41,6	-	-
J 8	65,14	65	65	-	-
J 9	21,56	21,6	21,51	0,09	0,417%
J 10	33,94	33,8	33,62	0,14	0,415%
J 11	41,69	41,6	41,6	-	-
J 12	65,1	65	65	-	-
J 13	21,62	21,6	21,51	0,09	0,417%
J 14	33,76	33,8	33,62	0,14	0,415%
J 15	41,6	41,6	41,6	-	-
J 16	39,07	39	38,93	0,07	0,179%

Tabla 12. Diferencia de medición en engranajes rectos con número de dientes impar, **Fuente:** El Autor.

Teniendo en cuenta esto se realizó una comparación de la diferencia en los ejes mayor y menor con respecto al modelo CAD (Ver Tabla 13), para establecer la los datos a tener en cuenta del experimento que se presentaron en la Tabla 11.

Comparación de diámetros en el eje mayor y menor de los engranajes rectos						
Nombre	Ø del modelo CAD	Ø paralelo al filamento	Ø perpendicular al filamento	Diferencia Ø	Error del Ø paralelo al filamento	Error del Ø perpendicular al filamento
J 1	21,6	21,63	21,41	0,22	0,139%	0,880%
J 2	33,76	33,84	33,42	0,42	0,237%	1,007%
J 3	41,6	41,63	41,26	0,37	0,072%	0,817%
J 4	65	64,98	64,43	0,55	0,031%	0,877%
J 5	21,6	21,55	21,36	0,19	0,231%	1,111%
J 6	33,76	33,76	33,47	0,29	0,000%	0,859%
J 7	41,6	41,58	41,2	0,38	0,048%	0,962%
J 8	65	65,14	64,46	0,68	0,215%	0,831%
J 9	21,6	21,56	21,36	0,2	0,185%	1,111%

Nombre	Ø del modelo CAD	Ø paralelo al filamento	Ø perpendicular al filamento	Diferencia Ø	Error del Ø paralelo al filamento	Error del Ø perpendicular al filamento
J 10	33,76	33,94	33,6	0,34	0,533%	0,474%
J 11	41,6	41,69	41,24	0,45	0,216%	0,865%
J 12	65	65,1	64,58	0,52	0,154%	0,646%
J 13	21,6	21,62	21,44	0,18	0,093%	0,741%
J 14	33,76	33,76	33,44	0,32	0,000%	0,948%
J 15	41,6	41,6	41,26	0,34	0,000%	0,817%
J 16	39	39,07	38,73	0,34	0,179%	0,692%

Tabla 13. Comparación de diámetros en el eje mayor y menor de los engranajes rectos, **Fuente:** El Autor

5.2.3 MEDICIÓN DEL ANCHO

En la metrología del ancho del engranaje se hizo uso del calibrador digital con el fin de obtener la medida resultante de la cota, para poder comparar con la medida del CAD nominal, en el costado opuesto a la ubicación de la chaveta como se ve en la Figura 37. Los resultados de la metrología de cada uno de los engranajes están plasmados en la Tabla 14.



Figura 37. Proceso de medición anchura del engranaje, **Fuente:** El Autor

Resultados de la medición de ancho del engranaje y CAD nominal							
Muestra	Ancho (mm)	CAD (mm)	Error %	Muestra	Ancho (mm)	CAD (mm)	Error %
J 1	10,18	10	1,80%	J 9	10,20	10	2,00%
J 2	10,25	10	2,50%	J 10	10,08	10	0,80%
J 3	10,21	10	2,10%	J 11	10,07	10	0,70%
J 4	10,15	10	1,50%	J 12	10,14	10	1,40%
J 5	20,22	20	1,10%	J 13	20,20	20	1,00%
J 6	20,10	20	0,50%	J 14	20,31	20	1,55%
J 7	20,10	20	0,50%	J 15	20,18	20	0,90%
J 8	19,97	20	0,15%	J 16	20,18	20	0,90%

Tabla 14. Resultados de metrología del ancho del engranaje y medida del CAD nominal. **Fuente:** El Autor.

5.2.4 MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DEL AGUJERO

En la metrología del diámetro del agujero se hizo uso del calibrador digital con el fin de obtener la medida resultante de la cota, para poder comparar con la medida del CAD nominal, Como se ve en la Figura 38. Los resultados de la metrología de cada uno de los engranajes están plasmados en la Tabla 15.



Figura 38. Proceso de medición diámetro del agujero, **Fuente:** El Autor

Resultados de la medición de Diámetro del agujero y CAD nominal							
Muestra	Medición Ø (mm)	CAD (mm)	Error %	Muestra	Medición Ø (mm)	CAD (mm)	Error %
J 1	8,66	9	3,9%	J 9	8,58	9	4,9%
J 2	8,52	9	5,6%	J 10	8,46	9	6,4%
J 3	8,74	9	3,0%	J 11	8,55	9	5,3%
J 4	8,72	9	3,2%	J 12	8,60	9	4,7%
J 5	8,80	9	2,3%	J 13	8,63	9	4,3%
J 6	8,72	9	3,2%	J 14	8,58	9	4,9%
J 7	8,61	9	4,5%	J 15	8,59	9	4,8%
J 8	8,76	9	2,7%	J 16	8,79	9	2,4%

Tabla 15. Resultados metrología del diámetro del agujero y medida del CAD nominal. **Fuente:** El Autor.

5.2.5 MEDICIÓN DE LA CHAVETA

En la metrología de la chaveta del agujero se hizo uso del calibrador digital con el fin de obtener la medida resultante de la cota, para poder comparar con la medida del CAD nominal, Como se ve en la Figura 39. Los resultados de la metrología de cada uno de los engranajes están plasmados en la Tabla 16.



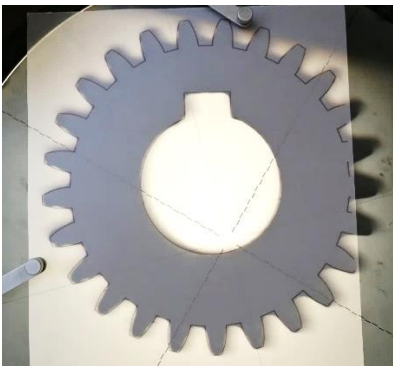
Figura 39. Proceso de medición chaveta, **Fuente:** El Autor

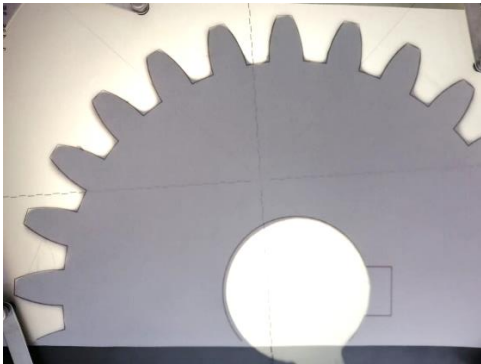
Resultados de la medición de Chaveta y CAD nominal							
Muestra	Chaveta (mm)	CAD (mm)	Error %	Muestra	Chaveta (mm)	CAD (mm)	Error %
J 1	2,84	3	5,6%	J 9	2,75	3	9,1%
J 2	2,87	3	4,5%	J 10	2,82	3	6,4%
J 3	2,86	3	4,9%	J 11	2,81	3	6,8%
J 4	2,88	3	4,2%	J 12	2,73	3	9,9%
J 5	2,84	3	5,6%	J 13	2,92	3	2,7%
J 6	2,87	3	4,5%	J 14	2,85	3	5,3%
J 7	2,81	3	6,8%	J 15	2,85	3	5,3%
J 8	2,77	3	8,3%	J 16	2,81	3	6,8%

Tabla 16. Resultados metrología de chaveta del agujero y medida del CAD nominal. **Fuente:** El Autor.

5.3 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

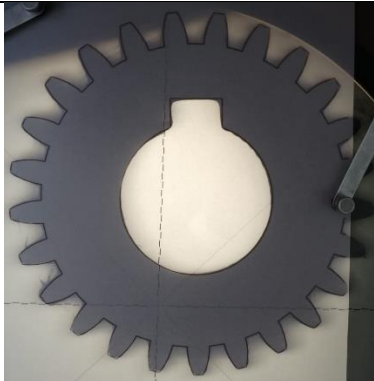
A continuación, se muestra una tabla de la metrología realizada, perfil de los dientes, circunferencia de cabeza, ancho del engranaje, diámetro del agujero, chaveta, para los engranajes establecidos según la Tabla 3, del diseño experimental. Con una descripción visual del proyector de perfiles para cada uno de los modelos obtenidos.

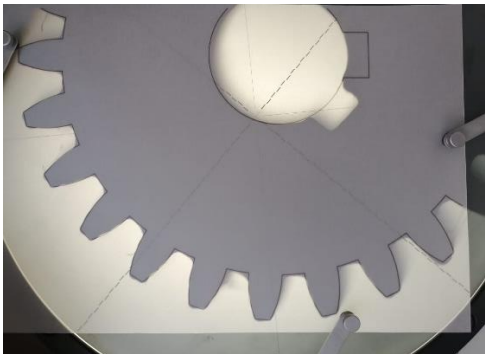
Propiedades geométricas de engranajes impresos por FDM del diseño experimental			
J 1			
	Circunferencia de cabeza	21,63	mm
	Ancho	10,18	mm
	Circunferencia de agujero	8,66	mm
	Chaveta	2,83	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	En el fondo de los dientes no cumple adecuadamente por redondeos pronunciados, falta relleno en la mayoría de los flancos de dientes.		

J 2			
	Circunferencia de cabeza	33,84	mm
	Ancho	10,25	mm
	Circunferencia de agujero	8,51	mm
	Chaveta	2,87	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	En el fondo de los dientes se observa pequeños redondeos, falta relleno en ciertas crestas de dientes.		

J 3			
	Circunferencia de cabeza	41,63	mm
	Ancho	10,21	mm
	Circunferencia de agujero	8,74	mm
	Chaveta	2,86	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.		

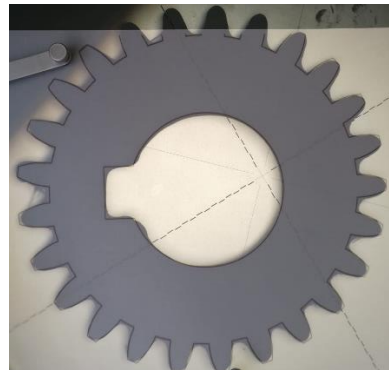
J 4			
	Circunferencia de cabeza	64,98	mm
	Ancho	10,15	mm
	Circunferencia de agujero	8,72	mm
	Chaveta	2,88	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes, material adicional en la base de los flancos.		

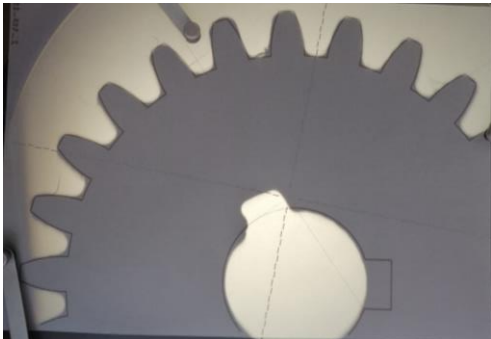
J 5			
	Circunferencia de cabeza	21,55	mm
	Ancho	20,22	mm
	Circunferencia de agujero	8,80	mm
	Chaveta	2,83	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	En el fondo de los dientes no cumple adecuadamente por redondeos pronunciados, material adicional en los flancos de dientes.		

J 6			
	Circunferencia de cabeza	33,76	mm
	Ancho	20,10	mm
	Circunferencia de agujero	8,72	mm
	Chaveta	2,87	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.		

J 7			
	Circunferencia de cabeza	41,58	mm
	Ancho	20,10	mm
	Circunferencia de agujero	8,61	mm
	Chaveta	2,81	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.		

J 8			
	Circunferencia de cabeza	64,14	mm
	Ancho	19,97	mm
	Circunferencia de agujero	8,75	mm
	Chaveta	2,77	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	El perfil de los dientes cumple con la plantilla.		

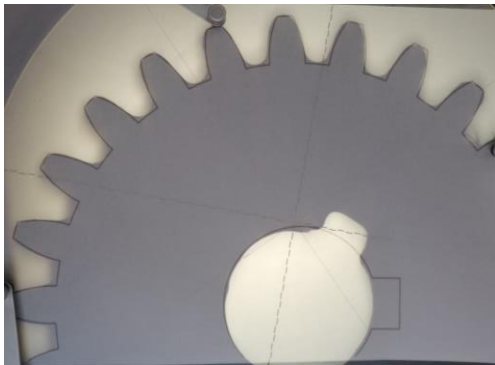
J 9			
	Circunferencia de cabeza	21,56	mm
	Ancho	10,20	mm
	Circunferencia de agujero	8,58	mm
	Chaveta	2,75	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
	En el fondo de los dientes no cumple adecuadamente por redondeos pronunciados, material adicional en los flancos de dientes.		

J 10			
	Circunferencia de cabeza	33,94	mm
	Ancho	10,08	mm
	Circunferencia de agujero	8,46	mm
	Chaveta	2,82	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.			

J 11			
	Circunferencia de cabeza	41,69	mm
	Ancho	10,07	mm
	Circunferencia de agujero	8,55	mm
	Chaveta	2,80	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.			

J 12			
	Circunferencia de cabeza	65,10	mm
	Ancho	10,14	mm
	Circunferencia de agujero	7,26	mm
	Chaveta	2,73	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
El perfil de los dientes cumple con la plantilla.			

J 13			
	Circunferencia de cabeza	21,67	mm
	Ancho	20,20	mm
	Circunferencia de agujero	8,63	mm
	Chaveta	2,92	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
En el fondo de los dientes no cumple adecuadamente por redondeos pronunciados, material adicional en los flancos de dientes.			

J 14			
	Circunferencia de cabeza	33,76	mm
	Ancho	20,31	mm
	Circunferencia de agujero	8,58	mm
	Chaveta	2,84	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.			

J 15			
	Circunferencia de cabeza	41,60	mm
	Ancho	20,18	mm
	Circunferencia de agujero	8,58	mm
	Chaveta	2,84	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
Se observan pequeños redondeos en el fondo de los dientes.			

J 16			
	Circunferencia de cabeza	39,07	mm
	Ancho	20,18	mm
	Circunferencia de agujero	8,79	mm
	Chaveta	2,80	mm
	Comparación del perfil de los dientes		
El perfil de los dientes cumple con la plantilla.			

Tabla 17. Propiedades geométricas del diseño experimental, Fuente: El Autor.

5.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

De lo mostrado en el capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Se identificaron las herramientas de metrología a implementar, con las características y el uso adecuado para la implementación en los engranajes impresos por FDM.
- Se logró obtener las comparaciones con el proyector de perfiles de cada una de las 16 muestras de engranajes, obteniendo un análisis de manera objetiva del resultado geométrico de cada uno de los engranajes obtenidos por FDM.
- Con el fin de mejorar la precisión de la metrología de las variables de respuesta, se realizó un promedio de 3 mediciones para cada una de las cotas establecidas, con el fin de obtener datos más precisos para el posterior análisis.
- Se sintetizó la información de las propiedades geométricas de los engranajes, circunferencia de cabeza, ancho, circunferencia del agujero, chaveta, comparación del perfil de los dientes de manera gráfica y descriptiva.

6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS ANOVA DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS

Con los resultados obtenidos en la metrología, se realiza un análisis de regresión lineal y un análisis de varianza ANOVA de los resultados para determinar la influencia de los parámetros de impresión en las propiedades geométricas en los engranajes rectos impresos por deposición de filamento fundido.

6.1 ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL

El análisis de regresión lineal es la herramienta que ayudará a determinar el resultado de las propiedades geométricas bajo el efecto de los niveles y factores del diseño experimental [34]. Con la ayuda del *software* estadístico *Minitab 16* se obtuvieron las ecuaciones de predicción de las variables de respuesta error de diámetro exterior y error de ancho del engranaje en función de los parámetros de fabricación; además de los coeficientes de correlación (R^2) (Ver Anexo A y Tabla 18).

Propiedades geométricas	Ecuación de regresión	R^2
Error de diámetro exterior	$-0,170848 + 0,121343 \text{ Modulo} + 0,00059702 \text{ Numero dientes} - 0,00253782 \text{ Ancho engranaje} + 0,224006 \text{ Espesor capa} + 0,0238704 \text{ Numero contorno} - 0,000997347 \text{ Porcentaje relleno} - 0,0274469 \text{ Calidad}$	88,34 %
Error de ancho del engranaje	$0,368712 - 0,0684303 \text{ Modulo} - 0,00302093 \text{ Numero dientes} - 0,000656804 \text{ Ancho engranaje} + 0,089075 \text{ Espesor capa (mm)} - 0,00970113 \text{ Numero contorno} + 0,000115723 \text{ Porcentaje relleno} + 0,0223145 \text{ Calidad}$	37,58%

Tabla 18. Modelos de regresión lineal de los errores dimensionales en función de los parámetros de impresión. **Fuente:** El Autor

El coeficiente de correlación (R^2) es el factor cuantitativo que indica la cercanía de los valores obtenidos de la regresión lineal con respecto a los datos de la metrología. Entre más se acerca a (1) o (100%) el valor de R^2 mejor será el ajuste con respecto a los datos obtenidos [34]. De este modo, se aprecia que el modelo regresión del error del diámetro exterior tienen una buena correlación con un R^2 de 88,34% con los parámetros de impresión (Ver Figura 40); sin embargo, el modelo de regresión para el error del ancho del engranaje tiene una mayor dispersión con un R^2 de 37,58% (Figura 41). En otras palabras, es posible disminuir el error observado en la medición del diámetro exterior mediante el control de los parámetros de impresión.

De los datos presentados en la Tabla 18 se usa en el diámetro exterior ya que es el que cuenta con un coeficiente de correlación mayor, lo que indica que es un error que se puede reducir según los parámetros de impresión, en el caso de tomar alguna otra variable de respuesta como lo es el ancho del engranaje, la chaveta o el diámetro interior, no sería posible corregir el error en la geometría del engranaje por su bajo coeficiente de correlación.

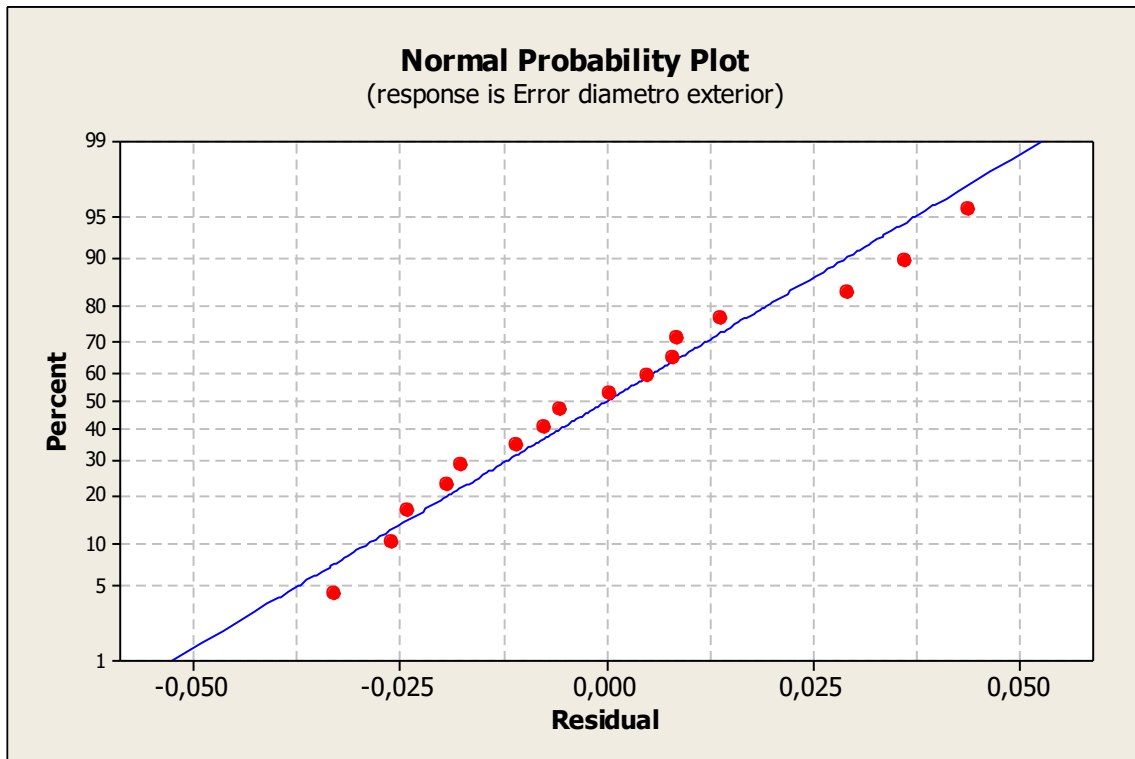


Figura 40. Grafica de los efectos de los parámetros de impresión en el diámetro exterior según la regresión lineal, **Fuente:** El autor.

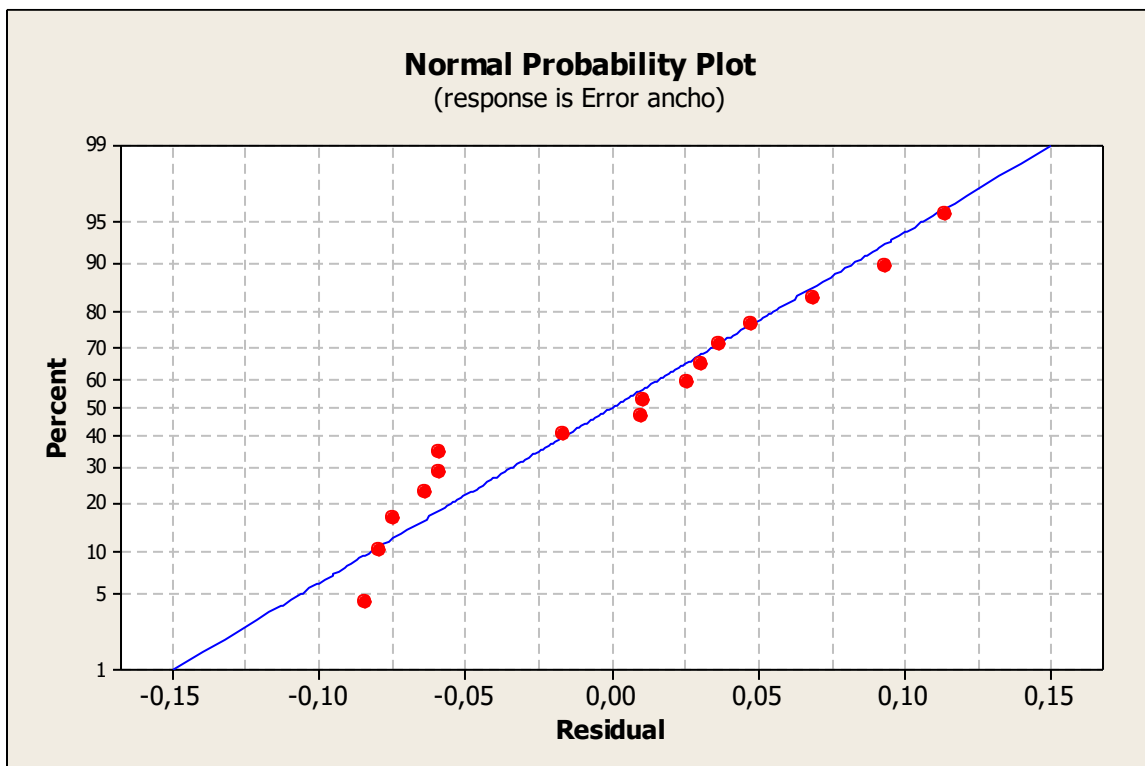


Figura 41. Grafica de los efectos de los parámetros de impresión en el ancho del engranaje según la regresión lineal, **Fuente:** El autor.

6.2 ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Por medio del análisis de varianza ANOVA se determinan los factores que afectan en mayor medida los errores dimensionales observados en el experimento (Ver Tabla 19). Explicando el efecto de cada uno de los parámetros de impresión que hacen que el engranaje se torne ovalado y se aleje de las medidas nominales del modelo CAD. Se hará el análisis del ANOVA del error del diámetro exterior considerando que tiene un R^2 alto. No se hará para el modelo de regresión lineal del error del espesor del engranaje considerando el R^2 que se determinó para dicho modelo.

Fuente	DF	SS	Aporte	SS Ajust.	MS Ajust.	Factor F	Factor P
Regression	7	0,0581058	88,3%	0,0581058	0,0083008	8,6589	0,003397
Modulo	1	0,0111488	16,9%	0,0106087	0,0106087	11,0663	0,010437
Numero dientes	1	0,0009575	1,5%	0,0007935	0,0007935	0,8277	0,38953
Ancho engranaje	1	0,002543	3,9%	0,0024681	0,0024681	2,5746	0,147258
Espesor capa (mm)	1	0,0046265	7,0%	0,0040163	0,0040163	4,1896	0,074875
Numero contorno	1	0,0239384	36,4%	0,0185145	0,0185145	19,3132	0,002303
Porcentaje relleno	1	0,0041503	6,3%	0,0056732	0,0056732	5,9179	0,041031
Calidad	1	0,0107414	16,3%	0,0107414	0,0107414	11,2048	0,01012
Error	8	0,0076692	11,7%	0,0076692	0,0009586		

Tabla 19. ANOVA del Modelo de regresión lineal del error dimensional del diámetro exterior en función de los parámetros de impresión, **Fuente:** *El autor*

De acuerdo con los resultados de los ANOVA de la Tabla 19 se puede considerar lo siguiente:

- El número de contornos es el parámetro con mayor influencia en el error del diámetro exterior de los engranajes con un **36,4%**. Esto puede deberse a que al tener más material en las capas superior e inferior aumenta la contracción del material posterior al enfriamiento de la pieza.
- El módulo con un **16,9%** de influencia en el error del diámetro de los engranajes, debido al ovalamiento presentado en los engranajes obtenido por FDM es directamente proporcional al aumento del tamaño. Esto indica que entre mayor sea el módulo provocará una mayor deformidad geométrica en los engranajes obtenidos por FDM.
- La calidad de impresión con un **16,3%** de influencia en el diámetro de los engranajes. Este parámetro mejora la calidad superficial de las piezas aumentando el detalle en la definición del contorno de los engranajes. Esto puede implicar que el material adicional hace que el filamento se enfríe antes de tiempo generando deformidades geométricas. La calidad de impresión no define la resolución de impresión de la pieza si no el espesor de capa, por ende, entre mayor sea la calidad de impresión se reducirá la precisión geométrica de los engranajes obtenidos por FDM.

- Espesor de capa con un **7,0%** de influencia. Esto puede deberse a que entre mayor sea el espesor de capa se genera un desplazamiento de material extruido y aumentan las dimensiones finales de los engranajes impresos por FDM.
- Porcentaje de relleno con un **6,3%** de influencia en el diámetro exterior de los engranajes impresos por FDM, demuestra lo poco relevante que llega a ser este parámetro en las propiedades geométricas de los engranajes obtenidos, Lo que permite establecer este parámetro según la aplicación que se requiera para la pieza.
- Ancho del engranaje con un **3,9%** de influencia en el diámetro exterior, refleja que al ser un parámetro el cual afecta el eje Z no sobresale puesto que la geometría está descrita en el plano XY para este estudio.

Es decir que al conocer el porcentaje de afectación de los parámetros de impresión en las propiedades geométricas del engranaje obtenido por FDM como el diámetro exterior, se pueden generar ajustes en las configuraciones de los parámetros de impresión con el fin de obtener una pieza de engranaje que se acerque de una mejor manera a las medidas del CAD nominal que se plantea.

6.3 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

De lo mostrado en el capítulo se puede concluir lo siguiente:

- El diámetro exterior de los engranajes está afectado por los parámetros de impresión de esta forma: Numero de contornos (36,4%), Modulo (16,9%), Calidad de impresión (16,3%), Espesor de capa (7,0%), Porcentaje de relleno (6,3%), ancho del engranaje (3,9%) y número de dientes (1,5%). Los cuales son presentados de mayor influencia a menor en el diámetro exterior de los engranajes obtenidos por FDM.
- Se obtuvo un coeficiente de correlación de 88,34% en el diámetro exterior de los engranajes, es decir que la regresión lineal se logró de manera exitosa teniendo un grupo de datos consistentes que se ajustaron al modelo y permitieron el estudio y predicción del efecto de los parámetros de impresión.
- Con los resultados del análisis de la varianza ANOVA se determinó el porcentaje de afectación y se explicó el motivo de cada uno de los parámetros que hacen que genere una afectación en el diámetro exterior del engranaje impreso por FDM.
- Con la información recolectada se podrían generar modificaciones en los parámetros de impresión con el fin de mejorar la geometría del engranaje recto impreso por FDM.

7 CONCLUSIONES

A lo largo de la presente investigación sobre el efecto de los parámetros de impresión en las propiedades geométricas de engranajes impresos por deposición de filamento fundido, se ha encontrado lo siguiente.

- Se realizó un estudio del arte en donde se identificaron trabajos previos, soluciones actuales para solventar la falta de precisión geométrica en los engranajes impresos por FDM. Resaltando la importancia en el estudio del efecto de los parámetros de impresión de engranajes rectos impresos por FDM.
- Para establecer el diseño experimental se tomaron en cuenta los factores y niveles de diseño adecuados para este trabajo, determinando el mejor diseño experimental teniendo en cuenta el tiempo, recursos y viabilidad del proyecto. Aplicando un diseño factorial fraccionado de 16 corridas, con lo cual se establecieron parámetros de impresión específicos con las restricciones del *software* Z-SUITE, que se implementarán en el postproceso de los modelos y su posterior impresión.
- Para el análisis metrológico se establecieron criterios de medición adecuados para piezas obtenidas por medios de FDM, como mediciones en el sentido de los filamentos para el diámetro exterior, encontrando un ovalamiento de 0,5% en los engranajes; opuesto a la chaveta en el ancho del engranaje para evitar variable no contenpladas. Para el proyector de perfiles se tuvo en cuenta una inspección visual para cada una de las muestras con las plantillas establecidas en el Anexo A, especificando las diferencias notorias en los flancos de los dientes.
- La influencia de los factores de diseño experimental en los resultados de las propiedades geométricas del diámetro exterior se muestra en la Tabla 20, resaltado en negrilla los factores más influyentes en el resultado.

Factores	Diámetro exterior
Modulo	16,9%
Numero de dientes	1,5%
Ancho del engranaje	3,9%
Espesor de capa	7,0%
Numero de contornos	36,4%
Porcentaje de relleno	6,3%
Calidad de impresión	16,3%

Tabla 20. Contribución de factores del diseño experimental en las propiedades geométricas,

Fuente: El Autor.

- Al contar con un coeficiente de correlación de 88,34% lo que es considerado que es un error el cual se puede variar los parámetros de impresión para mejorar las propiedades geométricas, se pueden generar mejoras en los engranajes obtenidos por FDM realizando modificaciones de los parámetros de impresión y en el CAD, gracias a la ayuda del análisis estadístico establecido en el capítulo 6.

- De todo lo anterior, se puede concluir que la impresión de engranajes por medio de FDM mejorando las propiedades geométricas por medio de los parámetros de impresión es posible siguiendo las recomendaciones.

8 RECOMENADACIONES

- Los factores óptimos para obtener unos engranajes impresos por FDM con propiedades geométricas más acordes con el CAD se muestran en la Tabla 21.

FACTORES	Niveles de mejora geometrica
Modulo (#)	$0,8 \leq \text{Modulo} \leq 1$
Numero de dientes (#)	$13 \leq \text{Numero de dientes}$
Ancho del engranaje (mm)	Según necesidad
Espesor de capa (mm)	0,19
Numero de contornos (#)	3
Porcentaje de relleno (%)	30%-70% según necesidad
Calidad de impresión	Trabajo

Tabla 21. Factores optimos de impresión de engranajes rectos, **Fuente:** El Autor.

- Tabla de tolerancias en engrajes impresos por FDM con factores que estén dentro de lo establecido en la Tabla 21, son los que se muestran a continuación en la Tabla 22

FACTORES	Tolerancia en variables de respuesta
Diámetro Exterior (mm)	+0,02 / -0,18
Diámetro Agujero (mm)	+0,54
Ancho del engranaje (mm)	+0,03 / -0,31
Chaveta (mm)	+0,27

Tabla 22. Tolerancias de engranajes obtenidos por FDM, **Fuente:** El Autor.

- El modelo CAD del engranaje debe ser corregido si se desea una mayor precisión en las propiedades geométricas, para evitar el ovalamiento del diámetro exterior, el ajuste en el agujero, la dimesnión de la chaveta y el ancho del engranaje. Según los errores mostrados en la sección 5.2.
- Para el ovalamiento que puede presentar problemas en montaje de los engranaje, se sugiere dejar el CAD sin esta modificación y realizar un ajuste en la escala en el plano X o Y, directamente en el software de proceso Z-SUITE.
- Tener la máquina de impresión lo más aislada de las variaciones de temperatura ambientales y flujos de aire posibles, harán que no se afecte el resultado final de los engranajes obtenidos por FDM.
- Se recomiendo realizar un chaflán en el modelo CAD interna y externamente, también por ambos lados del engranaje, esto para evitar los bordes mostrados en (Figura 42) que podrían interferir en el montaje de los engranajes.

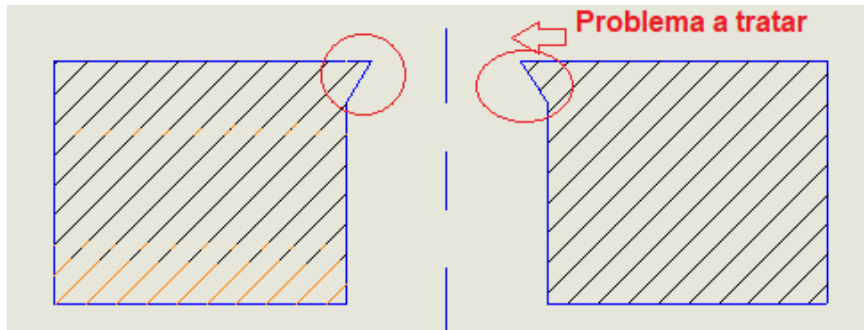


Figura 42. Ilustración del efecto en las superficies de los engranajes, **Fuente:** El Autor.

- Las aplicaciones de engranajes restos fabricados por FDM, varían según la necesidad del usuario ya que el número de dientes no es relevante y el módulo de engranajes de (1) esta estandarizado amplía sus aplicaciones, sin embargo una restricción seria las propiedades mecánicas requeridas para la aplicación de este. Podrían aplicarse en piezas mecánicas de sistemas de movimiento como juguetes, elementos de enseñanza didáctica y remplazo temporal de piezas mecanizadas.
- Se sugiere la continuaceión de este trabajo de grado haciendo uso de los engranajes obtenidos, determinando las propiedades mecánicas de engranajes rectos impresos por FDM trabajando con engranajes mecanizados. Para enfatizar y restringir el campo de acción de estos.

9 REFERENCIAS

- [1] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, L. Muller, and M. Camargo, "Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for evaluating accuracy performance of 3D printers," *Virtual Phys. Prototyp.*, pp. 151–167, 2014.
- [2] A. C. Abbott, G. P. Tandon, R. L. Bradford, H. Koerner, and J. W. Baur, "Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication," *ELSEVIER*, 2017.
- [3] K. Gupta, R. F. Laubscher, J. P. Davim, and N. K. Jain, "Recent developments in sustainable manufacturing of gears: A review," *ELSEVIER*, 2016.
- [4] S. K. Chaubey and N. K. Jain, "State-of-art review of past research on manufacturing of meso and micro cylindrical gears," *ELSEVIER*, 2017.
- [5] G. Budzik and T. Dziubek, "Methodology of Increasing Accuracy of Gear Models Manufactured," *Gruyter Open*, vol. 39, no. 4, 2015.
- [6] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *ELSEVIER*, pp. 737–760, 2016.
- [7] S. S. Babu, L. Love, R. Dehoff, W. Peter, T. R. Watkins, and S. Pannala, "Additive manufacturing of materials: Opportunities and challenges," *MRS Bull.*, vol. 40, pp. 1154–1161, 2015.
- [8] Y.-C. Tsai and W.-K. Jehng, "Rapid prototyping and manufacturing technology applied to the forming of spherical gear sets with skew axes," *ELSEVIER*, Oct. 1999.
- [9] Y. Zhang, C. Pursell, K. Mao, and S. Leigh, "A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears," *ELSEVIER*, 2019.
- [10] Q. Chen, C. Song, C. Zhu, X. Du, and G. Ni, "Manufacturing and contact characteristics analysis of internal straight beveloid gear pair," *Mech. Mach. Theory*, pp. 60–73, 2016.
- [11] M. Pueo, J. Santolaria, R. Acero, and A. Gracia, "A review of tangential composite and radial composite gear inspection," *Precis. Eng.*, pp. 522–537, 2017.
- [12] K. Dvorak, "3D model preparing for rapid prototyping by FDM method," *Int. Conf. Mech. Aerosp. Eng.*, vol. 8, pp. 25–29, 2017.
- [13] textoscientificos, "abs," 2017. [Online]. Available: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>.
- [14] ZORTRAX, "Z-PETG ZORTRAX," 2015. [Online]. Available: <https://zortrax.com/filaments/z-petg/>.
- [15] ZORTRAX, "Z-NYLON ZORTRAX," 2018. [Online]. Available: <https://zortrax.com/filaments/z-nylon/>.
- [16] Z. S.A., "Z-HIPS FILAMENT," 2.0, 2018. [Online]. Available: <https://zortrax.com/filaments/z-hips/>.
- [17] F. Leyton, "Estudio y caracterización de las variables que afectan a la impresión 3D en la generación de objetos manipulables," *Esc. Univ. Cent. diseño*, pp. 1–55, 2016.
- [18] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *ELSEVIER*, 2017.
- [19] B. Pérez, H. Nykvist, A. F. Brøgger, M. B. Larsen, and M. F. Falkeborg, "Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review," *ELSEVIER*, 2019.
- [20] E. Umaras and M. S. G. Tsuzuki, "Additive Manufacturing - Considerations on

- Geometric Accuracy and Factors of Influence,” *ELSEVIER*, no. 1, 2017.
- [21] MechEngineerMike, “A Practical Guide to FDM 3D Printing Gears,” *online*. [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/A-Practical-Guide-to-FDM-3D-Printing-Gears/>.
 - [22] A. Casulleras, “Estudio de diseño y construcción de una reductora con cambio de velocidad con impresora 3d,” *Univ. politécnica catalunya*, 2018.
 - [23] D. ALL3d by Pechter, “3D Printed Gears – Get the Gear That Fits Your Needs,” 17 noviembre, 2018. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/3d-printed-gears-get-the-gear-that-fits-your-needs/>.
 - [24] C. O. [8] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Bocanegra, F. P., & Correa, “Diseño en ingeniería mecánica,” *McGraw-Hill Interam.*, vol. 8, 2008.
 - [25] W. A. Loflin *et al.*, “Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models,” *TECHNO BYTES*, pp. 283–289, 2019.
 - [26] 3Dlink, “La importancia de la altura de capa en la Impresión 3D,” 03/05/2018, 2018. [Online]. Available: <https://3dlink.me/la-importancia-de-la-altura-de-capa-en-la-impresion-3d/>.
 - [27] 3DWork, “Rellenos en impresión 3D,” Enero 26, 2019, 2019. [Online]. Available: <https://www.3d-work.es/rellenos-en-impresion-3d/>.
 - [28] P. Nel, M. Henao, N. Arzola, and D. Peña, “Diseño de un engranaje con perfil de diente especial bajo criterios geométricos y de resistencia a fatiga,” *Ingeniería y desarrollo*, vol. 35, pp. 431–451, 2017.
 - [29] G. E. Morales-Espejel, P. Rycerz, and A. Kadiric, “Prediction of micropitting damage in gear teeth contacts considering the concurrent effects of surface fatigue and mild wear,” *ELSEVIER*, pp. 99–115, 2017.
 - [30] Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 2da ed., vol. 1. Limmusa Willey, 2004.
 - [31] T. Mikolajczyk, T. Malinowski, L. Moldovan, H. Fuwen, T. Paczkowski, and I. Ciobanu, “CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing,” *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 22–28, 2019.
 - [32] Matterhackers.com, “Zortrax M300 features.” [Online]. Available: <https://www.matterhackers.com/store/l/zortrax-m300-3d-printer-fully-assembled/sk/M4631XU8>.
 - [33] Zortrax, “user guide zortrax M series,” 2018. [Online]. Available: https://support.zortrax.com/wp-content/uploads/2018/07/user_guide_zortrax_mseries_v3.pdf.
 - [34] J. I. Devore, “probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias,” Quinta., ciencias e ingeniería, Ed. Mexico: 2001, 2001, pp. 480–503.

ANEXOS

Anexo A. Regresiones múltiples para propiedades geométricas de diámetro Ext. Y ancho VS error con el modelo CAD (Minitab 16)

Análisis general de regresión: Error Diámetro exterior Vs Modulo; Numero de dientes; Ancho del engranaje; Espesor de capa; Numero de contornos; Porcentaje de relleno; calidad.

Regression Equation

Error diametro exterior = -0,170848 + 0,121343 Modulo + 0,00059702 Numero dientes - 0,00253782 Ancho engranaje + 0,224006 Espesor capa (mm) + 0,0238704 Numero contorno - 0,000997347 Porcentaje relleno - 0,0274469 Calidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,170848	0,078066	-2,18850	0,060
Modulo	0,121343	0,036477	3,32661	0,010
Numero dientes	0,000597	0,000656	0,90977	0,390
Ancho engranaje	-0,002538	0,001582	-1,60456	0,147
Espesor capa (mm)	0,224006	0,109440	2,04684	0,075
Numero contorno	0,023870	0,005432	4,39468	0,002
Porcentaje relleno	-0,000997	0,000410	-2,43268	0,041
Calidad	-0,027447	0,008200	-3,34736	0,010

Term	95% CI	VIF
Constant	(-0,350868; 0,009173)	
Modulo	(0,037228; 0,205458)	1,04941
Numero dientes	(-0,000916; 0,002110)	1,04822
Ancho engranaje	(-0,006185; 0,001109)	1,04379
Espesor capa (mm)	(-0,028363; 0,476375)	1,05416
Numero contorno	(0,011345; 0,036396)	1,04445
Porcentaje relleno	(-0,001943; -0,000052)	1,04762
Calidad	(-0,046355; -0,008539)	1,04762

Summary of Model

S = 0,0309620 R-Sq = 88,34% R-Sq(adj) = 78,14%
 PRESS = 0,0311726 R-Sq(pred) = 52,61%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	0,0581058	0,0581058	0,0083008	8,6589	0,003397
Modulo	1	0,0111488	0,0106087	0,0106087	11,0663	0,010437
Numero dientes	1	0,0009575	0,0007935	0,0007935	0,8277	0,389530
Ancho engranaje	1	0,0025430	0,0024681	0,0024681	2,5746	0,147258
Espesor capa (mm)	1	0,0046265	0,0040163	0,0040163	4,1896	0,074875
Numero contorno	1	0,0239384	0,0185145	0,0185145	19,3132	0,002303
Porcentaje relleno	1	0,0041503	0,0056732	0,0056732	5,9179	0,041031
Calidad	1	0,0107414	0,0107414	0,0107414	11,2048	0,010120
Error	8	0,0076692	0,0076692	0,0009586		
Total	15	0,0657750				

Fits and Diagnostics for All Observations

Error diametro exterior						
Obs		Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	0,09	0,081517	0,0225470	0,0084833	0,39978	
2	0,18	0,136196	0,0225563	0,0438044	2,06529	R
3	0,10	0,119404	0,0218443	-0,0194036	-0,88430	
4	-0,02	-0,008985	0,0225603	-0,0110149	-0,51944	
5	0,03	0,016273	0,0272771	0,0137272	0,93705	
6	-0,04	-0,044914	0,0218739	0,0049140	0,22425	
7	0,08	0,087595	0,0218674	-0,0075947	-0,34648	
8	0,03	0,062916	0,0218535	-0,0329158	-1,50072	
9	0,00	-0,000473	0,0223180	0,0004729	0,02204	
10	0,07	0,033875	0,0116965	0,0361252	1,26014	
11	0,07	0,096107	0,0215515	-0,0261068	-1,17439	
12	-0,05	-0,032282	0,0217886	-0,0177182	-0,80545	
13	0,14	0,132036	0,0219275	0,0079642	0,36434	
14	0,00	0,005605	0,0216189	-0,0056051	-0,25289	
15	-0,02	-0,049074	0,0215766	0,0290738	1,30929	
16	0,00	0,024206	0,0223547	-0,0242060	-1,12995	

R denotes an observation with a large standardized residual.

Durbin-Watson Statistic

Durbin-Watson statistic = 2,34900

Análisis general de regresión: Error Ancho engranaje Vs Modulo; Numero de dientes; Ancho del engranaje; Espesor de capa; Numero de contornos; Porcentaje de relleno; calidad.

Regression Equation

Error ancho = 0,368712 - 0,0684303 Modulo - 0,00302093 Numero dientes -
0,000656804 Ancho engranaje + 0,089075 Espesor capa (mm) -
0,00970113 Numero contorno + 0,000115723 Porcentaje relleno +
0,0223145 Calidad

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P	95% CI
Constant	0,368712	0,222018	1,66073	0,135	(-0,143262; 0,880685)
Modulo	-0,068430	0,103738	-0,65964	0,528	(-0,307652; 0,170791)
Numero dientes	-0,003021	0,001866	-1,61867	0,144	(-0,007325; 0,001283)
Ancho engranaje	-0,000657	0,004498	-0,14602	0,888	(-0,011030; 0,009716)
Espesor capa (mm)	0,089075	0,311245	0,28619	0,782	(-0,628656; 0,806806)
Numero contorno	-0,009701	0,015448	-0,62800	0,548	(-0,045323; 0,025921)
Porcentaje relleno	0,000116	0,001166	0,09925	0,923	(-0,002573; 0,002804)
Calidad	0,022314	0,023319	0,95690	0,367	(-0,031460; 0,076089)

Term	VIF
Constant	
Modulo	1,04941
Numero dientes	1,04822
Ancho engranaje	1,04379
Espesor capa (mm)	1,05416
Numero contorno	1,04445
Porcentaje relleno	1,04762
Calidad	1,04762

Summary of Model

S = 0,0880552 R-Sq = 37,58% R-Sq(adj) = -17,04%
PRESS = 0,258229 R-Sq(pred) = -159,85%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	0,0373453	0,0373453	0,0053350	0,68806	0,682318
Modulo	1	0,0027758	0,0033739	0,0033739	0,43513	0,528012
Numero dientes	1	0,0223813	0,0203154	0,0203154	2,62008	0,144180
Ancho engranaje	1	0,0003902	0,0001653	0,0001653	0,02132	0,887520
Espesor capa (mm)	1	0,0004946	0,0006351	0,0006351	0,08190	0,782004
Numero contorno	1	0,0042035	0,0030580	0,0030580	0,39439	0,547505
Porcentaje relleno	1	0,0000002	0,0000764	0,0000764	0,00985	0,923381
Calidad	1	0,0070998	0,0070998	0,0070998	0,91567	0,366635
Error	8	0,0620297	0,0620297	0,0077537		
Total	15	0,0993750				

Fits and Diagnostics for All Observations

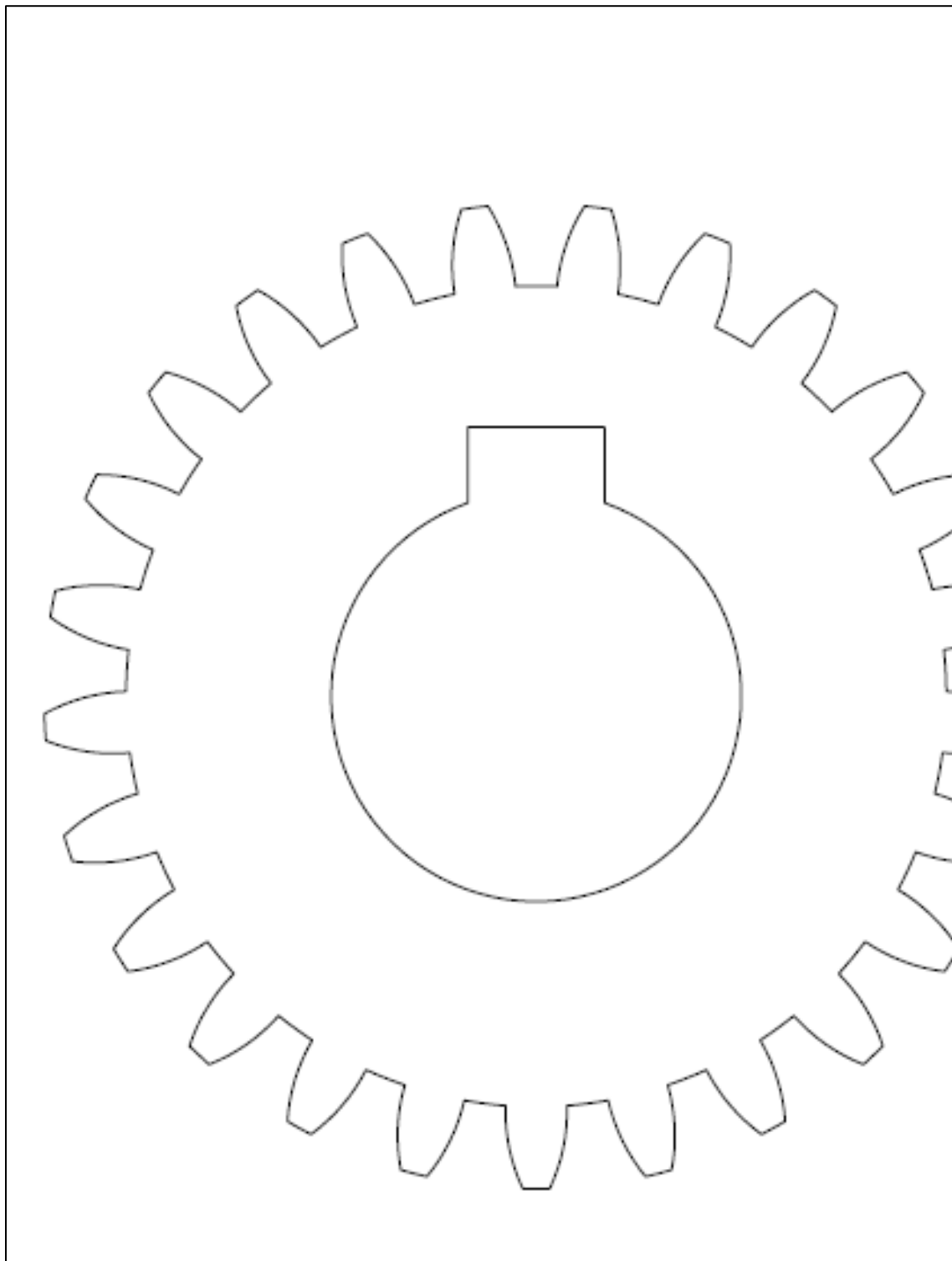
Obs	Error	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	0,07	0,149764	0,0641231	-0,079764	-1,32173
2	0,08	0,154494	0,0641497	-0,074494	-1,23497
3	0,14	0,103445	0,0621248	0,036555	0,58578
4	0,15	0,139342	0,0641611	0,010658	0,17673
5	0,18	0,196401	0,0775755	-0,016401	-0,39365
6	0,20	0,259020	0,0622090	-0,059020	-0,94704
7	0,25	0,181132	0,0621904	0,068868	1,10474
8	0,21	0,096403	0,0621508	0,113597	1,82111
9	0,18	0,132299	0,0634719	0,047701	0,78155
10	0,18	0,149576	0,0332646	0,030424	0,37317
11	0,20	0,174090	0,0612920	0,025910	0,40982
12	0,22	0,209987	0,0619662	0,010013	0,16005
13	-0,03	0,054412	0,0623612	-0,084412	-1,35782
14	0,10	0,163668	0,0614837	-0,063668	-1,01003
15	0,10	0,158938	0,0613635	-0,058938	-0,93327
16	0,31	0,217029	0,0635763	0,092971	1,52601

Durbin-Watson Statistic

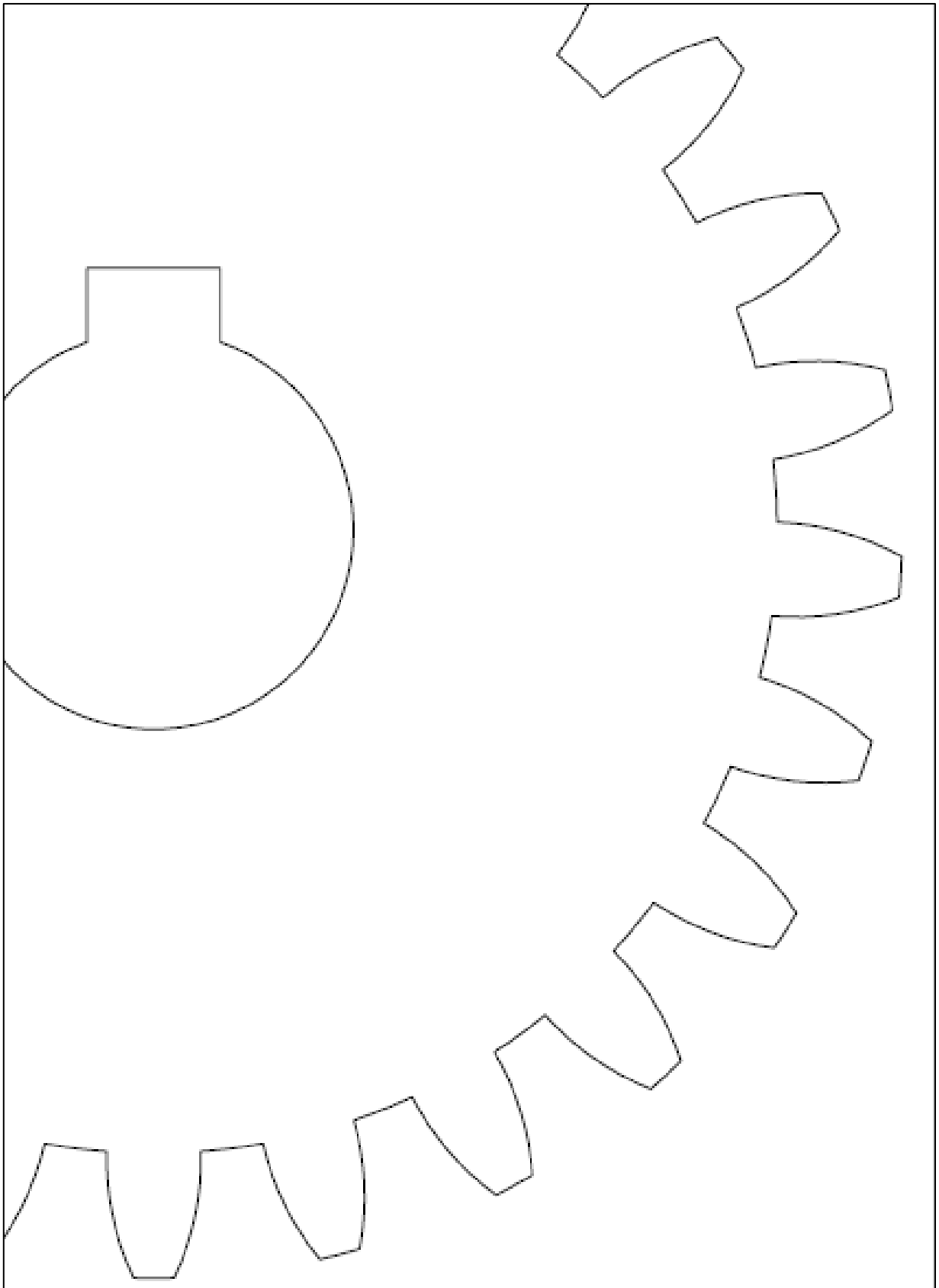
Durbin-Watson statistic = 1,14935

Anexo B. Plantillas usadas en el proyector de perfiles, para el análisis de los flancos de los dientes de los engranajes obtenidos por FDM.

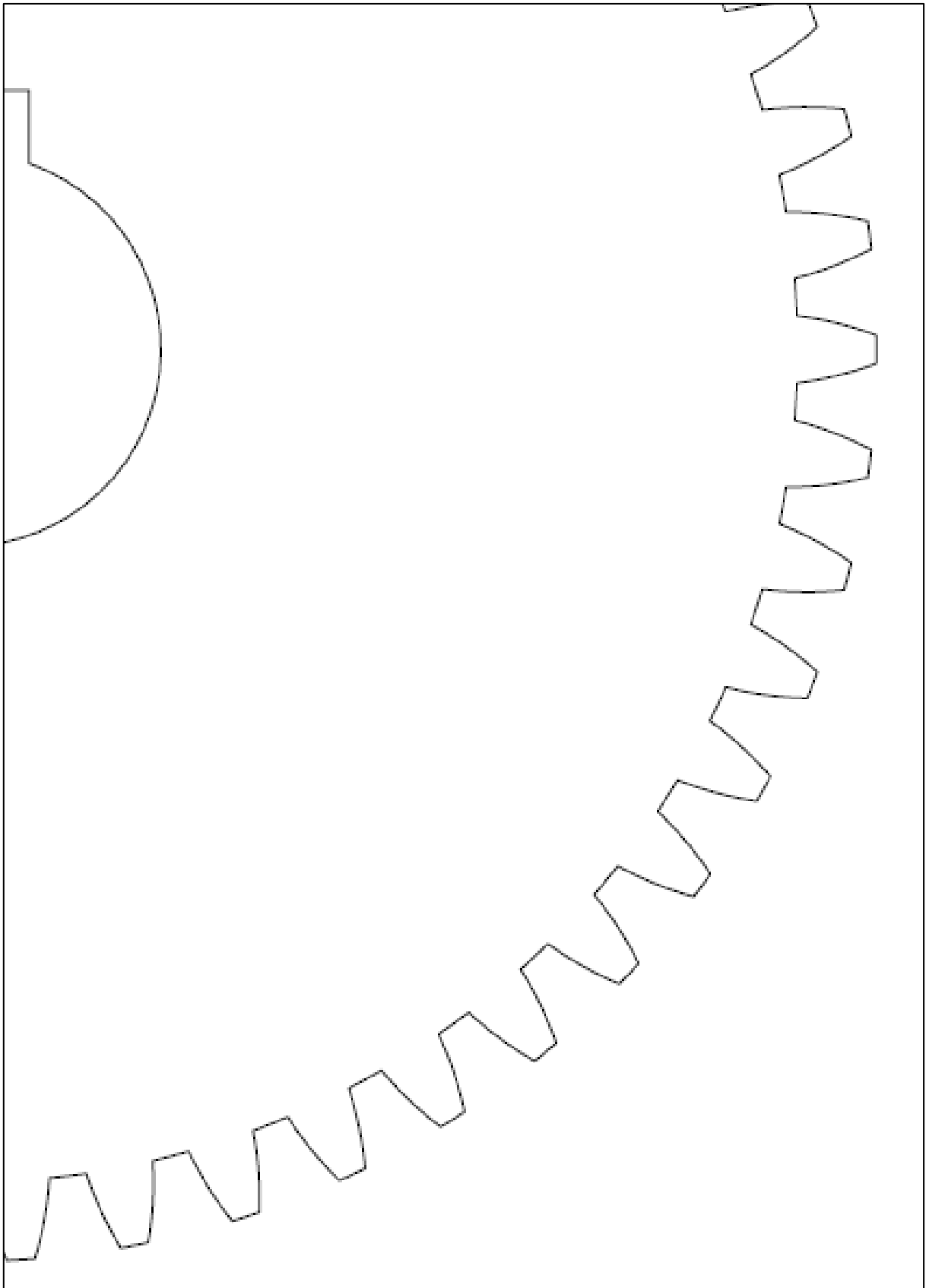
Cada una de las plantillas se imprimio en una impresora de burbuja, escala 1:1, tamaño de papel de impresión A4, Papel pergamino de 90g.



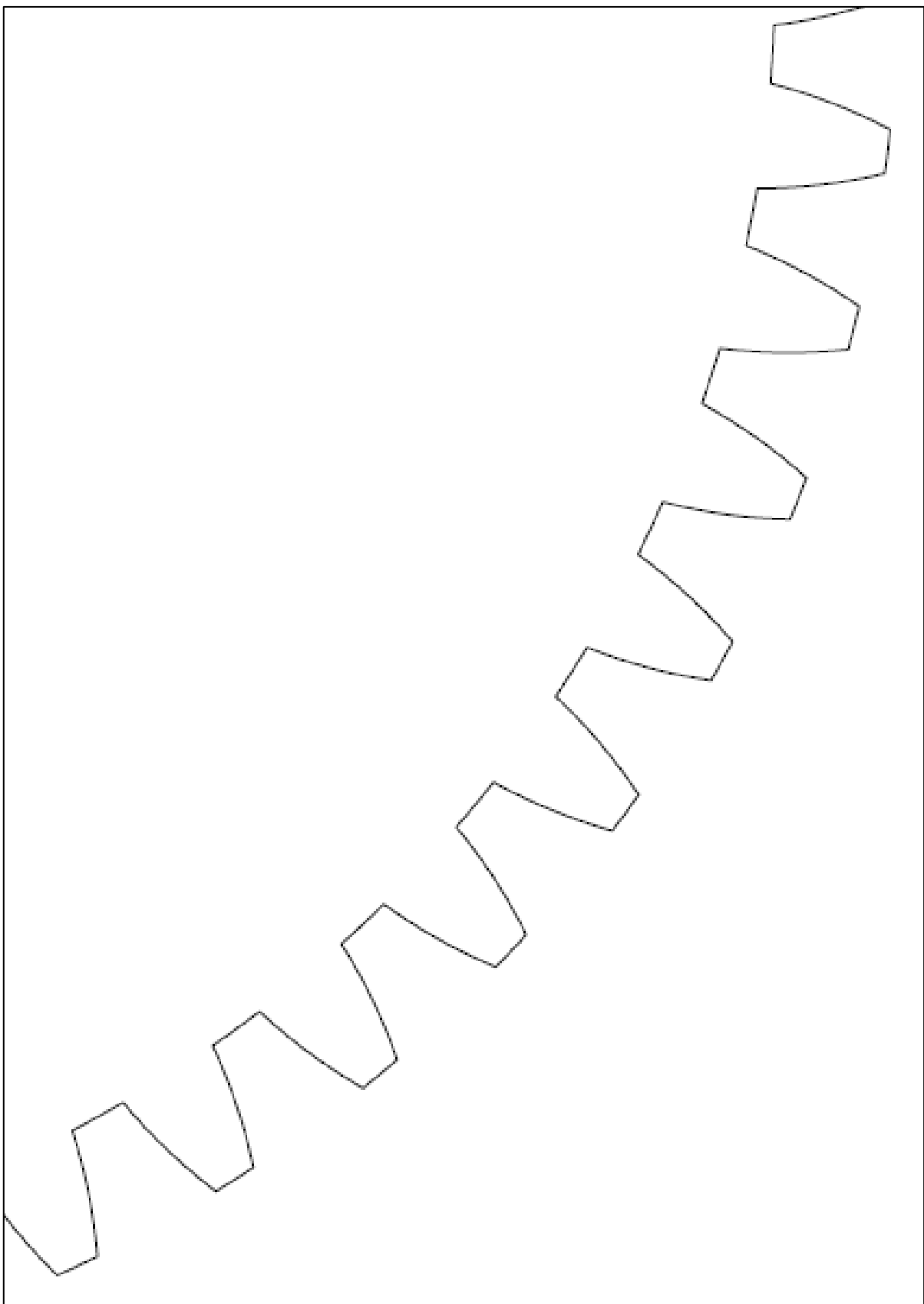
Plantilla #1. Modulo 0,8 y Numero de dientes 25



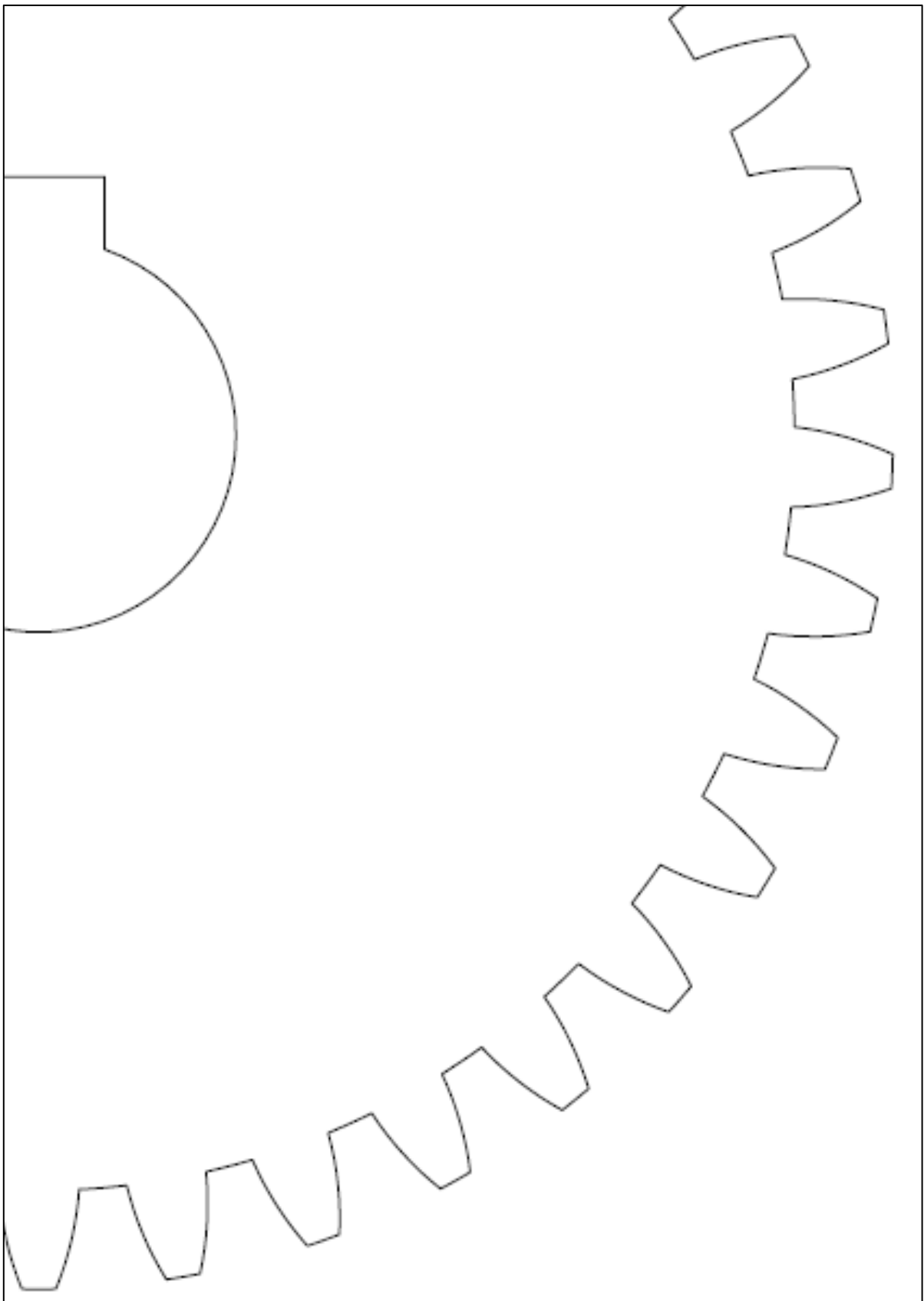
Plantilla #2. Modulo 1,25 y Numero de dientes 25



Plantilla #3. Modulo 0,8 y Numero de dientes 50



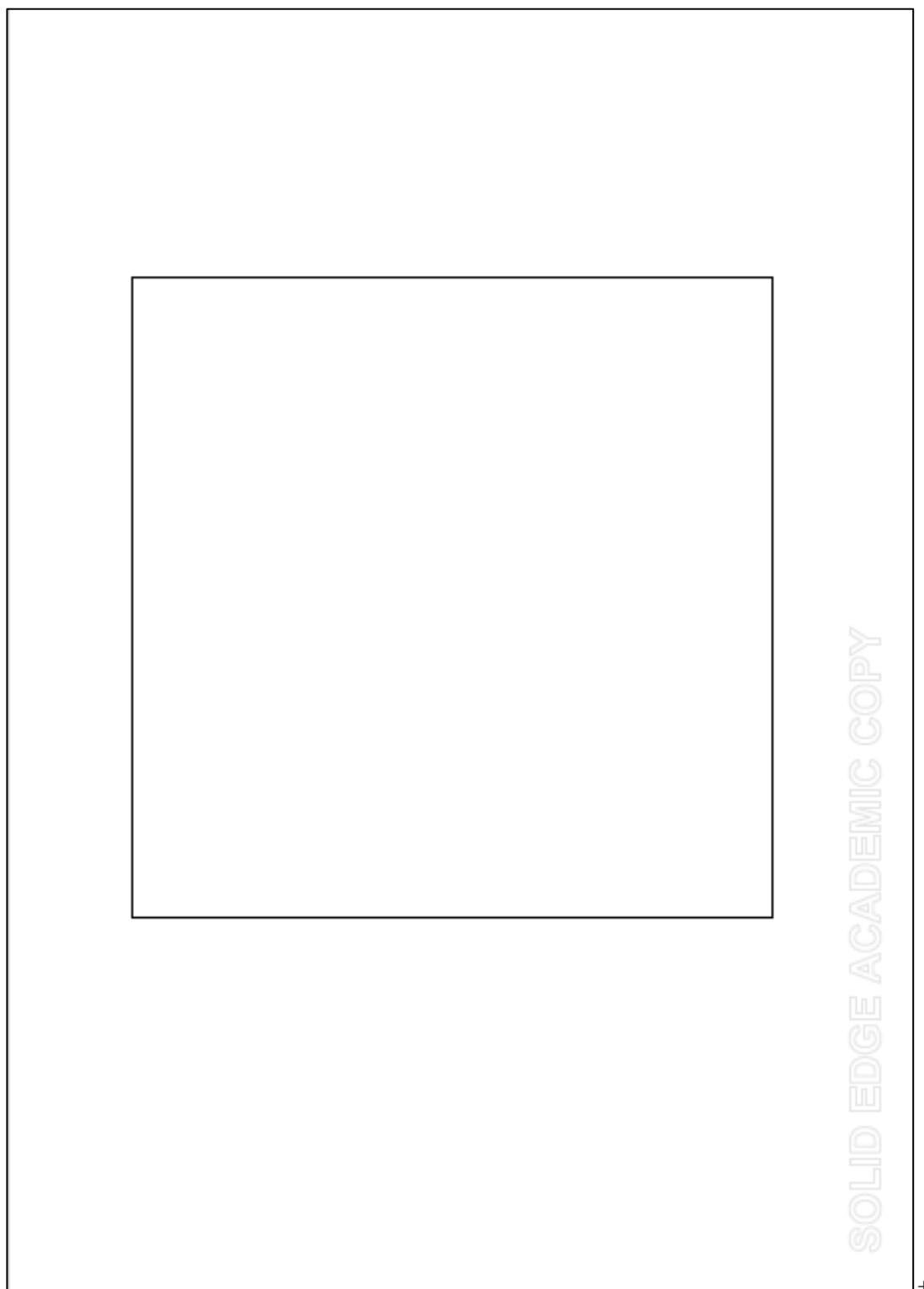
Plantilla #4. Modulo 1,25 y Numero de dientes 50



Plantilla #4. Modulo 1 y Numero de dientes 37

Anexo C. Plantillas usadas en el proyector de perfiles, como patrón

Se imprimio en una impresora de burbuja, escala 1:1, tamaño de papel de impresión A4, Papel pergamino de 90g.



Plantilla Patron. Medida patron de 14,82mm.

